ИКИ
ИНСТИТУТ
КОСМИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
РАН

XXII КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

21–23 апреля 2025 года
ИКИ РАН, Москва

СБОРНИК ТРУДОВ

Под редакцией
А. М. Садовского

Серия «МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА»

МОСКВА
ИКИ РАН
2025

УДК 629.7(063.3)
ББК 22.2

ISSN 2075-6836

ISBN 978-5-00015-079-5

XXII Young Scientists Conference "Fundamental and Applied Space Researches"

IKI RAS, Moscow, 21–23 April 2025

Proceedings
Ed. A. M. Sadovski

The XXII Young Scientists Conference "Fundamental and Applied Space Research" (https://kmu.cosmos.ru) dedicated to the Cosmonautics Day, took place at Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences on 21–23 April, 2025. Students, postgraduates and young scientists as well as their senior colleagues participated in the conference, and more than 200 talks were presented. These Conference Proceedings contain selected articles prepared by speakers. The Proceedings are included in the Russian Science Citation Index library.

XXII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»

ИКИ РАН, Москва, 21–23 апреля 2025 г.

Сборник трудов
Под ред. А. М. Садовского

XXII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (https://kmu.cosmos.ru/), посвящённая Дню космонавтики, была проведена в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) 21–23 апреля 2025 г. В конференции принимали участие студенты, аспиранты и молодые учёные, а также их старшие коллеги. Всего было представлено более 200 докладов. Настоящий сборник трудов конференции содержит избранные статьи, подготовленные докладчиками. Сборник включён в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Серия «МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА»

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.
Отдельные статьи даны в авторской редакции.
Качество иллюстраций соответствует предоставленному авторами материалу.

Электронная версия сборника размещена на сайтах ИКИ РАН https://iki.cosmos.ru/research и Российской научной электронной библиотеки http://elibrary.ru/.

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 2025

ПРЕДИСЛОВИЕ

В апреле 2025 года состоялась XXII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (http://kmu.cosmos.ru), посвящённая Дню космонавтики. В Конференции можно было участвовать как очно, так и онлайн. Конференция традиционно проводилась Советом молодых учёных и специалистов ИКИ РАН.

В этом году на Конференции была также проведена школьная секция (доклады юниоров), где были заслушаны работы учащихся 8–10 классов, при этом лучшие доклады секции были приняты в Труды. Всего на Конференцию поступило более 200 работ. Конференция уже на протяжении многих лет остаётся самым крупным научным мероприятием по космическим исследованиям среди молодёжи.

Одна из основных целей конференции — дать возможность студентам, аспирантам и молодым учёным возможность отточить навыки публичного выступления перед большой аудиторией, а также принять участие в обсуждении научных результатов — как получить комментарии к своей работе, так и задать вопросы другим докладчикам.

В конференции принимают участие студенты, аспиранты и молодые учёные (до 35 лет), чья деятельность связана с космосом и космическими исследованиями. Сборник Трудов Конференции молодых учёных содержит статьи, присланные участниками Конференции.

А. М. Садовский

УДК 520.662 : 523.4 DOI: 10.21046/KMU-2025-5-13

ADVANCING PLANETARY EXPLORATION WITH CUBESATS: CHALLENGES, INNOVATIONS, AND FUTURE DIRECTIONS

Pouya Latifiyan

School of astronautics of Beihang University, Beijing, China

CubeSats, initially developed for educational purposes in low-Earth orbit, have revolutionized planetary exploration by providing a cost-effective, agile, and scalable alternative to traditional large-scale missions. Their standardized design, rapid development cycles, and ability to serve as secondary payloads have enabled ground-breaking deep-space missions, including NASA's MarCO, Lunar Flashlight, and BioSentinel, as well as international efforts by Roscosmos, ESA, JAXA, and China. These missions demonstrate CubeSats' versatility in planetary science, technology validation, and astrobiology. However, challenges such as limited payload capacity, radiation susceptibility, and propulsion constraints remain. Emerging solutions—including federated spacecraft systems, swarm architectures, and innovative propulsion technologies like solar sails—are expanding their potential. As CubeSat capabilities advance, they are poised to play an increasingly vital role in solar system exploration, offering new opportunities for distributed science, rapid innovation, and collaborative missions. This paper reviews the current state, challenges, and prospects of CubeSats in planetary research, highlighting their transformative impact on space exploration.

Keywords: CubeSats, planetary exploration, deep-space missions, space technology, federated spacecraft systems, CubeSat swarms, cost-effective space missions

Exploration of our solar system has traditionally been dominated by large, expensive missions requiring significant financial and technical resources. However, the emergence of CubeSats — miniaturized satellites typically measuring 10×10×10 cm per unit — has revolutionized space science by enabling cost-effective, agile, and innovative approaches to planetary research. Originally developed for educational and low-Earth orbit (LEO) applications, CubeSats are now being adapted for deep-space missions, offering new opportunities to complement traditional spacecraft and expand our understanding of planetary bodies.

The CubeSat concept was developed by California Polytechnic State University and Stanford University in 1999, which set up a set of standards to help universities and institutions worldwide to perform aerospace missions for science and exploration. (Huang et al., 2023) The CubeSat paradigm of rapid development and low cost offers new opportunities to expand solar system exploration. (Hodges et al., 2016) The access to Earth-escape trajectories for CubeSats is opening a new era of exploration.(Kobayashi et al., 2019).

The CubeSat specification by its engineered design and increasingly commonplace use in the space sector has led to CubeSats becoming highly versatile platforms. They can be used to achieve many different mission objectives inexpensively due to their low cost and simple development process, and integration into mission architecture. Importantly, their lightweight aspect means they can be assigned as secondary payloads to many different orbits and destinations, and thanks to standardizations such as the P-POD deployment mechanism, with relative ease for the developer and launch service provider.(Cappelletti, Robson, 2021)

A critical advantage of CubeSat missions is their short turnaround time, which means that technologies can be demonstrated in flight much faster than on conventional missions, which usually cost more and take much longer to develop. Another advantage is reduced cost, which is related to reduced development schedules, in combination with the use of commercially available components.(Freeman, 2020).

Pouya Latifiyan — Space Technology Applications Researcher, Pouya@buaa.edu.cn

Traditional planetary missions often rely on large, resource-intensive spacecraft, but CubeSats now complement these efforts by enabling distributed sensor networks, rapid technology validation, and targeted observations.

CUBESAT MISSIONS BY SPACE AGENCIES

CubeSats have become a valuable tool for space agencies worldwide, enabling cost-effective science, technology demonstrations, and educational missions. Below are notable CubeSat missions led or supported by major space agencies:

NASA (National Aeronautics and Space Administration)

CubeSats are playing an increasingly larger role in exploration, technology demonstrations, scientific research, and educational investigations at the National Aeronautics and Space Administration (NASA) including planetary space exploration, Earth observation, and technology demonstrations (Crusan, Galica, 2018) missions include Lunar Flashlight, Near-Earth Asteroid Scout, BioSentinel, Lunar IceCube, CubeSat for Solar Particles, Lunar Polar Hydrogen Mapper, and ArgoMoon. (Kobayashi et al., 2019).

MarCO (Mars Cube One): The MarCO mission to Mars is among the first interplanetary missions to be enabled by CubeSat technology (Hodges et al., 2016) The first interplanetary CubeSats, MarCO-A and MarCO-B, successfully relayed data during NASA's InSight lander's descent to Mars in 2018. These 6U CubeSats proved that small satellites could support deep-space communication, paving the way for future relay networks.

The limited mass and volume available in a CubeSat present a tremendous design challenge. This challenge needed to be solved even before thinking of sending any CubeSat to Deep Space and to enable the first interplanetary CubeSat mission: Mars Cube One (MarCO) (Chahat et al., 2020).

Lunar Flashlight: Lunar Flashlight (LF) is a 6U, 14 kg spacecraft being built by the NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). The mission will use IR laser technology to search for volatiles and surface water ice deposits in the permanently shadowed regions (PSR) of the moon in preparation for future human lunar exploration (Sternberg et al., 2022). The Lunar Flashlight mission will demonstrate technologies for NASA, such as green propulsion and active laser spectroscopy, while proving the capability of performing a planetary science investigation in the CubeSat form factor (Cohen et al., 2020).

CAPSTONE (Cislunar Autonomous Positioning System Technology Operations and Navigation Experiment) The CAPSTONE mission is a rapid and low-cost small spacecraft pathfinder for the Artemis program that will also demonstrate the CAPS technology. Advanced Space has partnered with NASA to develop and build the Cislunar Autonomous Positioning System Technology Operations and Navigation Experiment (CAPSTONE); this mission will demonstrate the core software for the Cislunar Autonomous Positioning System (CAPS) which is currently being developed in a Phase III of NASA's SBIR program, and will primarily serve as a pathfinder for Near Rectilinear Halo Orbit (NRHO) operations around the Moon. The NHRO is the intended orbit for NASA's Gateway lunar orbital platform – as such, the CAPSTONE mission will validate simulations and confirm operational planning for Gateway while also validating performance of navigation and station-keeping for future operations (Cheetham, 2021).

BioSentinel is a 6U nanosatellite planned to launch in 2020 as a secondary payload onboard NASA's Space Launch System first exploration mission, Artemis-1, from which it will be deployed to a lunar fly-by trajectory leading to a heliocentric orbit. BioSentinel will conduct the first in situ measurements of biological response to space radiation outside low Earth orbit (LEO) in five decades; it will thus address strategic knowledge gaps related to the biological effects of space radiation. BioSentinel will measure the DNA damage and response to ambient space radiation in a model biological organism, which will

be compared to information provided by an onboard physical radiation sensor and to data obtained in LEO (on the International Space Station) and on Earth (Ricco et al., 2020).

Having explored various groundbreaking CubeSat missions led by NASA, we now turn our attention to similar efforts by other international space agencies such as Roscosmos, ESA, JAXA, and China.

Roscosmos

Roscosmos (Russia) has been actively involved in CubeSat development, particularly for scientific research, technology demonstration, and educational purposes. While Russia has traditionally focused on larger satellites and interplanetary missions, CubeSats have gained traction in recent years, often in collaboration with universities, research institutions, and international partners.

Russia has developed several notable CubeSats for educational, scientific, and Earth observation purposes, including SamSat-218/D (2016), a small satellite from Samara University for technology demonstrations, and Vizard-MSU (2023), a Moscow State University CubeSat designed for ionosphere research. In the realm of scientific and Earth observation missions, Norby (2021), a 3U CubeSat developed in collaboration with Denmark, was launched to study Earth's radiation belts, while CubeSX-HSE (2021), a remote sensing CubeSat by the Higher School of Economics, was deployed for Earth observation applications.

ESA (European Space Agency)

The Juventas CubeSat of the ESA-HERA mission relies on a low-frequency radar equipped with 50–70 MHz half-wavelength dipole antennas to study the geophysical properties of a binary asteroid system (Saccardi et al., 2023).

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft (EQUULEUS) will be the first CubeSat mission that explores a libration point orbit at the Earth-Moon L2 (Oguri et al., 2020). Launched with Artemis I, it is testing low-energy trajectory control for future lunar and interplanetary missions. The Plasma Spheric Helium ion Observation by Enhanced New Imager in eXtreme ultraviolet (PHOENIX) onboard EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft (EQUULEUS) performed global imaging observations of the Earth's plasmasphere from a meridian view (Kuwabara et al., 2025), The LightSail program adopted the CubeSat standard to capitalize upon the spacecraft bus miniaturization that is critical for solar sailing, and to leverage a growing vendor supply chain of off-the-shelf spacecraft components that facilitate flight system integration. LightSail 2 is a 3U CubeSat (Spencer et al., 2020).

Canada

The Iris mission is a student-led 3-U CubeSat comprised of a science payload of 20 geological samples placed in low-Earth orbit (LEO) to study the effects of space weathering (i.e., those aspects that can be investigated in LEO) (Connell et al., 2024). Iris, first developed for JPL's interplanetary nano spacecraft Pathfinder in a relevant environment mission, and further developed for JPL's Mars Cube One mission, is a software-defined radio based on various JPL flight heritage designs (Kobayashi et al., 2019).

China

Lunar and Deep-Space CubeSat Missions

China's first major step in CubeSat planetary research came with the Chang'e-4 lunar mission (2018), which carried the Longjiang-1 and Longjiang-2 microsatellites. Although Longjiang-1 failed, Longjiang-2 successfully entered lunar orbit, demonstrating China's

capability in miniaturized deep-space communication and navigation. They were built by researchers at the Harbin Institute of Technology in China, and the instruments will test technology for a radio-astronomy technique called very-long baseline interferometry (VLBI). This approach combines data from multiple radio antennas to create images of much higher resolution than would be possible with a single dish (Castelvecchi, 2018).

Mars and Deep-Space CubeSat Missions

While Tianwen-3 itself does not explicitly mention CubeSats, China's broader planetary exploration strategy increasingly incorporates small satellites for cost-effective, distributed science.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CUBESATS VS. TRADITIONAL MISSIONS

The exploration of our solar system has long been dominated by large, resource-intensive spacecraft, such as NASA's Voyager probes, Cassini-Huygens, and the Mars Science Laboratory. These missions deliver high-quality scientific data, extended operational lifetimes, and robust engineering, but they come with significant drawbacks: high costs (often exceeding billions of dollars), lengthy development cycles (decades in some cases), and limited flexibility once launched. In contrast, CubeSats—miniaturized satellites built on standardized form factors—offer a cost-effective, agile, and scalable alternative. While they cannot fully replace traditional missions, they complement them by enabling:

- Lower Costs (typically $1–10 million per mission vs. $500M–$2B for traditional spacecraft).
- Rapid Development (months to a few years vs. 10+ years for flagship missions).
- Distributed Science (swarms or federated systems for multi-point observations).

However, CubeSats face inherent limitations:

- Reduced Payload Capacity (restricting instrument sophistication).
- Shorter Lifespans (due to radiation susceptibility and limited propulsion).
- Lower Data Quality (constrained bandwidth and sensor resolution).

Despite these trade-offs, CubeSats excel in high-risk, high-reward scenarios, such as technology demonstrations, targeted planetary surveys, and precursor missions. Their ability to democratize space exploration — enabling universities, startups, and smaller nations to participate — marks a paradigm shift in planetary science.

Key Points to Integrate into the Introduction:

Cost Efficiency:

- Traditional missions require massive budgets (e.g., Perseverance rover: ~$2.7B).
- CubeSats (e.g., MarCO: ~$18.5M) enable cost-effective experimentation.

Development Time:

- Flagship missions take 10–20 years from proposal to launch.
- CubeSats (e.g., Lunar Flashlight) can be developed in <5 years.

Mission Longevity & Reliability:

- Traditional probes (e.g., Voyager) operate for decades.
- Most CubeSats last <2 years in deep space due to radiation and power constraints.

Scientific Return:

- Large missions provide high-resolution, multi-instrument datasets.
- CubeSats offer focused, niche science (e.g., BioSentinel's radiation studies).

Risk Tolerance:
- CubeSats allow high-risk experiments (e.g., solar sails, novel propulsion).
- Traditional missions prioritize ultra-reliable, heritage technology.

This comparison sets the stage for discussing how CubeSats fill critical gaps in planetary research while acknowledging where traditional missions remain indispensable.

CHALLENGES AND THE FUTURE OF CUBESAT PLANETARY EXPLORATION

While these missions showcase the potential of CubeSats in planetary research, they also highlight several technical challenges that must be addressed to fully realize their capabilities.

Technology investments continue to pay off in demonstration missions that serve as a proving ground for capabilities critical to deep space CubeSat and SmallSat missions (Freeman, 2020).

Limited Payload Capacity

Miniaturization restricts instrument capabilities, requiring trade-offs in scientific return.

With the growth of capability and system-level demands on deep space CubeSat science missions, this raises an interesting question: is the CubeSat form factor limiting the capability of deep space missions? The answer is not absolute. For MarCO, the 6U form factor was enabling. Because of the short timeline from mission formulation to delivery for InSight's planned 2016 launch, the mission was able to use the previously designed and qualified NLAS dispenser. This reduced the time, effort, and analysis needed to allow MarCO to be installed on the aft bulkhead of the final stage. Following the CubeSat form factor also allowed MarCO to make use of COTS components, such as the Hawk solar panels from MMA Design LLC, which are designed to fit on a 1U×3U CubeSat face. The standardization philosophy is also seen with the CubeSats going on the EM-1 mission. Both Lunar Flashlight and NEA Scout conform to the 6U form factor to meet the requirements of the common dispenser being qualified and installed on SLS (Imken et al., 2017).

Propulsion technologies

Propulsion technologies can be challenging to miniaturize, and the typical budget and schedule allocated to CubeSat programs make comprehensive testing and risk-reduction challenging. BioSentinel spacecraft is the first example of a propulsion system that has been manifested in a NASA Ames CubeSat (Lightsey et al., 2018).

For the next generation micro-propulsion system, three things are required as follows:
1) unpressurized;
2) safe and easy handling;
3) multi-function (Asakawa et al., 2017).

Water as the propellant. AQUARIUS uses storable, safe and non-toxic propellant: water, which allows for downsizing of whole propulsion system to 2U and storing 1.2 kg of water. Liquid propellant storage allows design of all propulsion systems below 100 kPa (Asakawa et al., 2017).

Solar sails have attracted keen interest from researchers as a new spacecraft using Solar Radiation Pressure (SRP) for passive propulsion. SRP acts on the huge sail surface to continuously generate solar pressure acceleration. With the accumulation of time, the solar sail will move faster than before, and this process does not require chemical fuels. Therefore, many research institutions and scholars regard solar sails as ideal spacecraft in the field of deep space exploration (Liu et al., 2022). Ultrathin light sails propelled by laser radiation pressure to relativistic speeds are currently the most promising route for flyby-

based exoplanet exploration. However, there has been a notable lack of experimental characterization of key parameters essential for LightSail propulsion (Michaeli et al., 2025).

Radiation Vulnerability

One of the biggest challenges for CubeSats in planetary exploration is radiation vulnerability. Unlike Earth's protective magnetosphere, deep space and other planetary environments expose CubeSats to intense cosmic rays, solar flares, and trapped radiation belts (e.g., Jupiter's harsh radiation zones). These high-energy particles can damage electronics, corrupt data, and shorten mission lifespans.

Federated Spacecraft Systems (FSS)

Federated spacecraft systems (FSS) are a more recent concept of distributed satellite systems following the idea of shared economies as seen on terrestrial applications for public transportation. Federated satellites are heterogeneous, independently operated systems that interact in orbit on a need basis. Interaction is enabled by intersatellite links, distributed computing approaches, and delay-tolerant network protocols. Optical communications have been identified as a key enabling technology for federated systems. Free-space laser communications allow mitigating interference and spectrum saturation traditionally associated with radiofrequency (RF) cross-links among large numbers of orbiting spacecraft. Given the complex orbital geometries and cross-link configurations that are envisioned for federated systems, optical communications appear to be a key enabling technology for the concept (Golkar, 2021).

Federated systems represent a valuable opportunity for CubeSat systems. By operating in federations, CubeSats can tap into otherwise unaffordable computing and processing resources. These are typically out of reach of CubeSat systems due to the stringent Swap requirements associated with CubeSat platforms. Previous research has explored the technical and commercial feasibility of customer spacecraft operating federated operations with the International Space Station (ISS) as a supplier node (Golkar, Lluch I Cruz, 2015).

Swarm

CubeSat swarms offer several key advantages and benefits. First, they are cost-effective, as launching a swarm of CubeSats is typically cheaper than deploying a single large spacecraft, enabling more frequent and varied missions. Second, they provide redundancy and resilience — if one CubeSat fails, the rest of the swarm can continue operating, minimizing mission risk. Third, swarms allow for multi-point observations, capturing simultaneous measurements from different locations, which enhances data accuracy, particularly for studying planetary magnetic fields or atmospheric dynamics. Additionally, CubeSat swarms are highly scalable, as missions can be easily adjusted by changing the number of satellites. Finally, their rapid development and launch capabilities accelerate scientific progress and innovation.

Difference between FSS and SWARM

Federated spacecraft systems (FSS) and SWARM (spacecraft swarms) differ primarily in their control architecture and operational approach: federated systems use a hierarchical, centralized model where a primary spacecraft or ground station coordinates subordinate units (e.g., Iridium satellites), offering structured control but with single-point failure risks, while SWARM systems employ a decentralized, self-organizing approach where multiple small spacecraft operate collectively using distributed algorithms (e.g., DARPA's Blackjack), enabling scalability, fault tolerance, and emergent behaviors like adaptive sensing or resilient communications. Federated systems excel in precision missions requiring tight coordination, whereas swarms prioritize flexibility and robustness in dynamic environments.

NANOSWARM

The NANOSWARM concept uses a novel "mother-with-many-children" architecture to place its CubeSat armada into a low, circular, polar lunar orbit. The mother ship releases some CubeSats on impact trajectories into the hearts of lunar magnetic anomalies to measure magnetic fields and proton fluxes, in real time, up until the last tens of milliseconds. A second set of CubeSats would then be released into a polar orbit with a periapsis over the South Pole, to measure neutron fluxes. The Principal Investigator for NanoSwarm is Prof. Ian Garrick-Bethel, Associate Professor of Planetary Sciences at the University of California, Santa Cruz (Freeman, 2020).

ASTROBIOLOGY

Both astrobiology and fundamental space biology are ripe for scientific advances achievable with small, microbial payload experiments that can be carried aboard CubeSats, albeit with limitations. For example, in astrobiology neither the study of prebiotic chemistry nor the search for extra-terrestrial life requires carrying microbes into space, and while the study of microbes is central to fundamental space biology, complex multicellular organisms up to and including humans are also of great interest but not CubeSat appropriate (Zea et al., 2021).

CONCLUSION

CubeSats have emerged as a transformative force in planetary research, providing cost-effective, agile, and innovative solutions to complement traditional large-scale missions. Their miniaturized design, standardized architecture, and rapid development cycles enable groundbreaking opportunities for deep-space exploration, technology validation, and distributed scientific observations. Missions like NASA's MarCO, Lunar Flashlight, and BioSentinel, along with international efforts by ESA, JAXA, and China, showcase the versatility of CubeSats in studying planetary bodies, testing propulsion technologies, and advancing astrobiology.

Despite their advantages, CubeSats face challenges such as limited payload capacity, radiation vulnerability, and propulsion constraints. However, advancements in federated systems, swarm architectures, and novel technologies like solar sails and water-based propulsion are paving the way for more robust and scalable missions. As CubeSat capabilities continue to evolve, they hold the promise to democratize space exploration, accelerate scientific discovery, and play a pivotal role in humanity's quest to understand the solar system and beyond. The future of planetary research will increasingly depend on these small yet powerful platforms, marking a new era of exploration driven by innovation and collaboration.

REFERENCES

Asakawa J., *Koizumi H.*, *Nishii K.*, *Takeda N.*, *Funase R.* Development of the Water Resistojet Propulsion System for Deep Space Exploration by the CubeSat // Small Satellite Conference. 2017. Article EQUULEUS. EQUULEUS.

Cappelletti C., *Robson D.* 2. CubeSat missions and applications // Cubesat Handbook / eds. C. Cappelletti, S. Battistini, B. K. Malphrus. 2021. P. 53–65. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817884-3.00002-3.

Castelvecchi D. Chinese satellite launch kicks off ambitious mission to Moon's far side // Nature. 2018. V. 557(7706). P. 478–479. https://doi.org/10.1038/d41586-018-05231-9

Chahat N., *Decrossas E.*, *Michael Kobayashi M.* Mars Cube One // CubeSat Antenna Design. 2020. P. 35–89. https://doi.org/10.1002/9781119692720.ch2.

Cheetham B. Cislunar Autonomous Positioning System Technology Operations and Navigation Experiment (CAPSTONE) // ASCEND 2021 / American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2021. https://doi.org/doi:10.2514/6.2021-4128.

Cohen B. A., *Hayne P. O.*, *Greenhagen B. et al.* Lunar Flashlight: Illuminating the Lunar South Pole // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2020. V. 35(3). P. 46–52. https://doi.org/10.1109/MAES.2019.2950746.

Connell S. A., *Applin D. M.*, *Turenne N. N. et al.* The Iris CubeSat mission: Science payload description for a pathfinder geological space weathering investigation // Acta Astronautica. 2024. V. 216. P. 381–394. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.01.009.

Crusan J., *Galica C.* NASA's CubeSat Launch Initiative: Enabling broad access to space // Acta Astronautica. 2018. V. 157. P. 51–60. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.08.048.

Freeman A. Exploring our solar system with CubeSats and SmallSats: the dawn of a new era // CEAS Space J. 2020. V. 12(4). P. 491–502. https://doi.org/10.1007/s12567-020-00298-5.

Golkar A. 5. Distributed CubeSat mission concepts // Cubesat Handbook / eds. C. Cappelletti, S. Battistini, B. K. Malphrus. 2021. P. 123–133. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817884-3.00005-9.

Golkar A., *Lluch i Cruz.* The Federated Satellite Systems paradigm: Concept and business case evaluation // Acta Astronautica. 2015. V. 111. P. 230–248. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.02.009.

Hodges R. E., *Chahat N. E.*, *Hoppe D. J.*, *Vacchione J. D.* The Mars Cube One deployable high gain antenna // 2016 IEEE International Symp. Antennas and Propagation (APSURSI). 2016. DOI: 10.1109/APS.2016.7696473.

Huang Y., *Mu Z.*, *Chu S.*, *Wu S.* SSS-2A: A 3U CubeSat Project for an In-Orbit Formation Flying Mission // Proc. Intern. Conf. Aerospace System Science and Engineering 2021. P. 311–328.

Imken T., *Castillo-Rogez J.*, *He Y.*, *Baker J.*, *Marinan A.* CubeSat flight system development for enabling deep space science // 2017 IEEE Aerospace Conf. 2017. DOI: 10.1109/AERO.2017.7943885.

Kobayashi M. M., *Holmes S.*, *Yarlagadda A. et al.* The Iris Deep-Space Transponder for the SLS EM-1 Secondary Payloads // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2019. V. 34(9). P. 34-44. https://doi.org/10.1109/MAES.2019.2905923.

Kuwabara M., *Yoshioka K.*, *Hikida R. et al.* Global and Sequential Imaging Observation of the Earth's Plasmasphere by PHOENIX Onboard EQUULEUS // J. Geophysical Research: Space Physics. 2025. V. 130(4). 17 p. https://doi.org/10.1029/2024JA033389.

Lightsey E. G., *Stevenson T.*, *Sorgenfrei M.* Development and Testing of a 3-D-Printed Cold Gas Thruster for an Interplanetary CubeSat // Proc. IEEE. 2018. V. 106(3). P. 379–390. https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2799898.

Liu J., *Zhao P.*, *Wu C.*, *Chen K. et al.* SIASAIL-I solar sail: From system design to on-orbit demonstration mission // Acta Astronautica. 2022. V. 192. P. 133–142. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.11.034.

Michaeli L., *Gao R.*, *Kelzenberg M. et al.* Direct radiation pressure measurements for lightsail membranes // Nature Photonics. 2025. V. 19. P. 369–377. https://doi.org/10.1038/s41566-024-01605-w.

Oguri K., *Oshima K.*, *Campagnola S. et al.* EQUULEUS Trajectory Design // The J. Astronautical Sciences. 2020. V. 67. https://doi.org/10.1007/s40295-019-00206-y.

Ricco A. J., *Maria S. R. S.*, *Hanel R. P.*, *Bhattacharya S.* BioSentinel: A 6U Nanosatellite for Deep-Space Biological Science // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2020. V. 35(3). P. 6–18. https://doi.org/10.1109/MAES.2019.2953760.

Saccardi F., *Giacomini A.*, *Sánchez R. T. et al.* Uncertainty of a VHF CubeSat Measurement based on the Synthetic Probe Array Technique // 2023 17th European Conf. Antennas and Propagation (EuCAP). 2023. DOI: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133319.

Spencer D., *Betts B.*, *Bellardo J. et al.* The LightSail 2 Solar Sailing Technology Demonstration // Advances in Space Research. 2020. V. 67. https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.06.029.

Sternberg D., *Lo K.*, *Baker J.* Night Sky Testing of the Lunar Flashlight Star Tracker // 2022 IEEE Aerospace Conf. (AERO). 2022. DOI: 10.1109/AERO53065.2022.9843416

Zea L., *Santa Maria S. R.*, *Ricco A. J.* CubeSats for microbiology and astrobiology research // Cubesat Handbook / eds. C. Cappelletti, S. Battistini, B. K. Malphrus.2021. P. 147–162. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817884-3.00007-2.

ПРОДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ CUBESATS: ПРОБЛЕМЫ, ИННОВАЦИИ И БУДУЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Пуя Латифиян

Школа астронавтики Университета Бэйхан, Пекин, Китай

Малые искусственные спутники Земли CubeSats, изначально разработанные для образовательных целей на низкой околоземной орбите, произвели революцию в планетарных исследованиях, предоставив экономически эффективную, гибкую и масштабируемую альтернативу традиционным крупномасштабным миссиям. Их стандартизированная конструкция, быстрые циклы разработки и способность служить в качестве вторичной полезной нагрузки позволили осуществить новаторские миссии в дальний космос, включая MarCO, Lunar Flashlight и BioSentinel от NASA, а также международные усилия Роскосмоса, ЕКА, JAXA и Китая. Эти миссии демонстрируют универсальность CubeSats в планетарной науке, проверке технологий и астробиологии. Однако такие проблемы, как ограниченная грузоподъёмность, восприимчивость к радиации и ограничения по движению, остаются. Новые решения, включая федеративные системы космических аппаратов, архитектуры роя и инновационные технологии движения, такие как солнечный паруа, расширяют свой потенциал. По мере развития возможностей CubeSat они готовы играть всё более важную роль в исследовании Солнечной системы, предлагая новые возможности для распределённой науки, быстрых инноваций и совместных миссий. В статье рассматриваются текущее состояние, проблемы и перспективы CubeSat в исследовании планет, подчёркивая их преобразующее влияние на исследование космоса.

Ключевые слова: CubeSat, исследование планет, миссии в дальний космос, космические технологии, федеративные системы космических аппаратов, рои CubeSat, экономически эффективные космические миссии

Пуя Латифиян — исследователь в области применения космических технологий
Pouya@buaa.edu.cn

УДК 631.452 DOI: 10.21046/KMU-2025-14-18

ТИПЫ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДЬЯХ ПОЧЕПСКОГО РАЙОНА БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ИНДЕКСУ NDVI

О. Д. Алимова

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия

На основе снимков Sentinel-2 за 2021–2024 гг. были построены карты индекса NDVI для почв, используемых в сельском хозяйстве в Почепском районе Брянской области. Выявлено два типа неоднородности растительного покрова. Первый — природного происхождения — связан с рельефом, а именно с локальными понижениями, а также с очагами сорняков. Идентифицируется данный тип по ярко выраженным и устойчивым во времени пятнам на поле. Второй тип связан с антропогенной деятельностью и на картах индекса NDVI отражается как полосчатость на полях. Она может быть сформирована из-за неравномерного внесения удобрений, преимущественно азотных, тем самым развитие растений идёт по-разному. Процессы посева и вспашки создают эмерджентный микрорельеф, который влияет на распределение биомассы сельскохозяйственной культуры.

Ключевые слова: индекс NDVI, неоднородность растительности и почвенного покрова.

Индекс NDVI (*англ.* normalized difference vegetation index) является одной их характеристик для оценки количества растительной биомассы и как следствие прогнозируемого урожая. Это нормализованный дифференцированный вегетационный индекс, который оценивается путём анализа спутниковых снимков (Meneses-Tovar, 2011) с использованием данных каналов ближнего инфракрасного и видимого красного света (Ozyavuz et al., 2015). Установлено, что между индексом NDVI и урожайностью различных культур (Березин и др., 2015; Степанов и др., 2020), в том числе и озимой пшеницы (Федулов и др., 2016; Сторчак и др., 2018) есть статистически значимая связь.

Объектами исследования выступают сельскохозяйственные поля агрохозяйства Красный Рог, расположенного в Почепском районе Брянской области. Основные культуры, возделываемыми в этом хозяйстве, — озимая и яровая пшеницы, озимый и яровой рапс и соя

По снимкам Sentinel-2, полученным с платформы «ВЕГА-Science», были построены карты индекса NDVI для исследуемой территории на период с 2021 по 2024 г.

В ходе исследования было выявлено два типа неоднородности растительного покрова. Первый тип — природного происхождения, который в свою очередь можно разделить на неоднородность, устойчивую во времени, связанную с локальными понижениями с древесно-кустарниковой растительностью — колками, и не устойчивую во времени, приуроченную к очагам сорной растительности. Второй тип неоднородности связан с антропогенной деятельностью на сельскохозяйственных полях.

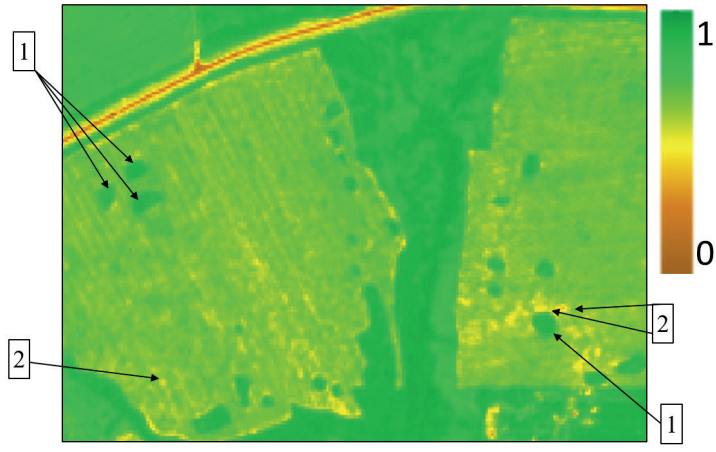
Устойчивая неоднородность природного происхождения на исследуемой территории представлена колками, которые являются широко распространёнными на Брянском ополье. На карте естественной поверхности они идентифицируются как округлые или эллипсоидальные заросшие древесно-кустарниковой растительностью участки площадью от 0,1 до 7,5 га (рис. 1). При наложении крупномасштабной почвенной карты было обнаружено, что большая часть колков приурочена к болотно-низинным перегнойно-глеевым почвам.

Алимова Ольга Дмитриевна — магистр, al-ol17@yandex.ru



Рис. 1. Колки на карте естественной поверхности

По картам индекса NDVI колки в течение всего вегетационного периода выделяются по тёмно-зелёному цвету. В июле индекс NDVI принимает значения от 0,85 до 1, что характерно для древесно-кустарниковой растительности. А также видно, что колки оконтурены зоной шириной от 5 до 17 м, индекс NDVI которого находится в диапазоне от 0,50 до 0,55 в июле месяце, что свидетельствует о низкой биомассе растений (рис. 2). Это связано с тем, колки расположены на микропонижениях, в которые стекает вода вместе с питательными элементами, и как следствие почва вокруг становится менее плодородной и более сухой. Наличие колков на сельскохозяйственных полях значительно усложняет процессы обработки и внесения удобрений, что становится одним из факторов снижения урожайности.



1 – Колки
2 – Очаги сорной растительности

Рис. 2. Неоднородности природного происхождения на карте индекса NDVI

Неустойчивая природная неоднородность связана преимущественно с сорной растительностью. На картах индекса NDVI она проявляется как мелкие пятна размером до 30 м, NDVI которых находится в диапазоне от 0,4 до 0,5, что в 1,5 раза меньше значения NDVI незасорённых участков (рис. 2). Связи с рельефом обнаружено не было. При этом отмечается, что очаги меняют расположение ежегодно на 100–250 м. Это может быть связано с тем, что проводится локальная обработка гербицидами, но используемой дозировки недостаточно, чтобы растение погибло.

Следующий тип — это неоднородность антропогенного происхождения, устойчивая на протяжении всего времени использования поля под сельское хозяйство. Ежегодная вспашка, посев, обработка почвы и внесение удобрений формируют эмерджентный микрорельеф, который на картах естественного синтеза и индекса NDVI выражен полосчатостью на поле (рис. 3). В образующихся полосах микропонижений скапливается большое количество влаги, питательных веществ, вносимых с удобрениями, что благоприятно сказывается на росте и развитии растений, о чём свидетельствует различие по значениям индекса NDVI, который отличается на 0,05–0,1 между полосами. Таким образом, растительная биомасса на сельскохозяйственном поле распределяется неравномерно.

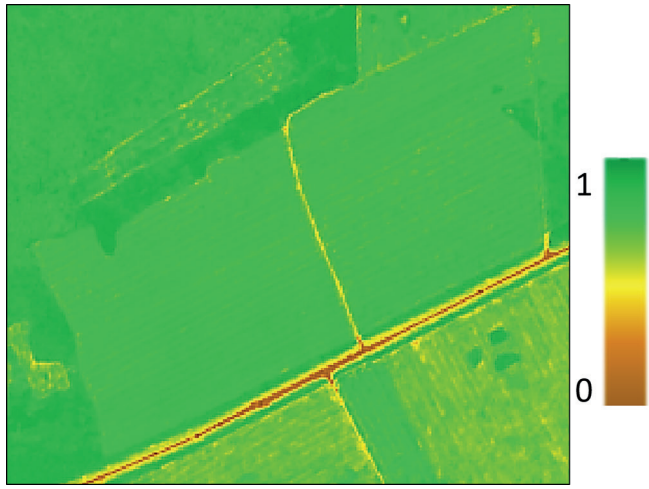


Рис. 3. Полосчатость на сельскохозяйственном поле

С помощью платформы ВЕГА-Science была проведена классификация по индексу NDVI двух из исследуемых полей. Полосчатость ярко выражена как на карте и с увеличением классов проявление становится чётче.

В ходе исследования данной территории было выявлено тёмное пятно площадью 17,7 га, устойчивое во времени (рис. 4). При изучении рельефа отмечается наличие понижения в этой области и наиболее тёмные участки соответствуют максимальным понижениям на поле. Предполагается, что тёмное пятно образовалось вследствие стекания и накопления органического вещества под действием рельефа, что и придаёт такую окраску.

На карте температурных аномалий этот участок представляется более тёплым, чем близлежащие территории, это значит, что почва прогревается быстрее и всходы появляются раньше. А также помимо гумуса в понижении содержится больше питательных элементов, что способствует повышению биомассы. Ярко выраженного визуального отличия по карте индекса NDVI не видно, но при проведении классификации данный участок становится чётко виден и индекс NDVI в июле месяце на нём выше в среднем на 0,2.

Таким образом, в ходе исследования карт индекса NDVI было выявлено два типа неоднородности природного и антропогенного происхождения. Колки — это элементы ландшафта, образующие устойчивую во времени и пространстве неоднородность природного генезиса. Сорная растительность формирует на сельскохозяйственных полях неустойчивую природную неоднородность. Агромероприятия создают эмерджентный микрорельеф, выраженный полосчатостью на полях —

образуется неоднородность антропогенного происхождения. В локальных понижениях идёт накопление органического вещества и питательных веществ, а также температурный и водный режимы отличаются от близлежащих территорий, что также приводит к неоднородности, проявляющейся преимущественно во времени всхожести и количеству растительной биомассы.

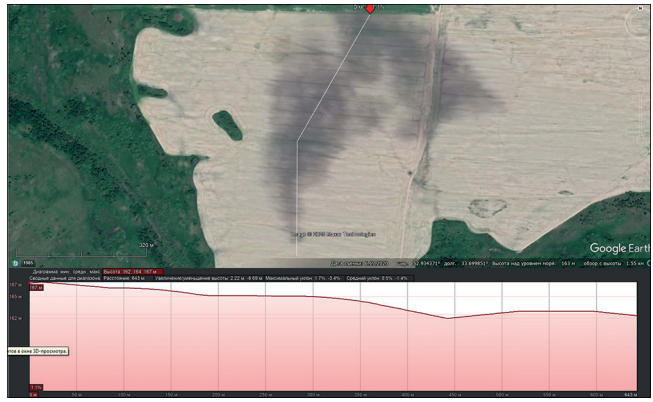


Рис. 4. Тёмное пятно

ЛИТЕРАТУРА

Березин Л. В., *Шаяхметов М. Р.*, *Гиндемит А. М.*, *Сергеева А.* Ю. Изучение взаимосвязи урожайности яровой твердой пшеницы с вегетационным индексом NDVI степной зоны Омской области на основе данных дистанционного зондирования Земли // Вестн. Омского гос. аграр. ун-та. 2015. № 2(18). С. 34–38.

Степанов А. С., *Асеева Т. А.*, *Дубровин К. Н.* Влияние климатических характеристик и значений вегетационного индекса NDVI на урожайность сои (на примере районов Приморского края) // Аграр. вестн. Урала. 2020. № 1. С. 10–19.

Сторчак И. Г., *Шестакова Е. О.*, *Ерошенко Ф. В.* Связь урожайности посевов озимой пшеницы с NDVI для отдельных полей // Аграр. вестн. Урала. 2018. № 6. С. 64–68.

Федулов Ю. П., *Подушин Ю. В.*, *Мязина А. Н.*, *Чухиль А. А.*, *Сафонова Т. Г.* Связь нормализованного индекса вегетации (NDVI) с урожайностью посевов озимой пшеницы. Краснодар: ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграр. ун-т», 2016. С. 106–107.

Meneses-Tovar C. L. NDVI as indicator of degradation // Unasylva. 2011. V. 62. No. 238. P. 39–46.

Ozyavuz M., *Bilgili B. C.*, *Salici A.* Determination of vegetation changes with NDVI method // J. Environmental Protection and Ecology. 2015. V. 16. No. 1. P. 264–273.

TYPES OF HETEROGENEITIES IN AGRICULTURAL LANDS OF THE POCHEPSKY DISTRICT OF THE BRYANSK REGION ACCORDING TO THE NDVI INDEX

O. D. Alimova

Lomonosov Moscow State Institute, Moscow, Russia

Based on the Sentinel-2 images from 2021–2024, maps of the NDVI index for soils used in agriculture in the Pochepsky district of the Bryansk region were built. Two types of vegetation cover heterogeneity have been identified. The first one is of natural origin and is associated with the relief,

namely with local depressions, as well as with foci of weeds. This type is identified by pronounced and time-stable spots on the field. The second type is associated with anthropogenic activity and is reflected on NDVI index maps as banding in the margins. It can be formed due to uneven application of fertilizers, mainly nitrogen fertilizers, thus the development of plants proceeds in different ways. The processes of sowing and plowing create an emergent microrelief, which affects the distribution of crop biomass.

Keywords: NDVI index, heterogeneity of vegetation and soil cover

Alimova Olga Dmitrievna — Master's degree, al-ol17@yandex.ru

УДК 528.8:631.4 DOI: 10.21046/KMU-2025-19-30

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПУСТЫНИВАНИЯ НА АПШЕРОНСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ И АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Л. Ф. Байрамова

**Всероссийская академия внешней торговли Минэкономразвития РФ
Москва, Россия**

Опустынивание — серьёзная экологическая проблема, особенно в засушливых регионах, таких как Апшеронский полуостров. На территории, подверженной влиянию добычи нефти и климатических изменений, наблюдается деградация почв, снижение водных ресурсов и ухудшение состояния растительности. На основе спутниковых данных Landsat-8 (2013–2024) и анализа NDVI выявлена слабая негативная тенденция, подтверждённая прогнозными моделями. Результаты подчёркивают необходимость постоянного мониторинга и реализации природоохранных стратегий: посадки деревьев и углеродного регулирования.

Ключевые слова: опустынивание, NDVI, Апшеронский полуостров, спутниковые данные, прогнозирование, посадка деревьев, климатическая устойчивость

Опустынивание — одна из самых острых экологических проблем, затрагивающая более 30 % территории Азербайджана (UNCCD, 2022; Mikayilov et al., 2023). На Апшеронском полуострове, где сочетаются полузасушливый климат, дефицит осадков и высокая индустриальная нагрузка, процесс опустынивания особенно выражен. Масштабная добыча нефти привела к загрязнению свыше 33 000 га земли, из которых более 10 000 га серьёзно пострадали (Aliyev, 2018; Yerimiz quruyur, 2022). Это вызвало деградацию почвы, ухудшение качества воды и сокращение биоразнообразия. Негативное воздействие ощущается и на уровне здоровья населения, а также ведёт к внутренней миграции и трансформации сельских территорий в урбанизированные зоны.

Основные причины опустынивания включают антропогенные факторы: перевыпас скота, неустойчивое землепользование, вырубку лесов, неэффективное орошение и стремительную урбанизацию. Усиливающиеся климатические изменения только усугубляют ситуацию (Kosmas et al., 1999; https://www.thegef.org/sites/default/files/documents/Focal_area_GEF-7_Programming_Directions_Land_Degradation.pdf). Комплексный анализ экологических и социально-экономических факторов позволяет формировать более точные меры противодействия деградации земель и вырабатывать устойчивую политику для восстановления среды и сохранения природных ресурсов региона. Аналогичные методы использовались и в исследованиях по Турции и Монголии (Kadıoğlu, Yılmaz, 2019; Lee et al., 2019).

ОБЛАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Апшеронский полуостров (площадь около 4234 км^2) расположен в районе 40° 42′–40° 12′ с. ш. и 50° 24′–49° 30′ в. д. Он простирается примерно на 60 км в восточном направлении от Каспийского моря, достигая ширины до 30 км. Здесь находится столица Азербайджана Баку, а также города Сумгайыт и Хырдалан. В этом регионе проживает около 40 % населения страны и сосредоточено 70 % промышленного потенциала (UNCCD, 2022; https://data.unccd.int/country-overview?country=AZE) (рис. 1).

Байрамова Лейла Фаиг кызы — студентка, Leyla.f.bayramova@gmail.com



Рис. 1. Визуализация области интереса

Лето жаркое и сухое, средняя температура часто превышает 30 °C, а зима мягкая, температура обычно колеблется от 2 до 8 °C. В регионе выпадает относительно мало осадков, годовая норма осадков составляет от 200 до 350 мм, большая часть которых приходится на осенние и весенние месяцы. Сочетание ограниченного количества осадков и высокой скорости испарения приводит к засушливой среде с ограниченными водными ресурсами, что делает этот регион особенно уязвимым для деградации окружающей среды.

Эрозия почвы — одна из главных проблем, вызванная ветром и водой из-за скудного растительного покрова (Kosmas et al., 1999). Отсутствие растительности позволяет ветру и стокам размывать верхний слой почвы, постепенно снижая продуктивность земли. В районах, где распространены такие виды деятельности человека, как перевыпас скота и неправильное землепользование, темпы эрозии почвы ещё более ускоряются, что приводит к дальнейшей деградации плодородных земель.

Естественный почвенный покров характеризуется редкой, засухоустойчивой растительностью, типичной для полузасушливых районов. Большую часть растительного покрова составляют пастбища, кустарники и небольшие деревья. Однако из-за чрезмерного выпаса скота большая часть этой растительности деградировала.

Хотя сельское хозяйство в регионе существует, оно ограничено засушливым климатом и нехваткой воды. Там, где есть ирригация, можно найти сельскохозяйственные поля, но они часто подвержены риску засоления из-за неэффективной практики управления водными ресурсами.

СБОР И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

В анализе используются данные спутника Landsat-8 C2 T1L2 (*англ.*_Collection 2 Tier 1 Surface Reflectance) за период с 2013 по 2024 г., который является частью давней программы Landsat, обеспечивающей непрерывную спутниковую съёмку Земли с 1972 г. Спутник Landsat-8, запущенный в феврале 2013 г., оснащён двумя основными приборами: OLI (*англ.* Operational Land Imager) и TIRS (*англ.*

Thermal Infrared Sensor). Продукты данных, генерируемые спутником Landsat-8 C2 T1L2, включают атмосферную коррекцию отражательной способности поверхности и температуры поверхности, что делает их ценным ресурсом для таких приложений, как картографирование землепользования и почвенного покрова, мониторинг растительности и выявление экологических изменений (Мамедов et al., 2016).

Данные Landsat-8 C2 T1L2 представляют собой надёжный и универсальный набор данных для мониторинга изменений в землепользовании, оценки состояния окружающей среды и проведения различных анализов, связанных с поверхностью Земли. Сочетание высокого пространственного разрешения, возможности частых повторных посещений и всестороннего спектрального покрытия делает его идеальным выбором для данного исследования, посвящённого опустыниванию и деградации земель на Апшеронском полуострове.

В техническом процессе анализа опустынивания использовалась синергия между Google Earth Engine (GEE) и Google Colab, сочетающая облачную обработку геопространственных данных с локальным анализом на языке Python. Вначале в среде Colab был инициализирован Python API Earth Engine (ee), который установил связь с распределённой вычислительной инфраструктурой GEE. Территория исследования, Апшеронский полуостров, была определена с помощью ee.Geometry.Polygon() для создания ограничительного поля, которое затем использовалось для фильтрации всех последующих геопространственных операций.

Этапы предварительной обработки следующие:

1. Маскировка облаков для удаления пикселей, загрязнённых облаками.
2. Масштабирование значений отражательной способности поверхности.
3. Расчёт NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index).

При анализе исследуемой территории мы специально маскировали море, чтобы избежать вмешательства в расчёты NDVI. Включение моря в анализ может привести к искажению или введению в заблуждение значений NDVI, так как вода обычно возвращает низкие или отрицательные значения NDVI, ложно указывая на отсутствие растительности.

Нормализованный относительный индекс растительности NDVI — это широко используемый индекс, который показывает разницу между ближним инфракрасным NIR (*англ.* Near Infrared) светом, который растительность сильно отражает, и красным Red светом, который поглощается для фотосинтеза. Он рассчитывается по формуле: NDVI = (NIR – Red)/((NIR + Red)).

Значения NDVI варьируются от –1 до 1, при этом более высокие значения указывают на более здоровую и густую растительность. Постоянные низкие значения NDVI в регионе могут указывать на сильную деградацию земель и эрозию почвы, характерные для опустыненных территорий (Feng et al., 2022; Hummadi, Khalaf, 2024).

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Анализ временных рядов проводился сведением коллекций изображений к региональной статистике с помощью функций ee.Reducer, а результаты экспортировались в виде массивов для дальнейшего анализа в Python (рис. 2). Показана динамика состояния растительности в июне за период 2013–2024 гг.

Собраны ежемесячные значения NDVI с 2013 по 2024 г., расположенные в матричном формате для визуализации долгосрочного поведения растительности в регионе (рис. 3).

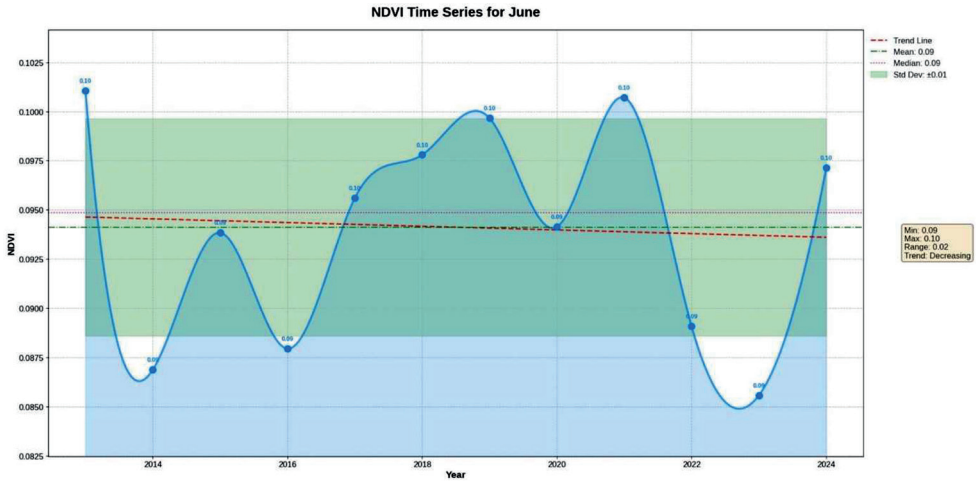


Рис. 2. Временной ряд NDVI за июнь 2013-2024 гг. Ось *X*: год наблюдения; ось *Y*: NDVI (безразмерная величина)

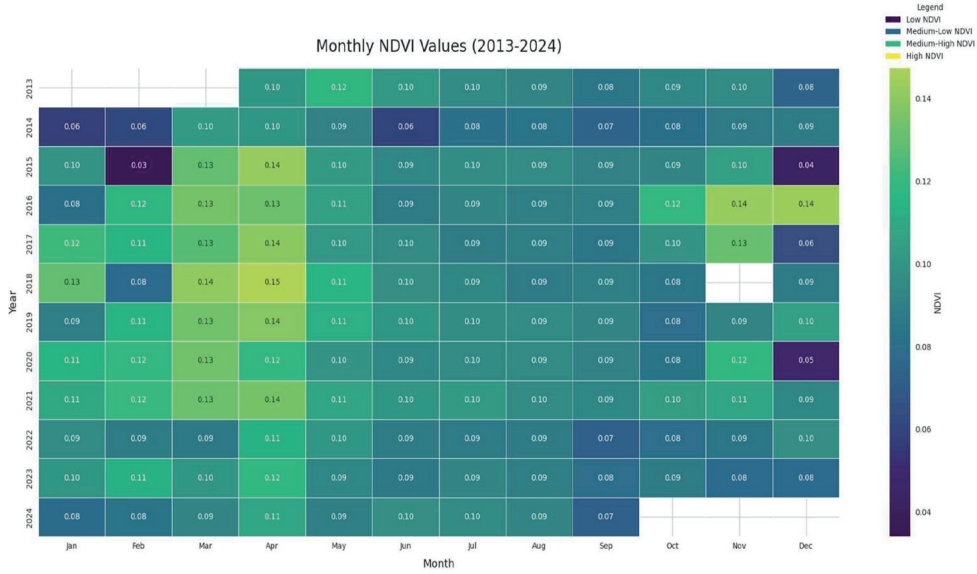


Рис. 3. Матрица помесячных значений NDVI (2013–2024). Ось *X*: годы; ось *Y*: месяцы. Цветовая шкала: значения NDVI (безразмерные). Визуализация сезонных и годовых изменений растительного покрова

Полученные данные свидетельствуют, что за прошедшие годы NDVI изменился минимально, наблюдаются лишь незначительные колебания в течение всего периода.

Для выявления каких-либо закономерностей был проведён анализ тенденций, и график показывает очень незначительную, едва заметную тенденцию к снижению (рис. 4).

Анализ тенденций NDVI помогает понять существующее поведение растительности, что очень важно для разработки надёжного прогноза будущих условий на земле.

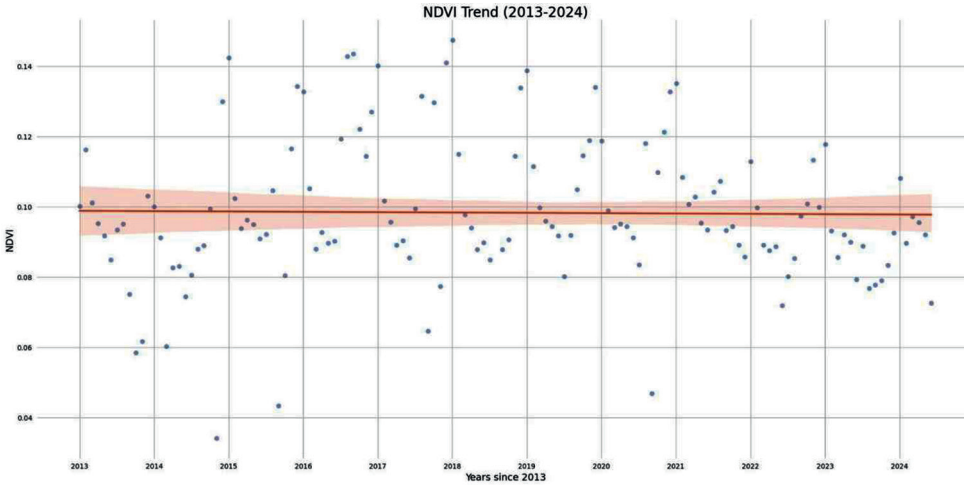


Рис. 4. График тренда NDVI (2013–2024). Ось *X*: годы; ось *Y*: среднее значение NDVI (безразмерная величина). График тренда NDVI, отражающий общую тенденцию изменений растительности

КЛАССИФИКАЦИЯ И ИЗМЕНЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Использован нормализованный разностный индекс растительности (NDVI) для классификации почвенно-растительного покрова в указанном регионе Апшеронского полуострова. Для анализа почвенно-растительного покрова использовался набор данных ESA WorldCover, доступный через GEE (коллекция ESA/WorldCover/v100). Расчёт площади различных типов почвенно-растительного покрова проводился с помощью ee.Image.pixelArea() и ee.Reducer.sum().group().

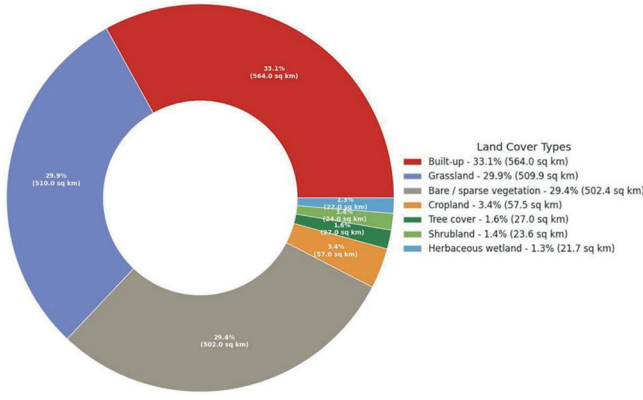


Рис. 5. Классификация типов растительного покрова. Категории: застроенные территории, луга, редкая растительность, пахотные земли и др. Окраска соответствует типам земного покрова на территории полуострова

Классификация почвенно-растительного покрова показывает распределение различных типов почвенно-растительного покрова на исследуемой территории. Доминирующими категориями являются застроенные территории (33,1 %,

564 км^2), луга (29,9 %, 509,9 км^2) и голая/редкая растительность (29,4 %, 502,4 км^2) (рис. 5). Высокий процент застроенных земель свидетельствует о значительной урбанизации и промышленной деятельности, в то время как большая доля голой/редкой растительности указывает на значительную деградацию земель, потенциально связанную с опустыниванием.

К более мелким типам почвенно-растительного покрова относятся пахотные земли (3,4 %, 57,5 км^2), древесный покров (1,6 %, 27,0 км^2), кустарники (1,4 %, 23,6 км^2) и травянистые водно-болотные угодья (1,3 %, 21,7 км^2). Эти территории могут быть особенно уязвимы к изменениям окружающей среды и требуют целенаправленного управления для сохранения биоразнообразия и экологического баланса.

Анализ NDVI даёт представление об изменениях почвенно-растительного покрова во времени (рис. 6). В частности, сравнение значений NDVI за июнь 2013 и июнь 2024 гг. показывает значительные сдвиги в распределении почвенно-растительного покрова. Оранжевые столбики представляют почвенно-растительный покров на основе NDVI в июне 2013 г., а зелёные столбики отражают условия в июне 2024 г., измеренные в квадратных километрах.

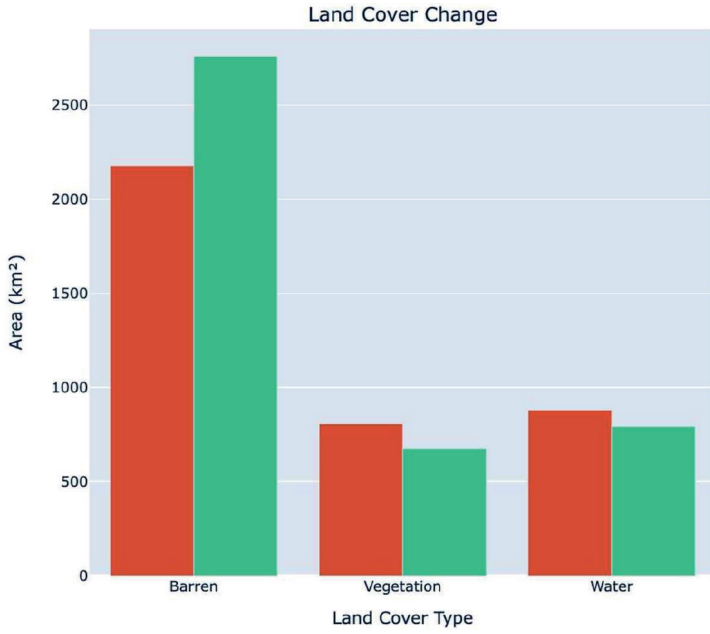


Рис. 6. Изменение почвенно-растительного покрова на основе значений NDVI. Ось *X*: категории землепользования; ось *Y*: площадь (в км^2); оранжевый цвет — данные 2013 г., зелёный — данные 2024 г.

Результаты показывают сильную разницу за анализируемый период:

- площадь бесплодных земель значительно увеличилась, что свидетельствует о явном росте опустыненных или лишённых растительности земель;
- растительный покров заметно уменьшился, что свидетельствует о сокращении численности или площади растений, вероятно, под влиянием факторов деградации окружающей среды;
- состояние водных объектов несколько ухудшилось, что свидетельствует об экологическом стрессе в регионе.

Прогнозирование NDVI

На следующем этапе анализа применяются методы прогнозирования для предсказания значений NDVI по 2034 г. (рис. 7). Используя исторические данные с 2013 по 2023 г., была обучена модель для прогнозирования будущих тенденций в растительном покрове на исследуемой территории. Цель прогноза — дать представление о долгосрочной динамике деградации и опустынивания земель, что позволит нам предвидеть потенциальную траекторию сокращения растительности. Для прогнозирования временных рядов использовались модели Prophet и ARIMA из statsmodels, а подгонка моделей и прогнозирование осуществлялись с помощью pandas DataFrames.

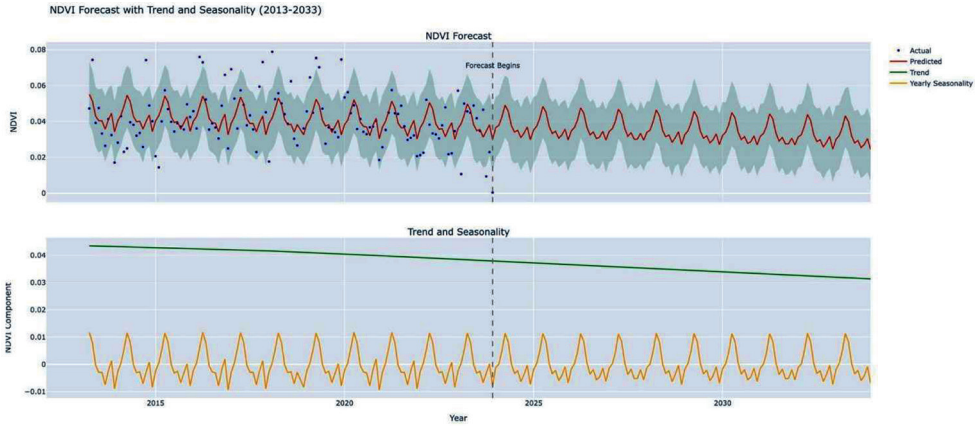


Рис. 7. Прогноз NDVI с учётом тренда и сезонности (2013–2034). Ось *X*: годы; ось *Y*: NDVI (безразмерное значение). Модельный прогноз динамики растительного покрова на Апшеронском полуострове

Эффективность модели оценивалась по нескольким ключевым показателям. Средняя квадратичная ошибка MSE (*англ.* Mean Squared Error), представляющая собой среднюю квадратичную разницу между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями, была относительно низкой и составила 0,0002, что говорит о том, что модель смогла отразить изменения NDVI с минимальной ошибкой. Средняя абсолютная ошибка MAE (*англ.* Mean Absolute Error), которая отражает среднюю величину ошибок в более интерпретируемой форме, составила 0,0101, что говорит о том, что прогнозы модели в среднем очень близки к наблюдаемым значениям NDVI. Однако значение *R*-квадрат (R^2), которое показывает, насколько хорошо модель объясняет изменчивость данных, составило 0,1873, что указывает, что, хотя модель работает достаточно хорошо, остаётся возможность для улучшения объяснения изменчивости NDVI с течением времени.

Прогноз NDVI для Апшеронского полуострова выявляет едва заметную, но устойчивую тенденцию к опустыниванию в течение следующего десятилетия. Это постепенное ухудшение состояния растительности, хотя и незначительное, ясно указывает на то, что ситуация не улучшится сама по себе. Если не принять меры, то нисходящая траектория будет свидетельствовать о продолжающейся деградации местной экосистемы.

Карта на рис. 8 иллюстрирует тенденции изменения значений NDVI на Апшеронском полуострове. Она визуализирует изменения в состоянии растительности с течением времени, а цветовые градиенты указывают на вариации значений NDVI.

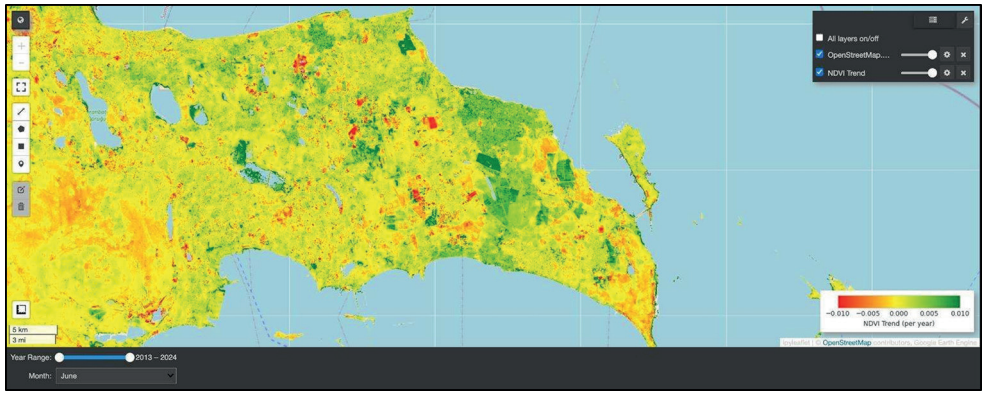


Рис. 8. Образец карты трендов NDVI для июня 2013–2024 гг. Цветовая шкала: изменение NDVI во времени. Красные зоны — снижение NDVI, зелёные — увеличение; синие — стабильные участки

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ был сосредоточен на данных NDVI с 2013 по 2024 г. для изучения тенденций в растительном покрове, изменений почвенно-растительного покрова и прогнозирования возможных будущих изменений. Вначале был проведён анализ временных рядов значений NDVI, который выявил минимальные общие колебания за период с небольшой тенденцией к снижению. Это едва заметное снижение свидетельствует о постепенном уменьшении состояния растительности или растительного покрова, что, вероятно, связано с такими факторами, как рост промышленной активности, деградация почв и экологический стресс в регионе.

Модель прогнозирования столкнулась с рядом проблем, связанных с ограниченной изменчивостью исторических данных, что затрудняло прогнозирование резких изменений с высокой точностью. Кроме того, модель машинного обучения была вынуждена работать с отсутствующими или зашумленными данными, что вносило неопределённость в прогноз.

Несмотря на эти трудности, модель дала прогноз, предполагающий дальнейшее постепенное сокращение растительного покрова, хотя значительные краткосрочные изменения маловероятны. Полученные результаты подчёркивают важность постоянного мониторинга и необходимость получения более детальных данных для повышения точности прогноза.

Дальнейшие исследования могут включать в себя введение дополнительных экологических данных для получения более полного представления об опустынивании. Кроме того, решение вопросов качества данных, таких как устранение пробелов в исторических записях и улучшение разрешения, повысит надёжность будущих прогнозов. Наконец, следует изучить политические рекомендации и меры по смягчению последствий опустынивания, особенно с учётом влияния промышленной деятельности в регионе.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Результаты проведённого анализа подчёркивают важность реализации стратегий и политики по борьбе с опустыниванием и деградацией земель. Эти инициативы имеют жизненное значение для решения проблемы опустынивания и поддерживают цели, поставленные в документе (Азербайджан..., 2021). Этот стратегический

план направлен на расширение зелёных насаждений и восстановление деградированных земель по всей стране к 2030 г. с целью восстановления бесполезных земельных участков.

Посадка деревьев

Посадка деревьев получает всё большее признание в качестве эффективного решения проблемы опустынивания. Восстанавливая растительный покров, инициативы по посадке деревьев могут улучшить состояние почвы, повысить водоотдачу и способствовать биологическому разнообразию, тем самым смягчая последствия опустынивания.

Одной из самых амбициозных кампаний по посадке деревьев в мире является инициатива «Великая зелёная стена» (англ. Great Green Wall), цель которой — создать к 2030 г. 8000-километровую полосу деревьев по всему африканскому региону Сахель (https://www.unccd.int/our-work/ggwi). Способствуя развитию агролесоводства и повышению плодородия почв, эта инициатива вносит свой вклад в борьбу с опустыниванием и способствует устойчивому развитию региона.

Однако не все мероприятия по посадке деревьев оказываются успешными. Например, в 1970-х гг. правительство Нигера посадило 60 млн деревьев, но выжило менее 20 %. Этот опыт заставил фермеров переключить внимание с посадки новых деревьев на восстановление уже существующих. Ухаживая за этими деревьями, они повышали плодородие почвы и способствовали росту дополнительной растительности. Эта стратегия позволила успешно восстановить до 12 млн акров опустыненных земель, повысив урожайность для местного населения.

Просто посадить деревья недостаточно; эффективные подходы должны предусматривать приоритетное восстановление существующих экосистем для обеспечения долгосрочного успеха и устойчивости.

В Азербайджане посадка деревьев является ключевой частью плана по борьбе с обезлесением и опустыниванием в различных регионах страны (Akhundov, 2023). В 2019 г. за один день по всей стране было высажено 650 000 деревьев. Затем последовали масштабные акции по посадке деревьев в 2020 г., организованные совместно Министерством экологии и природных ресурсов и Общественным союзом IDEA (*англ*. International Dialogue for Environmental Action, https://azerbaijan.az/ru/related-information/240).

В 2021 г. в рамках «Общереспубликанского марафона озеленения» было высажено около 1 млн деревьев, в том числе в Карабахском и Восточно-Зангазурском экономических районах.

Торговля квотами на выбросы углекислого газа

Страны по всему миру принимают различные экономические стратегии для борьбы с изменением климата, стремясь обеспечить баланс между экологической устойчивостью и экономическим ростом. Один из ведущих подходов — механизмы ценообразования на углерод, включая налоги на углерод и системы торговли квотами на выбросы ETS (*англ*. Emissions Trading System), также известные как схемы cap-and-trade (Guest Authors, 2018). Обе стратегии создают финансовые стимулы для предприятий сокращать выбросы парниковых газов и инвестировать в экологически чистые технологии.

Углеродные налоги напрямую определяют плату за выбросы углерода, повышая стоимость использования ископаемого топлива. В идеале полученные доходы реинвестируются в проекты возобновляемой энергетики или используются для компенсации воздействия на уязвимые слои населения. Азербайджан уже готовит закон об углеродном налоге в преддверии COP29 (*англ*. 29th Conference of the Parties), о чём объявил Мухтар Бабаев, министр экологии и природных ресурсов страны.

Однако налог на выбросы углекислого газа имеет свои ограничения. Он налагает фиксированную стоимость на выбросы, независимо от способности компании сократить их, что потенциально может привести к росту потребительских цен и инфляции. Компании могут больше сосредоточиться на уходе от налогов, чем на значительных инвестициях в «зелёные» технологии.

В отличие от этого, ETS предлагает рыночный подход, ограничивая общий объём выбросов и позволяя компаниям торговать квотами на выбросы. Если компания выбрасывает меньше установленного лимита, она может продать излишки квот в виде углеродных кредитов, получая финансовое вознаграждение за сокращение выбросов. Компании также могут получать квоты в рамках проектов по секвестрации углерода, что стимулирует более широкие экологические усилия. Такая гибкость поощряет как сокращение выбросов, так и инновации, а предприятия могут получать прибыль от инициатив в области устойчивого развития.

Если ETS способствует формированию динамичного рынка для сокращения выбросов, то налог на выбросы углерода, хотя и более простой, может рассматриваться как финансовое бремя, особенно для отраслей, зависящих от ископаемого топлива. Он не является прямым вознаграждением за сокращение выбросов и может непропорционально сильно повлиять на потребителей с низким уровнем дохода, поскольку компании перекладывают расходы на них. ETS, поощряя эффективность и инновации, предлагает более адаптируемое решение, смягчающее некоторые регрессивные эффекты, наблюдаемые при введении налога на выбросы углерода.

Сбалансированный подход, сочетающий в себе как углеродные налоги, так и системы торговли квотами на выбросы (ETS), может стать более комплексным решением, позволяющим использовать определённость налоговых поступлений для финансирования экологических проектов и в то же время использовать рыночные стимулы ETS для поощрения инноваций и вознаграждения компаний за превышение целевых показателей по сокращению выбросов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опустынивание представляет собой серьёзную проблему для глобальных экосистем и средств к существованию человека, особенно в таких регионах, как Азербайджан. Данное исследование показало критическое состояние деградации земель на Апшеронском полуострове, где взаимодействие промышленной деятельности, изменения климата и неустойчивой практики землепользования привело к значительному экологическому стрессу. Полученные результаты подчёркивают настоятельную необходимость разработки комплексных стратегий по борьбе с опустыниванием и продвижению практики устойчивого землепользования.

Анализ данных NDVI с 2013 по 2024 гг. выявил минимальные изменения в состоянии растительности с небольшой тенденцией к снижению, свидетельствующей о постепенном ухудшении экологических условий. Эта тенденция согласуется с документально подтверждёнными последствиями добычи нефти, урбанизации и изменчивости климата, которые в совокупности способствовали деградации почв, нехватке воды и загрязнению окружающей среды. Наблюдаемые изменения в почвенно-растительном покрове, в частности увеличение площади бесплодных земель и сокращение растительности, свидетельствуют о тревожной тенденции, требующей вмешательства.

Модели прогнозирования позволяют заглянуть в будущее растительного покрова Апшеронского полуострова, предполагая его дальнейшее сокращение при сохранении нынешней практики. Хотя модели столкнулись с трудностями из-за ограниченной изменчивости исторических данных, они, тем не менее, подчёрки-

вают важность постоянного мониторинга и интеграции более детальных данных для повышения точности прогнозирования. Такое прогнозирование имеет решающее значение для разработки эффективных стратегий управления окружающей средой, которые могут смягчить последствия опустынивания и способствовать повышению устойчивости пострадавших сообществ.

Реализация инициатив по посадке деревьев становится жизненно важной стратегией в борьбе с опустыниванием. Восстанавливая растительный покров, эти усилия могут улучшить состояние почвы, повысить водоотдачу и способствовать сохранению биоразнообразия. Успех крупномасштабных кампаний по посадке деревьев, подобных амбициозным усилиям Азербайджана, демонстрирует потенциал позитивных экологических изменений при вовлечении и поддержке сообществ. Однако для обеспечения долгосрочной устойчивости этих инициатив необходимо уделять первоочередное внимание восстановлению существующих экосистем.

Помимо лесовосстановления перспективным направлением борьбы с изменением климата и стимулирования экономического роста является внедрение механизмов ценообразования на углерод, включая налоги на углерод и системы торговли квотами на выбросы (ETS). В частности, OECD (*англ*. Organisation for Economic Co-operation and Development) предлагает гибкий и рыночный подход, который стимулирует компании к сокращению выбросов и инвестированию в устойчивые практики. Позволяя торговать квотами на выбросы, ETS создаёт финансовое вознаграждение для предприятий, которые превышают свои целевые показатели по сокращению выбросов, тем самым поощряя инновации и эффективность.

Однако к реализации этих экономических стратегий следует подходить с осторожностью. Налоги на выбросы углерода, хотя и являются простыми, могут непропорционально сильно повлиять на потребителей с низким уровнем дохода и не могут напрямую стимулировать сокращение выбросов. Сбалансированный подход, сочетающий сильные стороны обоих механизмов ценообразования на углерод, может стать более комплексным решением, позволяющим использовать определённость налоговых поступлений для финансирования экологических проектов и одновременно использовать рыночные стимулы ETS.

ЛИТЕРАТУРА

Азербайджан 2030: национальные приоритеты социально-экономического развития // notemlaw.com/news-ru/. 2021. https://notemlaw.com/news-ru/244-podpisan-ukaz-ob-utverzhdenii-azerbaydzhan-2030-nacionalnye-prioritety-socialno-ekonomicheskogo-razvitiya.html.

Мамедов Р. М., *Исматова Х. Р.*, *Джафарова Н. Р.* Комплексная методика составления карт процессов опустынивания Апшеронского полуострова на основе космических снимков // Международный научный журнал. 2016. № 3. С. 65–76.https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21580103.2019.1667880

Akhundov K. Azerbaijan embraces carbon credits // Caliber. 2023. https://caliber.az/en/post/azerbaijan-embraces-carbon-credits.

Aliyev R. Zh. On the ecological status of the Absheron Peninsula // J. Gynecology and Women's Health. 2018. 3 p. https://juniperpublishers.com/jgwh/pdf/JGWH.MS.ID.555844.pdf

Feng K., *Wang T.*, *Liu S. et al.* Monitoring Desertification Using Machine-Learning Techniques with Multiple Indicators Derived from MODIS Images in Mu Us Sandy Land, China // Remote Sensing. 2022. V. 14. Iss. 11. Article 2663. https://doi.org/10.3390/rs14112663.

Guest Authors. Why is carbon pricing in some countries more successful than in others? // https://ourworldindata.org/. 2018. https://ourworldindata.org/carbon-pricing-popular.

Hummadi A. H., *Khalaf A. A.* Temporal and spatial variation of agricultural drought and desertification using spectral indices in Salah Al-Din Governorate // Tikrit J. Agricultural Sciences. 2024. Iss. 1. No. 1. https://doi.org/10.25130/tjas.24.1.17.

Kadıoğlu M., *Yılmaz A.* Analyzing the relationship between desertification and climate change in Turkey: A case study of the Central Anatolia region // Environmental Science and Pollution Research. 2019. V. 26. Iss. 10. P. 10040–10052. https://doi.org/10.1080/21580103.2019.1667880.

Kosmas C., *Kirkby M.*, *Geeson N.* The Medalus project Mediterranean desertification and land use: Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification. European Commission, 1999. 94 p. https://catalogue.unccd.int/629_Medalus_ESA_%20Manual.pdf.

Lee E. J., *Piao D.*, *Song C. et al.* Assessing environmentally sensitive land to desertification using MEDALUS method in Mongolia // Forest Science and Technology. 2019. V. 15. No. 4. P. 210–220. https://doi.org/10.1080/21580103.2019.1667880.

Mikayilov A., *Aliyev A.*, *Jafarzadeh S. et al.* A study on the desertification of Kura depression landscapes // J. Survey in Fisheries Sciences. 2023. V. 10(3S). P. 1374–1382. DOI:10.17762/sfs.v10i3S.568.

UNCCD. National report on desertification in Azerbaijan / United Nations Convention to Combat Desertification. 2022. https://www.unccd.int/country-profile-document/azerbaijan.

Yerimiz quruyur // Azerbaijan News. 11.07.2022. https://azerbaijan-news.az/az/posts/detail/yerimiz-quruyur-1655415779.

MODELING AND FORECASTING DESERTIFICATION IN THE ABSHERON PENINSULA USING SATELLITE IMAGERY AND TIME SERIES ANALYSIS

L. F. Bayramova

Russian Foreign Trade Academy, Moscow, Russia

Desertification is a major environmental issue, especially in arid regions such as the Absheron Peninsula. The area suffers from soil degradation, reduced water availability, and vegetation loss due to oil extraction and climate change. Based on Landsat-8 satellite data (2013–2024) and NDVI analysis, a slight negative trend in vegetation health was detected, confirmed by forecasting models. The findings highlight the need for continuous monitoring and the implementation of environmental strategies such as afforestation and carbon regulation.

Keywords: desertification, NDVI, Absheron peninsula, satellite data, forecasting, afforestation, climate resilience

Bayramova Leyla Faig Qizi — student, Leyla.f.bayramova@gmail.com

УДК 528.88 : 004.93 : 621.315.1 DOI: 10.21046/KMU-2025-31-43

СБОР И ОБРАБОТКА НАБОРА СНИМКОВ SENTINEL-2 ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ YOLO ВЫДЕЛЕНИЯ ПРОСЕК ПОД ЛЭП

Я. О. Бахрамхан [1], *Д. М. Ермаков* [2,4], *Е. С. Подольская* [1,3]

[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» Москва, Россия
[2] Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
3 Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А. С. Исаева РАН Москва, Россия
[4] Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Россия

В таёжной зоне Восточной Сибири зарастание просек под линиями электропередач (ЛЭП) древесной растительностью приводит как к авариям на высоковольтных линиях, так и к лесным пожарам, возникающим при контакте линий электропередач с сухой растительностью. Для поддержания просек в надлежащем состоянии необходимо проводить регулярные наземные осмотры, однако в Восточной Сибири, где плотность населения и дорожной сети крайне низкая, такой мониторинг только усложняется. В качестве альтернативы предлагается дистанционный мониторинг просек под ЛЭП, основанный на свёрточной нейронной сети YOLO (*англ*. You Only Look Once). Нейросетевой алгоритм в такой системе выделяет границы просек, поэтому для обучения нейросети необходимо составить набор данных, включающий в себя вручную размеченные маски просек под ЛЭП. Для этого проведён цикл операций — от автоматического сбора данных Sentinel-2 на территорию Мотыгинского района (Красноярский край) из платформы Google Earth Engine до применения методов аугментации изображений. Итоговый набор данных составляет 1808 изображений обучающей выборки и 448 изображений тестовой выборки. Созданный набор снимков обладает следующими недостатками: «утечка данных» из-за использования производных от исходных снимков валидационной выборки аугментированных снимков в обучающей выборке; отсутствие некоторых классов, которые встречаются в Мотыгинском районе, и дефицит участков изгибов и разветвлений просек. В качестве улучшения набора данных рассматривается сбор снимков на территории за пределами района исследования, создание новых классов и дополнительный учёт участков разветвлений просек.

Ключевые слова: просека, ЛЭП, YOLO, сегментация, аугментация, ручная разметка

ВВЕДЕНИЕ

Объекты энергетической инфраструктуры требуют регулярного контроля состояния для бесперебойной подачи электроэнергии потребителям. Нужно не только следить за состоянием линий электропередач (ЛЭП), но и за расположенными под ними просеками. Зарастание просек под ЛЭП является серьёзной проблемой: контакт элементов ЛЭП с сухой растительностью приводит не только к замыканиям в сети, но и к лесным пожарам. Для контроля состояния просек под ЛЭП проводятся периодические наземные обследования, однако они часто сопряжены с логистическими сложностями на территориях с разреженной сетью дорог и населённых пунктов, поэтому задача дистанционного мониторинга объектов энергоинфраструктуры становится более актуальной.

Бахрамхан Яна Ожурхановна — студентка, ybahramhan@gmail.com
Ермаков Дмитрий Михайлович — заведующий отделом ИКИ РАН, доктор физико-математических наук, d.m.ermakov@cosmos.ru
Подольская Екатерина Сергеевна — ведущий научный сотрудник ЦЭПЛ РАН, кандидат технических наук, podols_kate@mail.ru

Система дистанционного мониторинга просек под ЛЭП должна включать в себя геоинформационную систему, которая собирает пространственные данные в единый пользовательский интерфейс, модель детектирования границ просек под ЛЭП и алгоритм для поиска участков зарастания (Бахрамхан и др., 2025а). Если при создании модели детектирования границ использовать нейросетевой подход, для процедуры обучения нужно собрать набор данных в несколько тысяч изображений. Однако в открытом доступе существует мало научных публикаций, которые акцентируют внимание на выделении объектов энергетической инфраструктуры с помощью нейросетей и, в частности, на создании набора снимков для обучения этих алгоритмов.

Среди исследований по формированию обучающего набора изображений выделяется работа (Cano-Solis et al., 2023a), в которой описан процесс создания массива снимков с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для выделения ЛЭП. Полученные данные были размечены по трём классам — фон, растительность и ЛЭП. Авторы получили 65 852 пар изображений и масок, но набор данных был значительно сокращён до 532 пар из-за преобладания фона и отсутствия класса ЛЭП практически на всех снимках. Для увеличения набора данных применена аугментация изображений — создано 3724 пары с использованием геометрических трансформаций и 3192 пары с использованием цветовых преобразований изображений. Как отметили исследователи, набор данных охватывал только около 2,4 км линий электропередач, и поэтому обученная на его основе нейронная сеть обладала низкой обобщающей способностью.

В работе, где созданный набор данных был применён для обучения (Cano-Solis et al, 2023b), была разработана ансамблевая архитектура VEPL-Net на основе свёрточной нейросети U-Net (с энкодером VGG-16) и DeepLabV3; U-Net (Ronneberger et al., 2015) отделяет растительность от фона, а DeepLabV3 (Chen et al., 2017) — ЛЭП от фона, и результат пересечения двух полученных масок выдаёт зоны зарастания. Из-за крайне низкой доли пикселей, которые относятся к ЛЭП, авторам пришлось обучить две независимые модели для отделения растительности и линий электропередач отдельно. Однако это не решило проблему — метрика IoU (*англ*. Intersection over Union) показала низкие значения для ЛЭП (0,25–0,6).

Авторы статьи (Abdelfattah et al., 2020) создали открытый набор данных для выделения ЛЭП и их пилонов разных видов, снятых с БПЛА. В процессе съёмки территории было получено 1100 изображений. Определены следующие классы для разметки: высоковольтные линии, пилоны ЛЭП трёх типов и класс void для плохо различимых объектов, всего размечено 8987 объектов в формате COCO (*англ*. Common objects in context) (Lin et al., 2014). Стоит отметить, что аугментация не была применена к набору данных. Возможно, из-за этого результаты обучения нейросетевого алгоритма Yolact (Bolya et al., 2019) оказались не вполне удовлетворительными — показатель Average Precision с порогом IoU 0,5 для ограничивающих прямоугольников достиг 46,72 %, а с порогом IoU 0,75 для масок сегментации — 13,64 %. Нередко модель совершала ошибки при отделении пилонов ЛЭП от высоковольтных линий из-за схожих линейных форм частей пилонов и линий, а также из-за цвета. Наконец, линейные объекты часто пересекают и перекрывают друг друга на изображениях, поэтому алгоритм фильтрации масок одного и того же объекта по уверенности предсказания может удалять истинно положительные метки. Отмечено, что до 49 % объектов на изображениях пересекаются более чем по 30 % их площади.

Нефте- и газопроводы относятся, как и ЛЭП, к линейным объектам. Более того, нефте- и газопроводы в лесной местности расположены на просеках с травянистой растительностью, что делает данные объекты схожими с просеками под ЛЭП. В рамках исследования (Dasenbrock et al., 2021) создан набор данных

Landsat-5 размером 324 пары космических изображений и масок для обучения и 33 пары для тестирования. Помимо каналов видимого диапазона в обучении были использованы ближний инфракрасный и коротковолновый инфракрасный каналы. Аугментация данных проводилась во время обучения модели U-Net, при этом объём массива снимков всё ещё оставался низким, что было серьёзной проблемой. Более того, ширина просек под трубопроводами составляет 1–2 пикселя на изображениях Landsat, и поэтому их сегментация только усложняется. Как следствие, результат обучения нейросети оказался низким: IoU достиг 0,56±0,04 на тестовой выборке. Алгоритм в особенности пропускает просеки, которые слабо контрастируют с фоном.

Таким образом, наиболее распространёнными недостатками наборов данных для выделения линейных объектов, включая просеки под ЛЭП, являются:

- узкая и вытянутая форма линейных объектов, которая может легко «схлопываться» при применении свёртки нейросети;
- частичное перекрытие линейных объектов на изображениях со спутника;
- низкая контрастность линейных объектов, из-за которой линии становятся трудноразличимыми от остальных объектов на снимках.

Настоящее исследование описывает процесс получения набора данных Sentinel-2 для обучения нейронной сети YOLO выделения просек под ЛЭП. Опыт создания массивов данных для обучения алгоритмов выделения объектов энергетической инфраструктуры описан в текущем разделе. В методологии рассматривается процесс подготовки массива снимков от их автоматического сбора через платформу Google Earth Engine до выборов методов аугментации и их применения с учётом недостатков предыдущих методик создания наборов данных. Полученные результаты изложены в последней части исследования.

МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ НАБОРА ДАННЫХ SENTINEL-2 ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТИ YOLO ВЫДЕЛЕНИЯ ПРОСЕК ПОД ЛЭП

В качестве территории для сбора снимков выбран Мотыгинский район Красноярского края, плотность населения и дорожной сети которого довольно низкая, что делает задачу дистанционного мониторинга на такой территории актуальной. Для формирования массива выбраны снимки спутника Sentinel-2, преимуществом которых является высокое пространственное разрешение (10 м) среди открытых данных дистанционного зондирования — это позволяет с более высокой точностью выделить границы просек под ЛЭП. Полигон Мотыгинского района был разбит на квадратную сетку со стороной ячеек, равной 2560 м, чтобы получить изображения размером 256×256 пикселей. Всего сформировано несколько тысяч ячеек, но собрать необходимо несколько сотен изображений, поэтому среди ячеек выбраны те, которые входят в изображённый на рис. 1 прямоугольный полигон сбора данных. В данном полигоне разнообразие объектов довольно высоко — помимо просек под ЛЭП здесь расположены немногочисленные населённые пункты, карьеры горно-обогатительного комбината, участок реки и другие объекты. Всего из полигона отобрано 600 ячеек.

Для итеративного сбора снимков на отобранные ячейки был написан код на языке Python, который отбирает для каждой ячейки снимки Sentinel-2 из общего набора данных спутника из платформы Google Earth Engine. Для сбора данных проводилась фильтрация по времени получения снимка — июнь – июль 2024 г., по проценту облачности — меньше 5 % и по каналам — синий, зелёный, красный, ближний инфракрасный и коротковолновый инфракрасный. С учётом фильтрации собран 561 снимок.

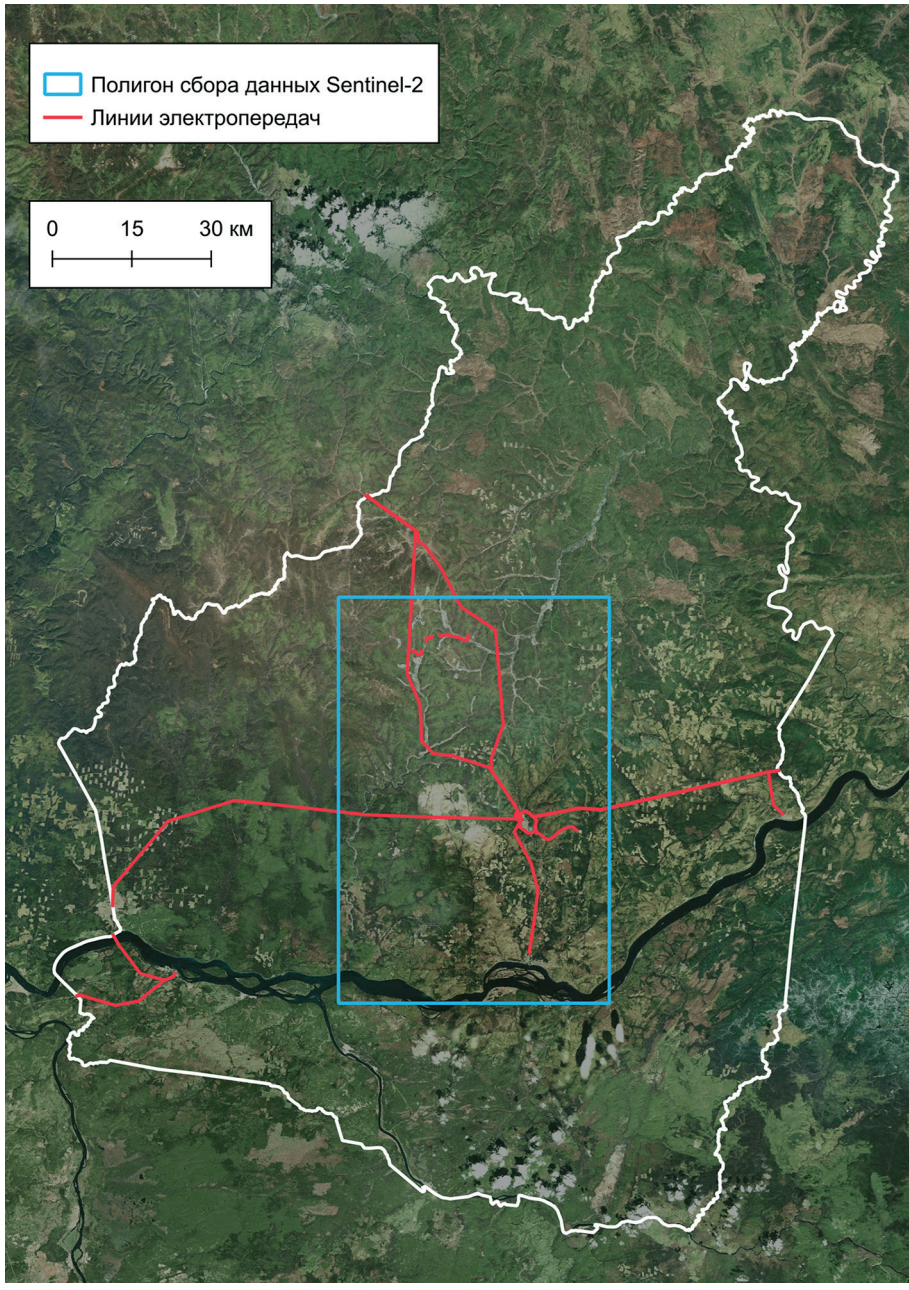


Рис. 1. Карта полигона сбора данных Sentinel-2

Следующим шагом проведён визуальный анализ нескольких снимков для определения классов. Бинарная классификация с классами «просека под ЛЭП» и «фон» не подходит для настоящей задачи, поскольку просеки под ЛЭП встречаются довольно редко и в класс фона попадают разнообразные по спектральной яркости и форме границ объекты. Более того, яркость объектов меняется от одного канала к другому, что только усложняет сегментацию. Чтобы модель YOLO

смогла корректно отделять одни объекты от других, было решено разделять объекты на изображениях по восьми наиболее распространённым в Мотыгинском районе классам:

- просека под ЛЭП;
- хвойные леса;
- широколиственные леса;
- низкорослая растительность;
- водные объекты;
- антропогенные объекты;
- облака;
- тени от облаков.

Разнообразие спектральных каналов Sentinel-2 позволяет успешно разделять классы. К примеру, хвойные и широколиственные леса имеют практически идентичный спектральный отклик в видимом диапазоне, однако в ближнем инфракрасном канале они значительно отличаются — яркость широколиственных лесов выше яркости хвойных (Бахрамхан и др., 2025в). Водные объекты обладают низкими значениями яркости во всех каналах. Облака, наоборот, являются самыми яркими объектами во всём спектральном профиле. В свою очередь, просека под ЛЭП выделяется повышенной спектральной яркостью в коротковолновом инфракрасном канале (Бахрамхан и др., 2024). Помимо спектральных характеристик, классы отличаются друг от друга формами границ. У классов растительности геометрия, как правило, нерегулярная, как и у классов облаков, теней от облаков, водных и антропогенных объектов. Наоборот, просека под линиями электропередач отличается примитивной линейной формой (рис. 2*д*), реже — с изгибами и разветвлениями (рис. 2*б*, *г*).

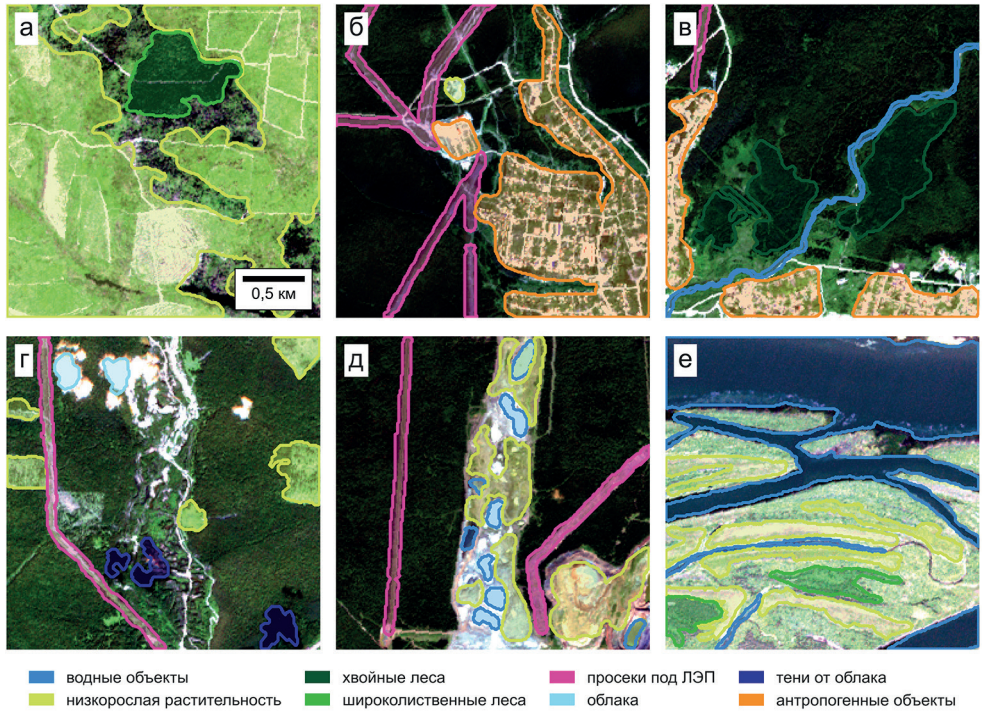


Рис. 2. Примеры размеченных снимков Sentinel-2

Разметка объектов по восьми классам проводилась в DigitalSreeni Image Annotator (Computer software). Разметка была сохранена в стиле аннотаций YOLO в текстовом файле, причём аннотации записывались в разные текстовые файлы в зависимости от того, на каком канале проводилась разметка объектов. Для объединения аннотаций разных каналов одного изображения был написан код на Python. Всего размечено 448 изображений. Примеры снимков в естественных цветах и их разметок приведены на рис. 2.

В наборе данных наблюдается значительный дисбаланс классов. Так, классы лесов встречаются практически на каждом изображении, в то время как класс антропогенных объектов (см. рис. 2*б*, *в*) присутствует только в малочисленных населённых пунктах. Помимо перечисленных классов в качестве редких еще определены «водные объекты».

Ожидается, что набор данных Sentinel-2 будет использован для обучения модели YOLO (https://github.com/ultralytics/ultralytics), у которой есть ограничения по числу принимаемых каналов. Нейросеть принимает на вход не более трёх каналов, в то время как в размеченном наборе данных у каждого снимка есть пять каналов. Ещё необходимо учитывать, что YOLO была предварительно обучена на массиве данных COCO (Lin et al., 2014), содержащем RGB-изображения, и обучение на каналах за пределами видимого спектра может привести к значительным ошибкам в классификации объектов. Тем не менее, трансферное обучение позволяет адаптировать веса модели под отличные от синего, зелёного и красного входные каналы данных. Поэтому помимо красного канала были выбраны для обучения ближний инфракрасный и коротковолновый инфракрасный каналы, в которых объекты разных классов заметно различаются друг от друга. Так, красный канал хорошо выделяет свободную от растительности почву (Chen et al., 2019; Rukhovich et al., 2022) — этот канал важен при выделении участков низкорослой растительности, где может наблюдаться открытая почва. Ближний инфракрасный канал отделяет разные типы растительности не только по высоте, но и по древесным породам (Huete et al., 1997; Immitzer et al., 2019; Kupidura, Lesisz, 2022), поэтому этот канал предоставляет необходимую информацию для выделения всех классов, принадлежащих к растительности. Также в этом канале тени от облаков сильно контрастируют с окружающими объектами из-за меньшего рассеивания света (Zhai et al., 2018; Zhu, Woodcock, 2012). Наконец, коротковолновый инфракрасный канал хорошо отделяет антропогенные объекты от остальных объектов (As-Syakur et al., 2012; Xu, 2008). Во всём полученном спектре водные объекты отличаются низкими значениями яркости, а облака — высокими. Стоит отметить, что просека под ЛЭП наиболее контрастна в последних двух каналах и особенно в коротковолновом инфракрасном (Бахрамхан и др., 2024). Ввиду того, что данные этого канала у спутника Sentinel-2 исходно имеют пространственное разрешение 20 м, и затем интерполированы на 10 м, узкие объекты, такие как просека, в нём оказываются шире. Это способствует лучшему выделению небольших по одному из измерений объектов, с чем трудно работать YOLO.

Из отобранных с помощью Google Earth Engine снимков в формате *.tif были извлечены три выбранных канала, по ним бы осуществлён синтез изображения в псевдоцветах, записанного в формате *.jpg. На рис. 3 приведены примеры снимков в синтезе Red-NIR-SWIR.

Созданный набор состоит из нескольких сотен изображений, при этом для обучения свёрточных нейронных сетей рекомендуется составить массив из порядка тысяч изображений, чтобы нейросети смогли достаточно хорошо развить зрительные навыки и обобщать изображения (Golestaneh et al., 2024). Для решения этой проблемы применяется аугментация изображений, которая позволяет не только нарастить набор данных, но и повысить разнообразие снимков (Oubara et al., 2022) для избежания переобучения.

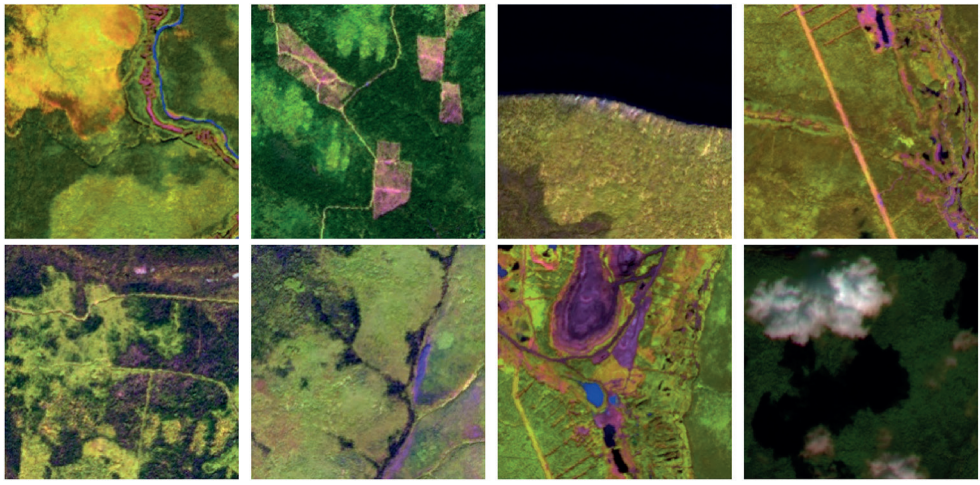


Рис. 3. Примеры снимков в синтезе красный – ближний инфракрасный – коротковолновый инфракрасный

Среди основных методов аугментации выделяются следующие:

- геометрические трансформации (поворот, горизонтальное и вертикальное зеркальное отражение, сдвиг, масштабирование и др.);
- цветовые трансформации (изменение яркости, контрастности, насыщенности и др.);
- применение фильтров (гауссово размытие и др.);
- композиционные методы (Mixup, CutMix, мозаика и др.) и др.

Важно, чтобы применённые методы трансформации изображений не исказили снимки до такого состояния, при котором те теряют реалистичность. Так, для космических снимков целесообразно применять изменение оттенка, но с заданными границами этих изменений, иначе объекты на изображениях будут обладать некорректными спектральными характеристиками. Помимо яркостных трансформаций, геометрическая трансформация, например, переворот и вращение, может сохранить реализм снимка (Yu et al., 2017). С другой стороны, композиционные методы могут снизить реалистичность изображения — в результате получится смешение разных участков территорий из разных снимков.

Аугментация массива синтезированных изображений Sentinel-2 проводилась с применением библиотеки Albumentations (Buslaev et al., 2020), которая предоставляет легко настраиваемые функции для трансформаций снимков. Среди доступных в библиотеке методов выбраны следующие:

- поворот до ±30° с вероятностью применения 0,3;
- горизонтальное и вертикальное зеркальное отражение с вероятностью 0,5;
- случайное изменение яркости и контраста до ±0,2 с вероятностью 0,5;
- случайное изменение оттенка до ±10, насыщенности и яркости с вероятностью 0,5;
- размытие с размером ядра 5 пикселей и вероятностью 0,3;
- аффинное преобразование (одновременный поворот и масштабирование) с сохранением соотношения ширины и высоты снимка, масштабированием в пределах от 0,7 до 1,3 и вероятностью 0,5;
- транспонирование с вероятностью 0,2;

- преобразование D4 (случайный поворот на угол, кратный 90°, либо зеркальное отражение по горизонтали/вертикали, либо транспонирование, либо отсутствие изменений) с вероятностью 0,2;
- морфологическая операция эрозии с размером структурного элемента от 3 до 5 и вероятностью применения 0,2.

Если случайно выбрано несколько методов аугментации, то они применяются последовательно. Геометрические трансформации изображений позволяют создать новые формы исходных объектов, а цветовые преобразования — изменить яркость пикселей, в результате чего нейросеть видит большее разнообразие данных, что предотвращает переобучение модели. Стоит отметить, что морфологическое преобразование эрозии увеличивает размер для мелких тёмных объектов, таких как речки, поэтому данный метод аналогично геометрическим методам способствует выделению не только больших, но и маленьких объектов. Разметка изображений в текстовом формате была аналогично трансформирована с помощью библиотеки. Всего создано 1808 пар снимков и их меток аугментированного массива. Примеры преобразованных изображений приведены на рис. 4.

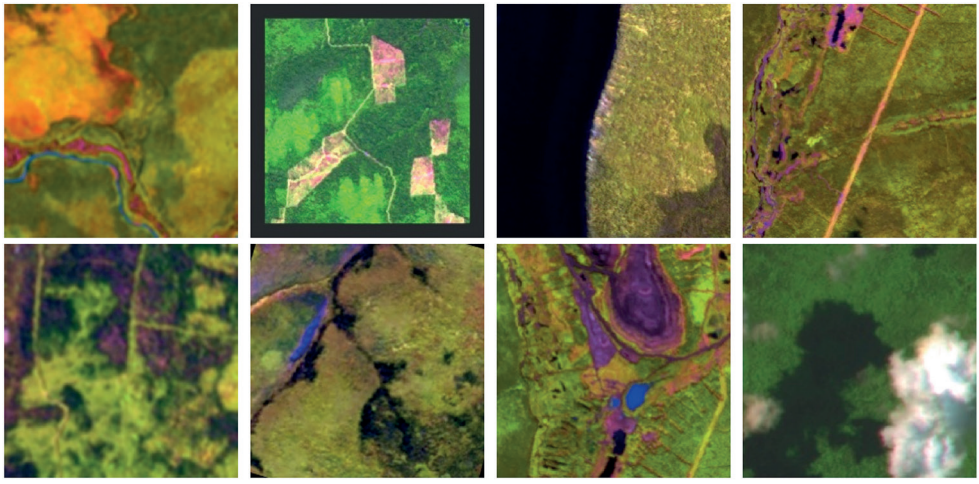


Рис. 4. Примеры изображений аугментированного массива

Трансформированные изображения необходимы исключительно для обучения нейронных сетей, и поэтому они не могут входить в валидационную выборку. Из-за ограниченного числа исходных снимков все трансформированные снимки были помещены в обучающую выборку, а все исходные — в валидационную. Таким образом, размер набора данных равен 1808 снимков в обучающей выборке и 448 — в валидационной.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Созданный набор данных Sentinel-2 для обучения нейросети YOLO для сегментации просек под ЛЭП обладает следующими преимуществами:

- приемлемый размер обучающей и валидационной выборки;
- отсутствие пересечений между размеченными объектами, что может привести к ошибкам в сегментации объектов;

- широкие аннотированные маски просек под ЛЭП в несколько единиц пикселей для избежания их «схлопывания» при свёртке;
- применение коротковолнового инфракрасного канала для выделения просек;
- широкое разнообразие классов в наборе данных, которое позволяет применить обученную на основе данного массива нейросеть для сегментации не только просек под линиями электропередач, но и для выделения других объектов.

Таким образом, при формировании данного массива снимков были учтены недостатки предыдущих исследований по созданию аналогичных наборов данных. В созданном в настоящем исследовании наборе данных Sentinel-2 были применены каналы инфракрасного спектра, которые используются довольно редко в работах по мониторингу объектов энергетической инфраструктуры по сравнению с каналами видимого спектра. Создание нескольких классов способствует более успешной сегментации просек, ведь многие объекты могут быть похожи на просеки под ЛЭП (например, вытянутые участки вырубок), и поэтому отнесение таких объектов к отличным от просек классам сокращает число ошибок классификации. Объём памяти, который занимает набор данных вместе с файлом конфигурации с названиями классов и их номерами, составляет около 116 МБ, поэтому набор данных является довольно компактным для хранения на локальном компьютере.

Однако у созданного массива снимков есть недостатки. Прежде всего, при обучении нейросетевого алгоритма возможна «утечка данных» из-за использования производных от исходных снимков валидационной выборки трансформированных снимков в обучающей выборке (Nalepa et al., 2019). Несмотря на применение множества методов трансформации, новые изображения остались довольно похожими на исходные (ср. рис. 3 и 4), и поэтому нейронная сеть может дать завышенный результат по метрикам качества классификации при сегментации.

Ещё одна проблема набора снимков — отсутствие классов, которые алгоритм не может успешно отделять от просек под ЛЭП из-за схожих спектральных и геометрических характеристик. К таким классам можно отнести дороги, которые в ходе тестирования обученной нейросети YOLO (Бахрамхан и др., 2025в) на снимках были выделены как просеки (рис. 5*а*).



а *б*

Рис. 5. Ошибки, полученные при тестировании обученной на наборе данных нейросети YOLO: *а* — дорога выделена как просека; *б* — участок разветвления просеки выделен фрагментарно (Бахрамхан и др., 2025в)

В наборе данных большинство просек обладает прямолинейной формой без изогнутостей и разветвлений. Как правило, прямолинейные участки просек под

ЛЭП находятся дальше от населённых пунктов и промышленных объектов и проходят преимущественно через лесную местность, в то время как разветвления просек приурочены к населённым пунктам, в которых находятся электрические подстанции. Учитывая, что плотность населения в Мотыгинском районе крайне низкая, на снимках из набора данных оказалось относительно мало участков разветвлений и изгибов просек. Аугментация массива изображений с просеками рассмотренными методами способна масштабировать или повернуть прямолинейную просеку на случайный угол, однако ни один из методов трансформации изображений не может искусственно изогнуть прямую линию. Дефицит таковых привёл к тому, что обученная нейронная сеть YOLO фрагментарно выделяет разветвления просек (см. рис. 5*б*), в то время как алгоритм успешно сегментирует прямолинейные участки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящего исследования создан набор данных для выделения просек под ЛЭП на снимках Sentinel-2 с помощью нейронной сети YOLO. Размер полученного набора составляет 1808 пар изображений и меток обучающей выборки и 448 пар снимков и меток тестовой выборки — объём данных позволяет обучить нейросеть и получить удовлетворительные результаты (Бахрамхан и др., 2025б). Уникальность данного массива снимков заключается в применении инфракрасных каналов, определении нескольких классов для более высокой точности сегментации просек под ЛЭП и применении открытых данных Sentinel-2 среднего разрешения для оперативного обновления информации о границах просек по сравнению с наземным обследованием.

Для исправления недостатков набора данных необходимо произвести дополнительный сбор снимков за пределами Мотыгинского района для увеличения числа исходных снимков. Это позволит повысить разнообразие данных и, как следствие, предотвратить переобучение модели и увеличить обобщающую способность нейросети. Обученную на расширенном наборе данных свёрточную нейронную сеть можно применить для выделения просек практически на любой лесистой территории, что упрощает применение такой методики. Необходимо акцентировать внимание на увеличении числа снимков с участками изгибов и ветвлений просек — для этого можно как разметить новые снимки с такими просеками на новые территории, так и применить аугментацию, которая создаёт больше трансформированных изображений для снимков с изогнутыми просеками. Исходя из того, что разветвления просек встречаются крайне редко, применение методов трансформации синтезированных снимков Sentinel-2 представляется более перспективным. Следует добавить класс дорог для предотвращения ложного определения просек под ЛЭП там, где фактически расположена дорога, и разметить их как для имеющихся, так и для новых данных.

Созданный в настоящем исследовании массив снимков Sentinel-2 может послужить основой для обучения нейронной сети YOLO сегментации просек под линиями электропередач. В свою очередь, обученный методом трансферного обучения нейросетевой алгоритм может стать частью системы дистанционного мониторинга объектов энергетической инфраструктуры, в которой нейросеть с высокой точностью и с низкими временными затратами выделяет просеку под ЛЭП.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИКИ РАН (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8) и государственного задания ЦЭПЛ РАН им. А. С. Исаева по теме «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (регистрационный номер НИОКТР 124013000750-1).

ЛИТЕРАТУРА

Бахрамхан Я. О., *Ермаков Д. М.*, *Подольская Е. С.* Опыт разработки алгоритма выделения лесных просек под линиями электропередач в лесных ландшафтах на основе данных Sentinel-2 // Материалы 22-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2024. С 156. https://doi.org/10.21046/22DZZconf-2024a.

Бахрамхан Я. О., *Ермаков Д. М.*, *Подольская Е. С.* (2025а) Плагин Open Source QGIS для реализации алгоритма распознавания лесных просек под ЛЭП // Материалы 9-й Всероссийской науч. конф. с международ. участием «Аэрокосм. методы и геоинформ. технологии в лесоведении, лесном хоз-ве и экологии»: 2025. С. 12–14.

Бахрамхан Я. О., *Ермаков Д. М.*, *Подольская Е. С.* (2025б) Сегментация лесных просек под ЛЭП на снимках Sentinel-2 с помощью нейронной сети YOLO // 22-я Конф. молодых учёных «Фундам. и приклад. косм. исслед.». 2025. С. 49.

Бахрамхан Я. О., *Ермаков Д. М.*, *Подольская Е. С.* (2025в) Создание набора снимков Sentinel-2 для обучения нейронной сети сегментации просек под ЛЭП // Материалы 13-й Международ. школы-семинара «Спутниковые методы и системы исслед. Земли». Таруса. 2025.

Abdelfattah R., *Wang X.*, *Wang S.* TTPLA: An aerial-image dataset for detection and segmentation of transmission towers and power lines // Proc. Asian Conference on Computer Vision. 2020. P. 601–618. http://openaccess.thecvf.com/content/ACCV2020/html/Abdelfattah_TTPLA_An_Aerial-Image_Dataset_for_Detection_and_Segmentation_of_Transmission_ACCV_2020_paper.html.

As-Syakur A. R., *Adnyana I. W. S.*, *Arthana I. W.*, *Nuarsa I. W.* Enhanced built-up and bareness index (EBBI) for mapping built-up and bare land in an urban area // Remote Sensing. 2012. V. 4(10). P. 2957–2970. https://doi.org/10.3390/rs4102957.

Bolya D., *Zhou C.*, *Xiao F.*, *Lee Y. J.* Yolact: Real-time instance segmentation // Proc. IEEE/CVF Intern. Conf. Computer Vision. 2019. P. 9157–9166. http://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2019/html/Bolya_YOLACT_Real-Time_Instance_Segmentation_ICCV_2019_paper.html.

Buslaev A., *Iglovikov V. I.*, *Khvedchenya E. et al.* Albumentations: Fast and Flexible Image Augmentations // Information. 2020. V. 11(2). Article 125. https://doi.org/10.3390/info11020125.

Cano-Solis M., *Ballesteros J. R.*, *Branch-Bedoya J. W.* (2023a) VEPL Dataset: A vegetation encroachment in power line corridors dataset for semantic segmentation of drone aerial orthomosaics // Data. 2023. V. 8(8). Article 128. DOI:10.3390/data8080128.

Cano-Solis M., *Ballesteros J. R.*, *Torres G. S.* (2023b) VEPL-Net: A Deep Learning Ensemble for Automatic Segmentation of Vegetation Encroachment in Power Line Corridors Using UAV Imagery // ISPRS Intern. J. Geo-Information. 2023. V. 12(11). Article 454. DOI:10.3390/ijgi12110454.

Chen L.-C., *Papandreou G.*, *Kokkinos I. et al.* DeepLab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017. V. 40(4). P. 834–848.

Chen X., *Guo Z.*, *Chen J. et al.* Replacing the red band with the red-SWIR band (0.74 ρ red + 0.26 ρ swir) can reduce the sensitivity of vegetation indices to soil background. Remote Sensing. 2019. V. 11(7). Article 851. https://doi.org/10.3390/rs11070851.

Dasenbrock J., *Pluta A.*, *Zech M.*, *Medjroubi W.* Detecting Pipeline Pathways in Landsat 5 Satellite Images with Deep Learning // Energies. 2021. V. 14(18). Article 5642. https://doi.org/10.3390/en14185642.

Golestaneh P., *Taheri M.*, *Lederer J.* How many samples are needed to train a deep neural network? // https://arxiv.org/. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.16696.

Huete A. R., *Liu H. Q.*, *Batchily K. V.*, *Van Leeuwen W.* A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS // Remote Sensing of Environment. 1997. V. 59(3). P. 440–451. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5.

Immitzer M., *Neuwirth M.*, *Böck S. et al.* Optimal input features for tree species classification in Central Europe based on multi-temporal Sentinel-2 data // Remote Sensing. 2019. V. 11(22). Article 2599. https://doi.org/10.3390/rs11222599.

Kupidura P., *Lesisz K.* The impact of the type and spatial resolution of a source image on the effectiveness of texture analysis // Remote Sensing. 2022. V. 15(1). Article 170. https://doi.org/10.3390/rs15010170.

Lin T.-Y., *Maire M.*, *Belongie S. J. et al.* Microsoft COCO: Common Objects in Context // European Conference on Computer Vision. 2014. 16 p. DOI:10.1007/978-3-319-10602-1_48.

Nalepa J., *Myller M.*, *Kawulok M.* Validating hyperspectral image segmentation // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2019. V. 16(8). P. 1264–1268. DOI: 10.1109/LGRS.2019.2895697.

Oubara A., *Wu F.*, *Amamra A.*, *Yang G.* Survey on Remote Sensing Data Augmentation: Advances, Challenges, and Future Perspectives // Advances in Computing Systems and Applications / eds. M. R. Senouci, S. Y. Boulahia, M. A. Benatia. 2022. V. 513. P. 95–104. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12097-8_9.

Ronneberger O., *Fischer P.*, *Brox T.* U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention — MICCAI 2015 / eds. N. Navab, J. Hornegger, W. M. Wells, A. F. Frangi. 2015. V. 9351. P. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28.

Rukhovich D. I., *Koroleva P. V.*, *Rukhovich D. D.*, *Rukhovich A. D.* Recognition of the bare soil using deep machine learning methods to create maps of arable soil degradation based on the analysis of multi-temporal remote sensing data // Remote Sensing. 2022. V. 14(9). Article 2224. DOI:10.3390/rs14092224.

Xu H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. // Intern. J. Remote Sensing. 2008. V. 29(14). P. 4269–4276. https://doi.org/10.1080/01431160802039957.

Yu X., *Wu X.*, *Luo C.*, *Ren P.* Deep learning in remote sensing scene classification: A data augmentation enhanced convolutional neural network framework // GIScience and Remote Sensing. 2017. V. 54(5). P. 741–758. https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1323377.

Zhai H., *Zhang H.*, *Zhang L.*, *Li P.* Cloud/shadow detection based on spectral indices for multi/hyperspectral optical remote sensing imagery // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. V. 144. P. 235–253. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.006.

Zhu Z., *Woodcock C. E.* Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 118. P. 83–94. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.028.

COLLECTION AND PROCESSING OF SENTINEL-2 IMAGE SET FOR TRAINING OF YOLO NEURAL NETWORK FOR POWER LINE CLEARINGS DETECTION

Y. O. Bakhramkhan [1], ***D. M. Ermakov*** [2, 4], ***E. S. Podolskaia*** [1, 3]

[1] **Higher School of Economics National Research University (HSE University), Moscow, Russia**
[2] **Space Research Institute RAS, Moscow, Russia**
[3] **Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity RAS (CEPF), Moscow, Russia**
[4] **Kotel'nikov Institute of Radio-engineering and Electronics RAS, Fryazino branch Fryazino, Russia**

In the taiga zone of Eastern Siberia, overgrowth of tree vegetation under power lines (PL) leads to both accidents on high-voltage lines and forest fires caused by the contact of power lines with dry vegetation. Regular ground inspections are necessary to maintain the clearings in proper condition, but in Eastern Siberia, where the density of population and road network is extremely low, such monitoring only becomes more difficult. As an alternative, remote monitoring of PL clearings based on a convolutional neural network YOLO (You Only Look Once) is proposed. The neural network

algorithm in such a system highlights the boundaries of clearings, so for training the neural network it is necessary to collect a dataset including manually marked masks of clearings under power lines. For this purpose, a cycle of operations from automatic Sentinel-2 data collection for the territory of the Motyginsky district (Krasnoyarsk region) from the Google Earth Engine platform to the application of image augmentation methods was performed. The final dataset consists of 1808 images of training sample and 448 images of validation sample. The created set of images has the following drawbacks: "data leakage" due to the use of augmented images derived from the original validation sample images in the training sample; lack of some classes that occur in the Motyginskiy district and shortage of bend and branching sections of PL clearings. Collecting imagery from outside the study area, creating new classes, and taking more account of the branching areas of the clearings are being considered as improvements to the dataset.

Keywords: clearings, power lines, YOLO, segmentation, augmentation, manual labeling

Bakhramkhan Yana Ozhurkhanovna — student, ybahramhan@gmail.com
Ermakov Dmitry Mikhaylovich — head of the department IKI RAS, doctor of physical and mathematical sciences, d.m.ermakov@cosmos.ru
Podolskaia Ekaterina Sergeevna — lead researcher CEPF RAS, candidate of engineering sciences, podols_kate@mail.ru

УДК 629.3.02 DOI: 10.21046/KMU-2025-44-57

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПЛАНЕТОХОДА «ОСТАВЛЯЮЩИЙ СЛЕД ОС-8»

М. И. Баширов [1], ***Д. А. Морозов*** [1], ***А. И. Мигранов*** [1], ***А. К. Хисматуллин*** [2]

[1] **Гимназия № 39 им. А. Ш. Файзуллина, Уфа, Россия**
[2] **Физико-математический лицей № 93, Уфа, Россия**

Разработана конструкция прототипа Универсального исследовательского планетохода «Оставляющий след ОС-8». Рассмотрены проблемы эксплуатации планетоходов, объекты исследования и аппаратура для функционирования планетохода и проведения исследований. Изучены существующие технические решения. Разработаны адаптивные колёса с бескамерными шинами изменяемой жёсткости. Подобран состав материалов корпуса. Предложен необходимый комплекс научной аппаратуры. Также с помощью 3D-моделирования в системе автоматизированного проектирования «Компас-3D» спроектированы конструкторско-технологические макеты, изготовленные в масштабе 1:9,31 с использованием аддитивных технологий и технологий лазерной резки. Создана автоматическая и дистанционная системы управления конструкторско-технологических макетов на языках программирования Arduino и Python. Проведены успешные испытания конструкторско-технологических макетов.

Ключевые слова: планетоход, экзопланета, исследования планет, универсальность конструкции, модульность, адаптивные колёса, бескамерные шины, торсионная подвеска, композитные материалы, грунтозаборное устройство

ВВЕДЕНИЕ

В России представлена концепция изучения Луны в рамках «Российской лунной программы» тремя типами луноходов различного класса: тяжёлый – «Робот-геолог», средний – «Геолог-разведчик» и лёгкий – «Робот-геофизик» (Маров, 2023; Marov, Slyuta, 2021; Vasiliev et al., 2017). Луноход тяжёлого класса будет иметь радиус действия до 500 км, оснащён научной аппаратурой для различных исследований Луны, в том числе буровой установкой. Концепция использования трёх типов планетоходов актуальна и для исследований других твёрдых тел в космическом пространстве. В настоящей работе предлагается конструкция универсального исследовательского планетохода тяжёлого класса с возможностью масштабирования в другие классы для применения в рамках российских лунной, марсианской и других программ по исследованию планет, их спутников, астероидов и комет, а также для применения на Земле.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Цель работы

Цель работы – проектирование прототипа Универсального исследовательского планетохода «Оставляющий след ОС-8» (УИП ОС-8) для исследования планет, спутников, карликовых планет, астероидов и комет Солнечной системы и экзопланет за её пределами. При проектировании учитывались различные условия на исследуемых небесных телах, поскольку точная информация о них может от-

Баширов Марат Ильдарович — ученик 10-го класса, MaratBashirov8@yandex.ru
Морозов Дмитрий Александрович — ученик 10-го класса, morozovdmitrymorozov@yandex.ru
Мигранов Аскар Ильфакович — ученик 10-го класса, kolkigolki@gmail.com
Хисматуллин Артур Камилевич — ученик 10-го класса, arturkhisma0808@gmail.com

сутствовать, а также ставилась цель универсализации планетохода. Учитывались следующие проблемы: проходимость, устойчивость на наклонной поверхности, компактность при транспортировке, энергообеспечение, надёжность и масса. В ходе работы были спроектированы и изготовлены конструкторско-технологические макеты (КТМ) для демонстрации и испытаний основных конструкторских решений и технологий, применённых в УИП ОС-8.

Анализ существующих решений

В качестве прототипов были взяты марсоходы NASA Curiosity и Perseverance, вездеход ДТ-30 «Витязь» и советский планетоход «Луноход-1». Изучены существующие технические решения и современные материалы.

Анализ подвесок планетоходов

Проведён анализ систем подвески планетоходов. Основные виды существующих подвесок:

1) Rocker-bogie — подвеска без использования упругих элементов, использующаяся на большинстве современных планетоходах, основана на двух симметричных независимых «коромыслах» по три колеса, два из которых соединены в независимый блок — «тележку»;
2) рычажная независимая;
3) торсионная, основана на упругих стержнях, работающих на кручение, использовалась в советских планетоходах «Луноход-1», «Луноход-2», «Луноход-3»;
4) колёсно-шагающая;
5) гусенично-шагающая;
6) гусеничная;
7) подвески с амортизаторами и др.

В ходе анализа выявлено, что Rocker-bogie плохо сглаживает мелкие неровности поверхности и не даёт достаточной амортизации. Рычажная независимая подвеска и подвески с амортизаторами являются сложными и недостаточно надёжными системами. Колёсно-шагающая подвеска имеет свои преимущества при исследовании малых площадей, например пещер, однако не выгодна на больших дистанциях из-за малой скорости и сложности. Гусенично-шагающая и гусеничная подвеска обладают большой массой, малой скоростью и большой энергозатратностью. Торсионная подвеска является независимой. При герметичном нахождении внутри корпуса и относительно малой скорости планетохода она будет надёжной системой с простым принципом действия и малой массой, обеспечивающей достаточную амортизацию и плавность хода. В совокупности с двухмодульной конструкцией планетохода она обеспечит постоянный контакт колёс с поверхностью.

Анализ колёс планетоходов

Одной из основных проблем планетоходов является застревание в сыпучих и топких грунтах. Устранить эту проблему могло бы колесо с большой площадью контакта с поверхностью, однако оно будет потреблять много электроэнергии на твёрдых грунтах, а жёсткие конструкции не способны изменять крутящий момент, что улучшило бы проходимость и экономию электроэнергии. Были проанализированы различные конструкции колёс, такие как:

1) жёсткие конструкции, аналогичные марсоходам NASA и большинству других планетоходов;
2) каркасные сеточные конструкции, например, как у планетохода «Луноход-1»;

3) с бескамерными резиновыми шинами;
4) с бескамерными «гипердеформируемыми» шинами (https://venturi.space/en/wheel), аналогично луноходу FLEX (*англ.* Flexible Logistics and Exploration);
5) с бескамерными суперэластичными нитиноловыми шинами LEW-TOPS-99 (Fidahusain, 2018; Padula et al., 2019a, b);
6) с безвоздушными шинами с механической регулировкой жёсткости (Михеев и др., 2016);
7) колёса повышенной проходимости (Семенов, 1975);
8) колёса с изменяемым диаметром (Заселяев, 2021).

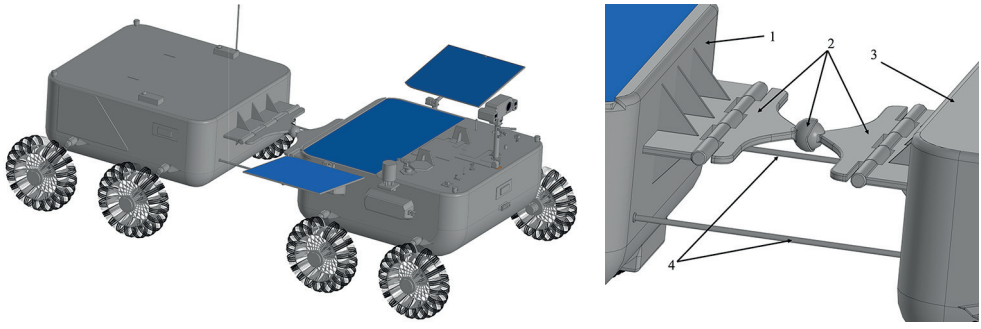
Жёсткие конструкции колёс подвержены повреждениям и сильному износу от острых камней. Каркасные сеточные конструкции также подвержены деформациям, повреждениям и увязыванию в мелком сыпучем и топком грунте. Бескамерные резиновые шины не предназначены для жёстких условий эксплуатации в космическом пространстве. Бескамерные гипердеформируемые шины (https://venturi.space/en/wheel/) и суперэластичные нитиноловые шины LEW-TOPS-99 существенно снижают вибрации, компенсируют мелкие неровности и способны передвигаться по острым камням. Однако их эластичность не предназначена для езды на относительно большой скорости, на некоторых типах поверхности могут терять электроэнергию. Безвоздушные шины с механической регулировкой жёсткости (Михеев и др., 2016) позволяют изменять жёсткость, однако от неё будет зависеть площадь контакта с поверхностью. Колесо повышенной проходимости (Семенов, 1975) позволяет существенно изменять площадь контакта, однако у него есть проблемы с малым диаметром. Колесо с изменяемым диаметром (Заселяев, 2021) способно к малым изменениям площади контакта.

Были проанализированы существующие проблемы проходимости и технические решения, на основе которых предложена конструкция адаптивного колеса с бескамерными шинами изменяемой жёсткости.

Конструкция

Модульность

Одной из основных отличительных черт УИП ОС-8 является модульность. Она обеспечивается двумя независимыми модулями, соединёнными сцепкой. Сцепка является системой шарниров и тросов, дающей возможность модулям быть крепко соединёнными, но при этом обеспечивающей три степени свободы.



а *б*

Рис. 1. Конструкция УИП ОС-8: *а* — общий вид; *б* — сцепка.
1 — передний модуль, 2 — система шарниров, 3 — задний модуль, 4 — тросы

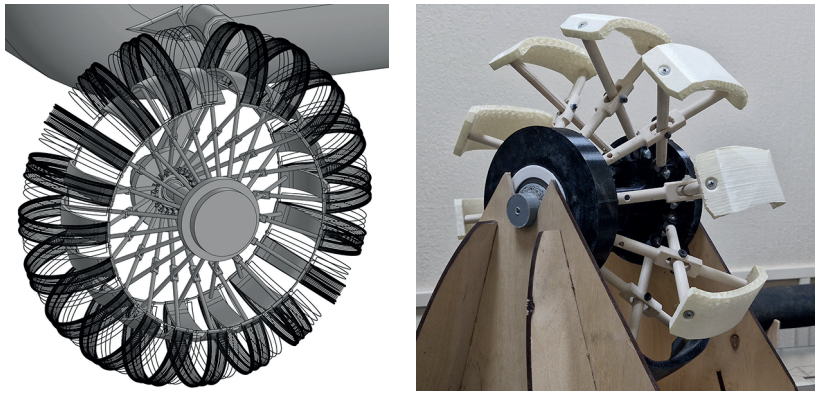
Модульность и широкий корпус гарантируют устойчивость к переворачиванию, а также компактность за счёт складывания модулей «крышка к крышке» при транспортировке. В транспортном положении модули сложены друг на друга, а после посадки на планету и во время спуска с посадочной платформы они раскладываются. Это происходит за счёт одновременного втягивания в корпус двух тросов и нахождения под углом к горизонту при съезде с посадочной платформы. В переднем модуле находится грунтозаборное устройство (ГЗУ), мачта дистанционного зондирования поверхности, научная аппаратура для дистанционных исследований, пылевой и метеорологический комплексы, бортовой компьютер, вспомогательные солнечные батареи и аккумуляторы. В заднем модуле находится радиоизотопный термоэлектрический генератор (РИТЭГ), манипуляторный комплекс, научная аппаратура для исследования образцов и состава атмосферы, комплекс хранения образцов. Конструкция УИП ОС-8 представлена на рис. 1.

Подвеска и колёсная база

Проходимость «Оставляющего след ОС-8» обеспечивается независимой поперечной торсионной подвеской и адаптивными колёсами с бескамерными шинами изменяемой жёсткости. Торсионная подвеска амортизирует неровности поверхности, её преимущества заключаются в простоте, надёжности при герметичном расположении торсионного вала в корпусе, плавности хода, малой массе. Используется колёсная формула 8×8, каждое колесо приводится во вращение индивидуальным встроенным электромотором типа мотор-колесо. Это обеспечивает распределение тяговых усилий между модулями и адаптивными колёсами. Повороты осуществляются разностью между скоростью колёс по левому и правому борту планетохода.

Адаптивные колёса с бескамерными шинами изменяемой жёсткости позволяют изменять ширину и диаметр, а значит, и площадь контакта с поверхностью и клиренс. Колёса подстраиваются под различные типы грунта, что позволяет им не застревать в сыпучих и топких грунтах, и экономят электроэнергию при движении по каменистой поверхности изменением площади контакта с поверхностью и крутящего момента колёс. Колёса были разработаны на основе работ (Заселяев, 2021; Семенов, 1975). Конструкция адаптивного колеса представляет собой неподвижный вал, на одном конце которого закреплён ведущий электродвигатель типа мотор-колесо, который является как тяговым электродвигателем, так и тормозным механизмом. На внешнем венце закреплена переходная планка, представляющая собой несущую конструкцию с равномерно радиально закреплёнными на ней 20 кронштейнами спиц. Спица является сборной единицей, состоящей из двух полых композитных трубок, прикреплённых к центральному разрезному звену-шарниру. Спицы выполнены в двух реализациях, которые при сборке образуют подвижное соединение, позволяющее передавать крутящий момент с двигателя на протектор. С другой стороны несущего вала установлен шаговый сервопривод, обеспечивающий вращение резьбовой втулки шарико-винтовой передаче, на которой расположена каретка спицевой опоры, за счёт чего появляется возможность изменения ширины колеса. Для обеспечения возможности изменения пятна контакта было принято решение об использовании обособленных эластичных элементов — траков. На внешнем радиусе колеса на каждой из 20 пар спиц закреплены 20 идентичных звеньев, которые при необходимости имеют возможность сжиматься и разжиматься, обеспечивая таким образом изменение пятна контакта, что в свою очередь позволяет изменять скорость и проходимость планетохода. Подвижные элементы адаптивного колеса изменяют во время движения его диаметр с 600 до 950 мм, при этом его ширина варьируется с 350 до 180 мм соответственно, а площадь пятна контакта изменяется от 300 до 100 мм^2, что изменяет давление на грунт всего планетохода с 30 до 60 кг/см^2.

При одинаковом вращении адаптивного колеса крутящий момент на внешнем диаметре изменяется с 200 до 130 Нм, при том что нагрузка на приводном вале остаётся неизменной. Этого диапазона достаточно для эффективного перемещения планетохода как по рыхлому песку, так и по каменистому твёрдому грунту, что позволит адаптироваться под различные типы поверхности и не застревать в сыпучих грунтах. Адаптивное колесо представлено на рис. 2.



а *б*

Рис. 2. Адаптивное колесо: *а* — прототип колеса; *б* — действующий конструкторско-технологический макет колеса

Бескамерные шины изменяемой жёсткости, установленные поверх обособленных траков, будут компенсировать неровности поверхности, снижать вибрации и удары, позволят ездить по мелким и средним острым камням. Они повысят ресурс колёс путём деформации и последующего возвращения в исходное состояние благодаря материалу с эффектом памяти формы. Они представляют собой модернизированные бескамерные шины из нитиноловых проволок, описанные в работах (Fidahusain, 2018; Padula et al, 2019a, b). Шина состоит из модулей, равных числу обособленных траков. Каждый модуль состоит из неподвижной секции полотна, описанного в вышеуказанных патентах, закреплённой на траке, и множества подвижных узких секций такого же полотна, которые опираются на дуги проволочного кольца-обода между траками. Для компенсации изменения длины обода колеса при изменении его диаметра кольцо-обод выполнен как телескопическая конструкция: дуги, расположенные между траками, могут входить и выходить из дуг, прикреплённых к тракам. При этом вдоль этих дуг между основаниями подвижных секций проведены пружины, благодаря чему подвижные секции равномерно распределяются по дуге. Основания подвижных секций двигаются по двум желобам на дуге. Для жёсткости системы в верхней части шины, которая соприкасается с поверхностью, изнутри все секции полотна шины прикреплены к кольцам с пружинами, расположенным в параллельных торцу колеса плоскостях, что также позволяет подвижным секциям распределяться равномерно. Для придания шинам дополнительной жёсткости от траков радиально исходят проволоки, прикреплённые к кольцам с пружинами, к которым крепятся все секции полотна. Для изменения жёсткости шин в полотне и поддерживающих элементах применяется проволока из нитинола (Бондарев, 2019) или сплава Cu-Al-Ni (Зиганшина, 2016) с плавлением сердечника в оболочке при протекании тока (Tonazzini et al., 2016). При протекании тока по проволоке она и её сердечник нагреваются, таким образом сердечник изменяет свою жёсткость и вязкость посте-

пенным плавлением. Разный ток по-разному нагревает сердечник, что позволяет в разной степени изменять жёсткость шин. Нитинол или более дешёвый сплав Cu-Al-Ni используются благодаря способности возвращаться из деформируемого состояния в исходное. На неподвижные секции проволочного полотна закреплено слоистое композитное полотно с эффектом самозалечивания (Хабибуллина и др., 2020) и внешний слой из материала, применяющегося в гипердеформируемых шинах (https://venturi.space/en/wheel/), которые полностью покрывают шину. Благодаря этим слоям заполняются просветы между проволочными секциями, обеспечивающими жёсткость шин. Торцы колёс закрывает слоистое композитное полотно с эффектом самозалечивания, благодаря чему внутрь колеса не будут попадать посторонние предметы, что наблюдается на марсоходах NASA Curiosity и Perseverance. Бескамерные шины изменяемой жёсткости представлены на рис. 3, для упрощения и большей наглядности изображены не все элементы.

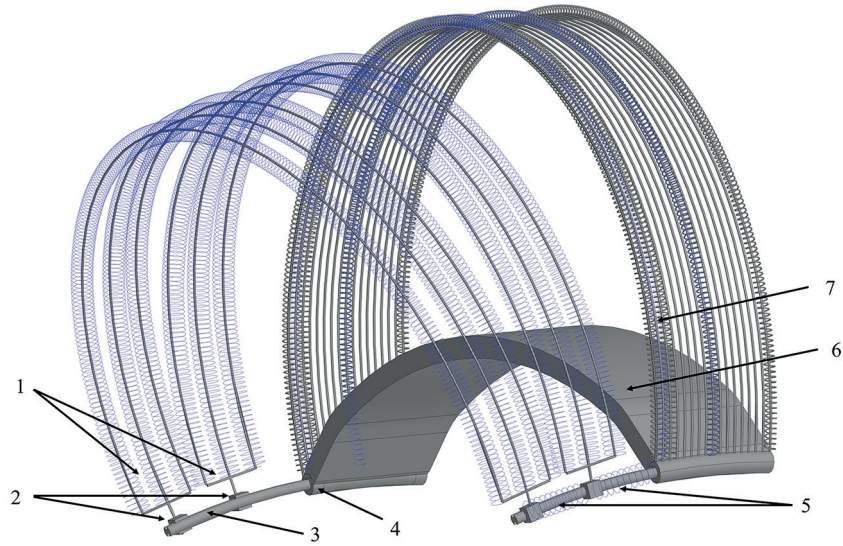


Рис. 3. Модуль бескамерной шины изменяемой жёсткости (в упрощённом виде): 1 — подвижные секции полотна; 2 — основания подвижных секций; 3 — телескопическая дуга между траками; 4 — дуга, прикреплённая к траку, в которую входит дуга 3; 5 — пружины между основаниями подвижных секций; 6 — трак; 7 — полотно неподвижной секции

Планетоход УИП ОС-8 предназначен для исследований объектов с различными характеристиками, в том числе и экзопланет, точная информация об условиях которых отсутствует. Поэтому не известно, грунты каких характеристик встретятся планетоходу на исследуемом объекте из-за различных условий, ускорения свободного падения, формы и вида самих песчинок. Адаптивные колёса способны изменять площадь контакта с поверхностью, что даёт возможность подстраиваться под различные типы грунта. Так, при наезде на новый неизвестный тип грунта, который легко может быть идентифицирован цифровой камерой, планетоход, заблокировав семь колёс из восьми, сможет, прокрутив одно, определить необходимые характеристики проскальзывания колеса относительно грунта при различной ширине и диаметре колеса. Затем, проанализировав полученные данные, сможет выбрать наилучшее сочетание ширины, диаметра и прикладываемого момента к колёсам. Кроме того, в случае застревания одного из модулей становится возможным вытягивать или выталкивать застрявший другим модулем.

Благодаря отсутствию жёсткой конструкции, предложенные колёса значительно легче аналогов. Использование адаптивных колёс с бескамерными шинами изменяемой жёсткости существенно повысит проходимость и устранит проблемы застреваний и повреждений колёс, что увеличит срок их эксплуатации и позволит адаптироваться под любые условия, типы грунтов и скорости передвижения.

Корпус. Габариты, масса

Оптимальные ширина и высота корпуса обеспечивают устойчивость на наклонной поверхности, благодаря чему планетоход не опрокинется даже при большом наклоне. Плоское дно и скругления на гранях корпуса позволяют проскакивать препятствия с наскока и защищают от повреждений корпуса.

Общая масса УИП ОС-8 в комплектации с ГЗУ и комплексом научной аппаратуры для исследований Марса, Титана и экзопланет составляет около 2 т. В таблице представлены габариты УИП ОС-8. Высота зависит от диаметра колёс и не учитывает мачту дистанционного зондирования поверхности.

Габариты УИП ОС-8

	Ширина, мм	**Длина, мм**	**Высота, мм**
В сложенном положении	3851	3500	2400
В разложенном положении без учёта выступающих за корпус элементов батарей	2890	6941	1920
В разложенном положении	3851	6941	1920

Материалы корпуса

Корпус планетохода должен обладать рядом свойств, которые можно обеспечить использованием современных материалов. Для обеспечения наилучших свойств и универсальности корпус толщиной 41,84 мм состоит из семи слоёв (начиная с внешнего):

1) радиационно-защитное терморегулирующее покрытие, описанное в патенте (Киселева и др., 2014), толщиной 2,82 мм;
2) напыление нитрида титана, толщиной 20 мкм;
3) слой органопластиков, ВКО-19Л (внешний слой 5 мм) и ВКО-20 (внутренний слой 5 мм);
4) основной «несущий» слой углепластика толщиной 5 мм;
5) многослойный полимер-углеродный композит для защиты от космического воздействия, описанный в патенте (Павленко и др., 2019), толщиной 7 мм;
6) теплоизоляционный материал на основе аэрогеля, описанный в патенте (Меньшутина и др., 2019), либо в других патентах, анализ которых приведён в работе (Шиндряев и др., 2017), толщиной 1,5 см;
7) дополнительный слой углепластика толщиной 2 мм.

Радиационно-защитное терморегулирующее покрытие состоит из двух слоёв, наносящихся методом пневматического напыления, обладает высокими радиационно-защитными и терморегулирующими свойствами, стойкостью к факторам космического пространства со сроком активной службы около 15 лет (Киселева и др., 2014). Поскольку органопластики обладают высокими эрозионными свойствами и стойкостью к абразивно-ударному воздействию (Шульдешова, Железина, 2014), но не обладают высокой стойкостью к воздействию агрессивных химических сред (Старцев, 2022), для дополнительного повышения стойкости используется напыление нитрида титана толщиной 20 мкм, обладающее высокой

жаропрочностью, износостойкостью, стойкостью к атмосферной и химической эрозии при высокой температуре, стойкостью к ультрафиолетовому излучению и отражательной способностью. Напыление может эксплуатироваться длительный период.

Несмотря на свои преимущества, углепластики обладают низкой ударостойкостью, из-за чего даже слабый удар образует микротрещины, при циклических нагрузках приводящие к расслоению материала и снижению прочности (Попов и др., 2015), а также не гарантированной герметичности (Аккуратов и др., 2018). Поэтому было принято решение об использовании в качестве защитного наружного слоя органопластиков. Органопластики — лёгкие полимерные композитные материалы, которые обладают высокой прочностью и стойкостью к ударным повреждениям и эрозии (Железина и др., 2017; Шульдешова, Железина, 2014). В последнее время ведутся разработки влаго- и атмосферостойких органопластиков ВКО-20 и ВКО-19Л (Железина и др., 2017), обладающими высокими механическими и эксплуатационными характеристиками в различных условиях окружающей среды. Внешний слой органопластика ВКО-19Л обеспечивает герметичность, защиту от влаги и воздуха. Внутренний слой органопластика ВКО-20 обеспечивает ударную и баллистическую стойкость.

В качестве несущего 4-го и дополнительного 7-го слоёв используется углепластик, который обладает высокими прочностными характеристиками, низкими коэффициентами линейного термического расширения и трения, высокой износостойкостью и устойчивостью к воздействию агрессивных сред, термическому и радиационному удару, высокой усталостной прочностью при статических и динамических нагрузках, малой массой, виброгасящими свойствами и является более преимущественным к использованию, чем алюминий (Павленко и др., 2022), который наиболее часто используется в качестве материала корпусов планетоходов.

Для жизнеобеспечения планетохода важна теплоизоляция от внешних и внутренних источников тепла. В УИП ОС-8 используется теплоизоляционный материал на основе аэрогеля, описанный в патенте (Меньшутина и др., 2019). Аэрогели обладают высокой пористостью, благодаря чему имеют малую массу и низкую теплопроводность и являются хорошей теплоизоляцией (Бабашов и др., 2019; Шиндряев и др., 2017).

Также для работы планетохода необходима радиационная защита. В настоящее время ведутся перспективные разработки композитных радиационно-защитных материалов, обладающих более высокими защитными свойствами, чем алюминий (Павленко и др., 2022). Предлагается использовать многослойный полимер-углеродный композит, описанный в патенте (Павленко и др., 2019) и обладающий преимуществами перед схожими разработками и высокими защитными показателями, а также дополнительную радиационную защиту с помощью радиационно-защитного терморегулирующего покрытия, описанного в патенте (Киселева и др., 2014).

Сцепка состоит из первых четырёх слоёв, а также сот на основе углеродного наполнителя.

Обеспечивающие системы

Система электроснабжения

Генератор РИТЭГ и раскрывающиеся солнечные батареи обеспечивают планетоход электроэнергией; РИТЭГ находится в заднем модуле в специальном отделе, защищённом кожухом. Таким образом, его использование полностью безопасно за счёт трёх защитных кожухов (два кожуха в самом РИТЭГ и один дополнительный наружный). Предлагается использовать РИТЭГ или радиоизотопный термо-

фотоэлектрический бетавольтаический генератор, разрабатываемый в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», основанный на исследовании (Borisyuk et al., 2018). Площадь солнечных батарей, расположенных в переднем модуле, будет зависеть от объекта исследования и его удаления от родительской звезды. Они состоят из трёх секций: неподвижной, встроенной в крышу модуля, и двух раскладывающихся. В сложенном положении они лежат на неподвижной секции. Три степени свободы позволяют им устанавливаться перпендикулярно лучам света и получать максимум энергии. Также в переднем модуле расположены аккумуляторы, заряжающиеся от солнечных батарей.

Система обеспечения теплового режима

Температуру внутри планетохода в переднем модуле будут обеспечивать радиоизотопные источники тепла, в заднем модуле — РИТЭГ, выделяющий тепловую энергию в фоновом процессе. На внутренних палубах научная аппаратура установлена на тепловых сотопанелях (ТСП) с радиоизотопными тепловыми блоками (РИТБ), тепловой мощностью в 8,5 Вт каждый (Куперштейн, Бондаренко, 2014). Аппаратура на верхних гранях также установлена на ТСП с РИТБ. Для отвода избыточной тепловой энергии используются регулируемые контурные тепловые трубы (КнТТ), по которым тепловой поток передаётся на наружные радиаторы. Для компенсации различного направления силы тяжести во время полёта испарители КнТТ расположены в нижней и верхней части ТСП. Излишнее тепло сбрасывается с помощью радиаторов-излучателей.

Комплекс научной аппаратуры и другая полезная нагрузка

Комплекс научной аппаратуры

Основными научными целями УИП ОС-8 являются минералогические исследования поверхности, которые дадут информацию о прошлом исследуемого объекта, исследования атмосферы, различных условий, важных для будущих пилотируемых миссий и, возможно, последующей колонизации. Комплекс научной аппаратуры (КНА) состоит из различных спектрометров для дистанционных и контактных исследований, датчиков, грунтозаборного устройства (колонкового бура), приборов для анализа образцов грунта, воздуха, жидкости и поиска жизни в них. Составляющие КНА размещаются на внутренних и двух боковых палубах, верхних гранях, мачте дистанционного зондирования поверхности в переднем модуле, манипуляторе (одной из секций которого является гибкий манипулятор (Mavinkurve et al., 2024)) в заднем модуле, изображённом на рис. 4.

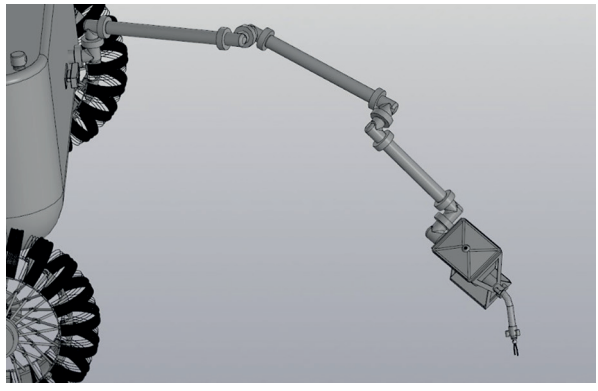
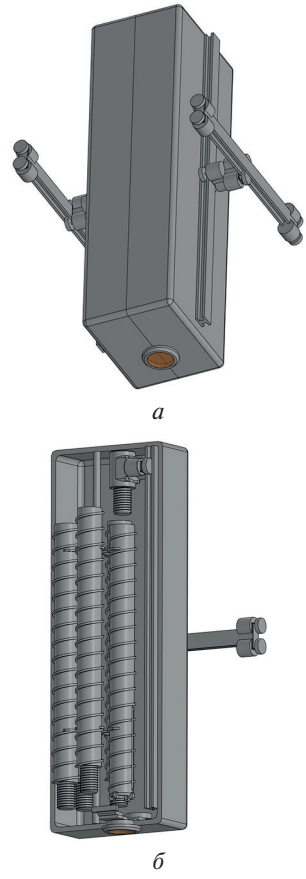


Рис. 4. Манипуляторный комплекс в разложенном положении

КНА позволяет проводить комплексные исследования состава поверхности и атмосферы, различных процессов и условий, а также исследования истории происхождения, формирования и жизнепригодности планет и поиск биомаркеров. Предложен состав КНА для исследований Марса, Титана (за исключением некоторых приборов) и экзопланет.

На основе обзора (Литвак и др., 2020) разработано грунтозаборное устройство (рис. 5), состоящее из ударно-вращательного колонкового бура со шнековым способом очистки скважины. Бур состоит из четырёх удлиняющих секций по 500 мм и основной секции 525 мм. Благодаря этому ГЗУ сможет брать образцы с глубины до 2 м. Бур расположен в специальном модуле, из которого он выдвигается. Модуль находится в негерметичном открывающемся отсеке в днище переднего модуля и способен перемещаться по нему с помощью направляющих и электродвигателей. В основной секции бура, сразу после резца, идёт открывающийся блок, в котором при помощи небольшого манипулятора помещается цилиндрический контейнер диаметром 33 мм и длиной 155 мм для проб. Когда происходит бурение, керн или иной вид образцов сразу попадает в контейнер, далее, после поднятия бура, контейнер опускается на землю, планетоход проезжает вперёд и манипуляторный комплекс в заднем модуле захватывает контейнер с поверхности и перемещает его в комплекс анализа и хранения образцов. Могут браться образцы как твёрдого грунта (керн), так и сыпучего, а также жидкостей. Наиболее важные образцы отбираются в контейнеры для хранения и последующего возвращения на Землю. Менее важные по значению для исследований, а также после окончания запаса возвращаемых контейнеров, пробы отбираются в многоразовый контейнер, из которого они переходят к приборам, осуществляющих их подробный анализ путём разрушения их первоначального вида. Затем образцы удаляются, а контейнер стерилизуется и повторно используется.



а

б

Рис. 5. ГЗУ: *а* — модуль с буром; *б* — модуль с буром в разрезе

Полезная нагрузка

В качестве полезной нагрузки (ПН) вместо ГЗУ могут находиться малые беспилотные летательные аппараты, планетоходы малого и сверхмалого классов, малые стационарные платформы для метеорологических и геофизических исследований. Имеются возможности для размещения большого количества различной научной аппаратуры. Благодаря внутреннему свободному пространству УИП ОС-8 имеет возможности для размещения различной ПН, что предоставляет широкие перспективы для его использования в космических исследованиях, а также для транспортировки некрупногабаритных грузов и научной аппаратуры на Земле.

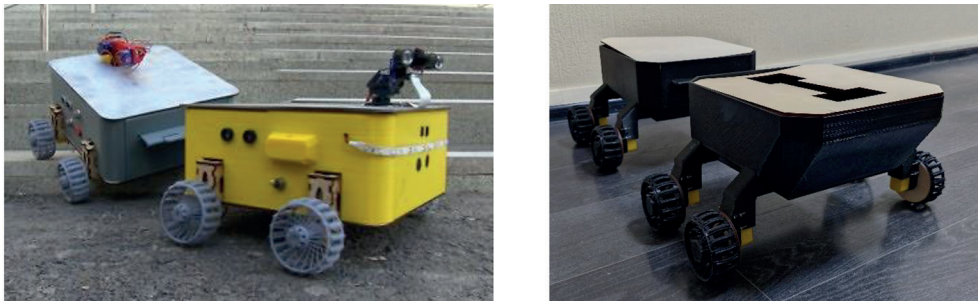
Система управления

Предполагается использование автоматической системы управления (АСУ), основанной на обработке информации с помощью специально обученного искусственного интеллекта. Основными задачами являются сбор данных с аппаратуры,

их хранение, анализ и отправка, полностью автономное управление движением, научной аппаратурой и выбором целей для исследований. АСУ будет способна обрабатывать различную информацию о местности и научные данные, самостоятельно определяя направление и точную траекторию движения, исходя из типа и сложности местности и перспективности для научных исследований на основе анализа данных КНА. Автономные определения целей для исследований и наилучшего направления движения уже применяются на практике (Lawson et al., 2025; Verma et al., 2023). Важную роль в навигации будут играть интерферометрические радары с синтезированной апертурой, которые, благодаря алгоритму, описанному в патенте (Великанова и др., 2019), могут генерировать 3D-изображения сканируемой местности, а также различные камеры в переднем модуле, способные в том числе создавать 3D-изображения прилегающей поверхности.

Конструкторско-технологический макет

В системе автоматизированного проектирования «Компас-3D» в масштабе 1:9,31 спроектированы конструкторско-технологические макеты (КТМ) и их комплектующие, которые были изготовлены при помощи аддитивных технологий на 3D-принтере Anicubic Kobra 2 Max из PLA-пластика и технологий лазерной резки фанеры. Днища и верхние грани модулей изготовлены из фанеры. Распечатанные на 3D-принтере колёса приводятся в движение с помощью электродвигателей, размещённых в специальных напечатанных шахтах, прикреплённых к корпусу. К днищу винтами прикреплены боковые, передние и задние грани модулей, распечатанные на 3D-принтере, дополнительно скреплённые между собой рёбрами жёсткости. Модули соединены жёсткой сцепкой, обеспечивающей три степени свободы. Сверху конструкция закрывается верхними гранями из фанеры. Создана автоматическая и дистанционная системы управления КТМ на языках программирования Arduino и Python. КТМ первой и второй очереди представлены на рис. 6.



а *б*

Рис. 6. КТМ: *а* — первой очереди (на испытаниях); *б* — второй очереди (в процессе сборки)

Были проведены испытания, которые показали хорошую проходимость КТМ УИП ОС-8, его устойчивость и способность преодолевать препятствия (Мигранов и др., 2025). Испытания подтвердили верность выбранных конструкторских решений. Все системы КТМ отработали штатно и продемонстрировали свою работоспособность. В дальнейшем планируется усовершенствование шасси и систем управления для улучшения автоматизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы предложена конструкция простого и надёжного универсального планетохода, который обладает хорошей проходимостью, устойчивостью, компактностью при транспортировке, запасом для модернизации за счёт совершенствования материалов и элементов конструкции, свободным местом для большого количества полезной нагрузки. Рассмотрены проблемы эксплуатации планетоходов, объекты исследования и аппаратура для функционирования планетохода и проведения исследований. Изучены существующие технические решения. Предложен необходимый комплекс научной аппаратуры. Спроектирован и изготовлен КТМ, проведены его испытания, которые показали работоспособность системы.

Предложенный Универсальный исследовательский планетоход «Оставляющий след ОС-8» благодаря своим преимуществам перед аналогами, способностью масштабирования и большими возможностями для размещения различной ПН обладает большими перспективами при исследовании и освоении космического пространства в Солнечной и других звёздных системах, в частности, для использования в рамках российских лунной, марсианской и других программ по исследованию планет, их спутников, астероидов и комет. УИП имеет перспективы и на Земле – для исследований и доставки грузов в труднодоступных районах и районах с суровыми и опасными условиями Арктики, Антарктики, Сибири, Дальнего Востока, а также в пустынях и высокогорных плато. Таким образом, разработка является актуальной для решения различных задач, выполняемых Россией на Земле и в космосе.

ЛИТЕРАТУРА

Аккуратов И. Л., *Алямовский А. И.*, *Виноградов А. С. и др.* Результаты исследований свойств углепластиков на основе различных полимерных связующих, перспективных для изготовления конструкций космической техники // Косм. техника и технологии. 2018. № 1(20). С. 54–66.

Бабашов В. Г., *Варрик Н. М.*, *Карасева Т. А.* Применение аэрогелей для создания теплоизоляционных материалов (обзор) // Тр. ВИАМ. 2019. № 6(78). С. 32–42.

Бондарев А. Б. Нитинол — никелид титана — сплавы с памятью формы: свойства, производство, применение // Научный аспект — Техника. № 3. 2019. https://na-journal.ru/3-2019-tehnika/1907-nitinol-nikelid-titana-splavy-s-pamyatyu-formy-svojstva-proizvodstvo-primenenie.

Великанова Е. П., *Манохин Г. О.*, *Васильев А. С.* Способ получения трёхмерного изображения в радаре переднебокового обзора с синтезированием апертуры антенны: Патент РФ № 2709484 С1. 2019. https://yandex.ru/patents/doc/RU2709484C1_20191218.

Железина Г. Ф., *Гуляев И. Н*, *Соловьева Н. А.* Арамидные органопластики нового поколения для авиационных конструкций // Авиац. материалы и технологии. 2017. С. 368–378.

Заселяев И. А. Колесо с изменяемым диаметром: Патент России № 2741159С1. 2021.

Зиганшина А. И. Титано-никелевый сплав с эффектом памяти формы // Научно-метод. электрон. журн. «Концепт». 2016. Т. 11. С. 3191–3195. http://e-koncept.ru/2016/86674.htm.

Киселева Л. В., *Григоревский А. В.*, *Токарь С. В. и др.* Радиационно-защитное терморегулирующее покрытие для космических аппаратов: Патент РФ № 2554183 С1. 2014. https://yandex.ru/patents/doc/RU2554183C1_20150627.

Куперштейн В. Б., *Бондаренко В. А.* Обеспечение теплового режима десантного модуля космического аппарата «Экзомарс-2018» // Вестн. НПО имени С. А. Лавочкина. 2014. № 2(23). С. 95–104.

Литвак М. Л., *Носов А. В.*, *Козлова Т. О. и др.* Глубинные грунтозаборные устройства для будущих российских лунных полярных миссий // Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 3. С. 225–246. DOI: 10.31857/S0320930X20030081.

Маров М. Я. Исследования Луны автоматическими космическими аппаратами // Косм. исслед. 2023. Т. 61. № 1. С. 52–77. DOI: 10.31857/S0023420623010041.

Меньшутина Н. В., *Лебедев А. Е.*, *Белоглазов А. П.*, *Нестеров Д. Г.* Теплоизоляционный материал на основе аэрогеля: Патент РФ № 2731479 C1. 2019. https://patenton.ru/patent/RU2731479C1.

Мигранов А. И., *Морозов Д. А.*, *Баширов М. И.* Разработка конструкторско-технологического макета универсального исследовательского планетохода «Оставляющий след ОС–8» // 51-я Международ. молодёж. науч. конф. «Гагаринские чтения – 2025»: сб. тез. докл. школьного направления «Юный учёный». 2025. С. 76–78. https://gagarin.mai.ru/files/2025/abstracts_school_2025.pdf.

Михеев А. В., *Кострова З. А.*, *Беляков В. В. и др.* Безвоздушная шина с механической регулировкой жесткости: Патент России № 167208 U1. 2016. https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/dostizheniya/poleznye_modely/2016/167208.pdf.

Павленко В. И., *Курицын А. А.*, *Попова Е. В. и др.* Многослойный полимер-углеродный композит для защиты от космического воздействия: Патент РФ № 2719682 C1. 2019. https://patents.google.com/patent/RU2719682C1/ru.

Павленко В. И., *Черкашина Н. И.*, *Курицын А. А. и др.* Высокоэффективный конструкционный полимерный материал для защиты от космической радиации // Пилотируемые полеты в космос. 2022. № 2(43). С. 105–115.

Попов А. Ю., *Госина К. К.*, *Петров И. В. и др.* Классификация, состав, достоинства и недостатки многокомпонентных композитных материалов // Омский науч. вестн. 2015. № 3(143). С. 42–45.

Семенов Н. А. Колесо повышенной проходимости: Патент СССР № 473625 A1. 1975. https://yandex.ru/patents/doc/SU473625A1_19750615

Старцев В. О. Влияние агрессивных жидкостей на свойства полимерных композиционных материалов (обзор) // Тр. ВИАМ. 2022. №8(114). С. 98–112.

Хабибуллина И. А., *Ситников Н. Н.*, *Мащенко В. И. и др.* Самозалечивающийся композит с внутренним функциональным слоем на основе соединений боросилоксана // Полимер. композиц. материалы нового поколения и технологии их переработки: материалы Всероссийской научно-техн. конф. 2020. С. 140–153.

Шиндряев А. В., *Кожевников Ю. Ю.*, *Лебедев А. Е.*, *Меньшутина Н. В.* Исследование процесса получения теплоизоляционных материалов на основе аэрогелей // Успехи в химии и хим. технологии. 2017. Т. 36. № 6. С. 130–132.

Шульдешова П. М., *Железина Г. Ф.* Влияние атмосферных условий и запыленности среды на свойства конструкционных органопластиков // Авиацион. материалы и технологии. 2014. № 1. С. 64–68.

Borisyuk P., *Yakovlev V. P.*, *Vasiliev O. S. et al.* Size-ordered 63 Ni nanocluster film as a betavoltaic battery unit // Applied Physics Letters. 2018. V. 112. No. 14. DOI: 10.1063/1.5010419.

Fidahusain A. Raydurg Future of Nitinol Tires // Intern. J. for Innovative Research in Science and Technology. 2018. V. 4. Iss. 10. P. 74–78.

Lawson P. R., *Kizovski T.*, *Tice M. M. et al.* Adaptive sampling with PIXL on the Mars Perseverance rover // Icarus. 2025. V. 429. Article 116433. DOI: 10.1016/j.icarus.2024.116433.

Marov M. Ya., *Slyuta E. N.* Early steps toward the lunar base deployment: Some prospects // Acta Astronautica. 2021. No. 181. P. 28–39. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.01.002.

Mavinkurve U., *Kanada A.*, *Tafrishi S. A. et al.* Geared Rod-Driven Continuum Robot with Woodpecker-Inspired Extension Mechanism and IMU-Based Force Sensing // IEEE Robotics and Automation Letters. 2024. V. 9. No. 1. P. 135–142. DOI: 10.1109/LRA.2023.3331650.

Padula S. A. II, *Benzing J.*, *Asnani V. M.* (2019a) Superelastic tire: Patent US10449804B1. 2019. https://patents.google.com/patent/US10449804B1/en.

Padula S. A. II, *Benzing J.*, *Creager C. M.* (2019b) Radially stiffened shape memory alloy tire: Patent US10427461B1. 2019. https://patents.google.com/patent/US10427461B1/en.

Tonazzini A., *Mintchev S.*, *Schubert B. et al.* Variable Stiffness Fiber with Self-Healing Capability // Advanced Materials. 2016. No. 28(46). P. 10142–10148. DOI: 10.1002/adma.201602580.

Vasiliev A., *Dalyaev I.*, *Slyuta E. N. et al.* Design Concept Lunar Rover for the Moon Geological Exploration // Proc. 28th Intern. DAAAM Symp. P. 0780–0786. 2017. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.110.

Verma V., *Maimone M. W.*, *Gaines D. M. et al.* Autonomous robotics is driving Perseverance rover's progress on Mars // Science Robotics. 2023. V. 8. Iss. 80. Article 3099. DOI: 10.1126/scirobotics.adi3099.

UNIVERSAL RESEARCH PLANETARY ROVER "LEAVING A MARK LM-8" DESIGN

M. I. Bashirov [1], ***D. A. Morozov*** [1], ***A. I. Migranov*** [1], ***A. K. Khismatullin*** [2]

[1] **A. Sh. Fayzullin School No. 39, Ufa, Russia**
[2] **Physics and Mathematics Lyceum No. 9, Ufa, Russia**

The design of the prototype of the Universal Research Planetary Rover "Leaving a Mark LM-8" has been developed. The problems of planetary rover operation, research objects and equipment for the functioning of the planetary rover and conducting research are considered. The existing technical solutions have been studied. Adaptive wheels with superelastic non-pneumatic tires of variable stiffness have been developed. The composition of the case materials has been selected. The necessary complex of scientific equipment is proposed. Using 3D-modeling in the computer-aided design system Kompass-3D design engineering models were also developed, made on a scale of 1:9.31 using additive technologies and laser cutting technologies. Design engineering model's Remote and Automated Control Systems were developed and tested. Successful tests of design engineering models have been carried out.

Keywords: planetary rover, exoplanet, planetary research, versatility of design, modularity, adaptive wheels, non-pneumatic tires, superelastic tires, torsion bar suspension, composite materials, soil-sampling tools.

Bashirov Marat Ildarovich — 10th grade student, MaratBashirov8@yandex.ru
Morozov Dmitry Alexandrovich — 10th grade student, morozovdmitrymorozov@yandex.ru
Migranov Askar Ilfakovich — 10th grade student, kolkigolki@gmail.com
Khismatullin Artur Kamilevich — 10th grade student, arturkhisma0808@gmail.com

УДК 341.24 DOI: 10.21046/KMU-2025-58-63

СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УДАЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ

К. А. Варрес

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия
Исследовательский центр «Космическая экономика и политика»
Москва, Россия

Рассматриваются современные вызовы правового регулирования в сфере активного удаления космического мусора, включая отсутствие общепризнанных терминологических определений, правовую неопределённость в вопросах собственности и ответственности, а также альтернативные видения международного правового режима в области засорённости космического пространства. Особое внимание уделяется различиям в национальных и международных подходах к определению понятий «космический мусор» и «активное удаление», а также анализу действующих международных договоров. В качестве перспективного направления в решении проблемы космического мусора исследуется механизм государственно-частного партнёрства на примере международной инициативы Three Country Trusted Broker, выступающей в роли потенциального инструмента координации усилий по очистке околоземного пространства.

Ключевые слова: космический мусор, активное удаление, государственно-частное партнёрство, космическое право, Three Country Trusted Broker

Космический мусор остаётся одной из наиболее острых проблем человечества в освоении околоземного пространства на протяжении последних лет. При этом образование космического мусора затрагивает не только опасения научного сообщества в виде небезызвестного эффекта Кесслера (*англ.* Kessler Syndrome) — потенциальной цепной реакции, состоящей из разрушений космических аппаратов на околоземной орбите, но и правовые лакуны международного космического права. Несмотря на широкий перечень угроз, возникающих при увеличении засорённости космического пространства, а также возрастающий интерес к данному вопросу, значительного прогресса в решении проблемы достичь не удалось.

В то же время существует комплекс методов снижения засорённости космической среды. К одним из наиболее известных относится удаление космического мусора, которое можно разделить на две ключевые категории: пассивное и активное. Среди пассивных мер выделяются технологии, изначально заложенные в конструкцию космического аппарата, позволяющие свести его орбиты. Активные методы включают в себя использование космических парусов, лазерных установок, буксировку, гарпунирование, захват сетью, привязывание и другие способы[1]. Данный метод представляет наиболее обсуждаемый и спорный метод «уборки», поскольку охватывает перечень компонентов, которые остаются нерешёнными в вопросе удаления космического мусора: терминологические противоречия, правовая неопределённость, политические разногласия, а также военные приготовления ряда держав.

Прежде всего, международно-правовые противоречия в вопросе «активного удаления» космического мусора возникают на этапе формирования терминологического аппарата. Стоит отметить, что на сегодняшний день отсутствуют обще-

[1] *Шинкарецкая Г. Г.* Удаление космического мусора — настоятельная международно-правовая проблема // Правовая политика и правовая жизнь. 2024. № 3. С. 114–122.

Варрес Кирилл Артёмович — магистрант, varrrres@bk.ru

принятые и юридически значимые определения следующих терминов: «космический мусор» и «активное удаление». Вместе с тем необходимость установления универсальных определений в международном космическом праве обуславливается простой логикой: перед тем, как «очищать» космическое пространство, прежде всего, стоит определиться с объектами космического мусора, представляющих угрозу, а также способами их «уборки».

Термин «космический мусор» является устоявшимся среди отечественного научного сообщества. Согласно определению, упомянутому в российском государственном стандарте (ГОСТ Р 52925-2018), «космический мусор» означает «все находящиеся на околоземной орбите космические объекты искусственного происхождения (включая фрагменты или части таких объектов), которые закончили своё активное функционирование»[2].

В зарубежной литературе для обозначения проблемы принято использовать термин space debris. Однако перевод слова debris имеет несколько интерпретаций, среди которых «мусор» не представлен в качестве основного значения. Согласно иностранным словарям, упомянутый термин трактуется как «обломки», «осколки», «куски дерева, металла» и другим образом[3]. При рассмотрении зарубежной терминологии стоит обратиться к американскому опыту. К примеру, в третьей директиве о космической политике США 2018 г. космический мусор обозначается как «любой созданный человеком космический объект, вращающийся вокруг Земли, который более не служит какой-либо полезной цели».

В рамках ООН существует общее определение космического мусора, сформулированное в Руководящих принципах Комитета по использованию космического пространства в мирных целях (КОПУОС), которое понимается как «все находящиеся на околоземной орбите или возвращающиеся в атмосферу антропогенные объекты, включая их фрагменты и элементы, которые являются нефункциональными».

В качестве промежуточного вывода можно сделать следующее заключение: различные подходы к определению термина свидетельствуют о разном понимании характера проблемы космического мусора. Помимо этого, ссылаясь на содержание упомянутых определений, стоит выделить составные элемента термина, которые вносят недопонимания: «функциональный», «функционирующий» и «полезный». *Функциональный* означает выполнение какой-либо функции, необязательно заданной, *функционирующий* включает в себя выполнение заложенной функции, а критерий *полезности*, используемый в американском варианте, согласно оксфордскому словарю, понимается как «что-то, что может помочь вам сделать или достичь того, что вы хотите» или «хороший; надлежащего уровня»[4]. Данный пример наглядно демонстрирует существенные противоречия определения «космический мусор», которые закладывают основу проблемы.

Подобные терминологические разногласия применимы и к «активному удалению». Ярким примером становится определение, содержащееся в Национальном плане исследований и разработок по орбитальному мусору США 2021 г., которое понимается следующим образом: «очистка мусора, также называемая активным удалением мусора, представляет собой принудительное изменение траектории объекта мусора внешними по отношению к объекту способами, включая полное

[2] ГОСТ Р 52925-2018. Национальный стандарт Российской Федерации. Изделия космической техники.

[3] *Орешников А. М.* Теоретические основы международно-правового аспекта удаления «космического мусора» // Московский журн. международного права. 2024. № 2. С. 46–64.

[4] Oxford Learner's Dictionary. Useful. https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/english/useful.

удаление объекта из космоса»[5]. В представленном варианте термины «очистка» (*англ*. remediation) и «удаление» (*англ*. removal) являются тождественными, несмотря на лексические различия слов.

Не менее важной проблемой с точки зрения правовой неопределённости, возникающей при активном удалении космического мусора, становится отсутствие надлежащей правовой основы в вопросах засорения космического пространства. Несмотря на обширный перечень договоров, регулирующих международное космическое право, вопрос космического мусора упоминается лишь косвенно. В частности, в ст. IX Договора по космосу, говорится: «Государства – участники Договора осуществляют изучение и исследование космического пространства, включая Луну и другие небесные тела, таким образом, чтобы избегать их вредного загрязнения»[6]. Тем не менее Договор по космосу не обязывает страны-участницы принимать меры для того, чтобы избегать загрязнения космического пространства. Более того, ни данный договор, ни другие соглашения по космосу не содержат указаний ни на его источник, ни на то, что представляет собой его загрязнение.

Менее очевидном договором, косвенно затрагивающим проблему космического мусора, является Конвенция о запрещении военного или иного враждебного использования средств воздействия на природную среду 1977 г. В первой статье утверждается, что «Каждое государство – участник настоящей Конвенции обязуется не прибегать к военному или любому иному враждебному использованию средств воздействия на природную среду, которые имеют широкие, долгосрочные или серьёзные последствия, в качестве способов разрушения, нанесения ущерба или причинения вреда любому другому государству-участнику». Если считать, что космическая среда относится к природной, то данное положение распространяется на космическое пространство. Однако Конвенция не закрепляет конкретные меры по снижению засорённости космического пространства[7].

Также стоит обратиться к Руководящим принципам по предотвращению образования космического мусора Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях, которые содержат список рекомендаций, способствующих ограничению образования космического мусора. Ввиду рекомендательного характера документа, государства сохраняют возможность оставлять мусор[8].

Отсутствие чётких норм «жёсткого права» в международном космическом праве в области космического мусора побуждает государства к формированию альтернативных правовых механизмов регулирования проблемы. Примером данного утверждения служит проект Кодекса поведения в космосе, подготовленный государствами Европейского Союза, носивший юридически необязательный характер. В особенности, проект предлагал государствам-подписантам «воздерживаться от любого непреднамеренного действия, которое будет или может прямо или косвенно причинить ущерб или привести к разрушению космических объектов, за исключением случаев, когда такое действие будет проведено в целях сокращения создания мусора в космическом пространстве и (или) будет оправдано

[5] National Orbital Debris Research and Development Plan. United States National Science and Technology Council, 2021.

[6] Договор о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела. 1967.

[7] *Морозов И. Д.* Правовая сторона проблемы космического мусора // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 2. С. 468–470.

[8] Комитет ООН по использованию космического пространства в мирных целях (КОПУОС). Руководящие принципы по снижению образования космического мусора. Приняты на 62-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН, резолюция № 62/217 от 22 декабря 2007 г.

чрезвычайными мерами безопасности»[9]. Несмотря на истинные мотивы кодекса в виде оправдания военных действий в космосе под предлогом угрозы космического мусора, документ предлагает альтернативное видение решения проблемы в силу наличия «пробелов» в международном космическом праве.

Обсуждая «активное удаление» космического мусора, нельзя не упомянуть о правах собственности на объекты космического мусора и возникающих юридических коллизиях. Ввиду отсутствия общепризнанного определения термина «космический мусор», в вопросе прав собственности целесообразно идентифицировать космический мусор как космический объект[10]. В соответствии с Конвенцией о регистрации и Конвенцией об ответственности за ущерб, космический объект означает «объект в целом, его составные части и средство его доставки»[11]. В свою очередь, ст. VIII Договора по космосу закрепляет следующие положения: сохранение юрисдикции и контроля над космическим объектом за государством-регистрации, сохранение за ним права собственности на космический объект и его составные части, а также право требовать от других государств вернуть космический объект, включая его части, обнаруженный на Земле за пределами территории запускающего государства. Таким образом, можно заключить, что государство, запустившее космический объект в космос, сохраняет за ним юрисдикцию и контроль независимо от критерия функциональности космического объекта, а значит, права собственности на объект космического мусора остаются незыблемыми за государством-регистрации.

При удалении космического мусора возможен сценарий, при котором государство-регистрации откажется от права собственности на объект космического мусора. В таком случае важно помнить, что отказ от прав собственности не отменяет права и обязанности государства в отношении к соответствующему имуществу. Другое государство, не являющееся государством-регистрации этого объекта космического мусора, вправе удалять его лишь после приобретения на него права собственности. В российском законодательстве данное положение закреплено в ст. 236 Гражданского Кодекса РФ[12].

Наряду с этим, дискуссия о правах собственности на объекты космического мусора поднимает актуальный вопрос международного космического права об ответственности государств за образование и возможное удаление мусора. Важно отметить, что государства не несут ответственность за образование космического мусора. Ответственность возникает лишь в результате ущерба. Согласно ст. VII Договора по космосу государства несут ответственность за ущерб, нанесённый их космическими объектами или их составными частями другому государству на Земле, в воздушном пространстве или в космосе. Ст. I, II и III Конвенции об ответственности за ущерб уточняют, что запускающее государство несёт абсолютную ответственность за выплату компенсации за ущерб, причинённый его космическим объектом на поверхности Земли или воздушному судну в полёте. Если в любом месте, помимо поверхности Земли, космическому объекту одного запускающего государства либо лицам или имуществу на борту такого космического объекта причинён ущерб космическим объектом другого запускающего государства, то последнее несёт ответственность только в случае, когда ущерб причинён

[9] *Волынская О. А.* Кодекс поведения в космосе как новый этап развития международного космического права // Московский журн. международного права. 2014. Т. 1. С. 134–140.

[10] *Волынская О. А.* Организационно-правовые вопросы международного сотрудничества по проблеме космического мусора // Науч. тр. ИНАСАН. 2022. Т. 7. Вып. 1. С. 468–470.

[11] Конвенция о регистрации объектов, запускаемых в космическое пространство. 1975.

[12] Гражданский кодекс Российской Федерации (часть первая) от 30.11.1994 № 51-ФЗ (ред. от 01.05.2025) // Собрание законодательства РФ. 1994. № 32. Ст. 236.

по его вине или по вине лиц, за которых оно отвечает[13]. Иными словами, ответственность государства за совершение «космического ДТП» требует доказательства его вины. Однако вопрос правоприменения данного положения, особенно в случае нанесения ущерба при удалении объектов космического мусора, вызывает сложности. Установление принадлежности объекта, причинившего ущерб, кажется весьма нетривиальной задачей.

Как итог, существующие государственные и межгосударственные подходы к решению проблемы образования космического мусора, несмотря на их актуальность и важность, показали свою неэффективность в условиях стремительного роста числа объектов космического мусора и недостаточной координации между странами. В связи с этим целесообразно рассмотреть альтернативный сценарий, такой как государственно-частное партнёрство, которое могло бы стать надёжным инструментом для решения данной проблемы. В качестве примера можно обратиться к негосударственной организации, имеющей статус постоянного наблюдателя Комитета ООН по космосу и объединяющей три основных «загрязнителя» околоземного космического пространства (США, Россия, Китай), ТСТВ (*англ.* Three Country Trusted Broker). В начале 2025 г. организация разработала предложение о формировании рабочей группой для планирования и проведения пилотного проекта по совместному удалению с околоземной орбиты массивных объектов космического мусора[14]. Инициатива была направлена в Управление ООН по вопросам космического пространства и будет обсуждаться на 68-й сессии КОПУОС.

В конечном счёте, ТСТВ может выступить в качестве посредника между государствами, частными компаниями и научными учреждениями, координируя усилия по разработке технологий очистки орбит и предотвращению образования космического мусора. Подобный подход позволит более гибко и оперативно реагировать на проблемы, возникающие в результате увеличения космического мусора.

Таким образом, проблема правового регулирования удаления космического мусора представляет собой один из наиболее острых вызовов для международного космического права. Несмотря на наличие ряда договоров и принципов, существующие правовые механизмы содержат серьёзные лакуны. Отсутствие общепризнанных дефиниций ключевых терминов, таких как «космический мусор» и «активное удаление», правовая неопределённость в вопросах собственности и ответственности, а также попытки маневрирования ряда стран в сторону «мягкого права» затрудняют выработку скоординированного плана. В этих условиях особую значимость приобретает разработка новых форм сотрудничества, включая государственно-частное партнёрство, которое способно реанимировать международные усилия по очистке космического пространства.

[13] Конвенция о международной ответственности за ущерб, причинённый космическими объектами 1972 г.

[14] Эксперты РФ, США и КНР направили в ООН инициативу по уборке космического мусора // ТАСС.11.03.2025. https://tass.ru/kosmos/23357075?ysclid=mcj15iq5rp563329269.

MODERN CHALLENGES IN THE LEGAL REGULATION OF SPACE DEBRIS REMOVAL AND PROSPECTS FOR THEIR RESOLUTION

K. A. Varres

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Research Center "Space Economy and Policy", Moscow, Russia

The article examines modern challenges of legal regulation in the field of active removal of space debris, including the lack of generally accepted terminological definitions, legal uncertainty in matters of ownership and liability, as well as alternative visions of the international legal regime in the field of space debris. Particular attention is paid to the differences in national and international approaches to defining the concepts of "space debris" and "active removal", as well as an analysis of current international treaties. As a promising direction in solving the problem of space debris, the mechanism of public-private partnership is studied using the example of the international initiative Three Country Trusted Broker, which acts as a potential tool for coordinating efforts to clean up near-Earth space.

Keywords: space debris, active removal, public-private partnership, space law, Three Country Trusted Broker

Varres Kirill Artemovich – master's student, varrrres@bk.ru

УДК 524.77 DOI: 10.21046/KMU-2025-64-71

ВЫДЕЛЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННО-СВЯЗАННЫХ ПОДСТРУКТУР В ПОЛЕ СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК CL0238.3+2005

П. С. Васильева [1], *Н. С. Лыскова* [2]

[1] **Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия**
[2] **Институт космических исследований РАН, Москва, Россия**

Выделение подструктур в скоплениях галактик — важная задача для определения динамического состояния скопления (скопление находится в спокойном состоянии или претерпевает слияние), а также для уточнения характеристик отдельных сливающихся компонент. Задачей данной работы является выделение возможных гравитационно-связанных подструктур в скоплении галактик CL0238.3+2005 на основе информации о положении галактик и фотометрических оценок красных смещений. Для идентификации подструктур был выбран усовершенствованный метод Дресслера – Шектмана DS+, который позволяет выделять гравитационно-связанные подструктуры на основе информации о положении и скорости галактик в скоплении. Метод DS+ включает в себя ряд вспомогательных параметров, которые оказывают влияние на получаемый результат. Для подбора оптимального набора вспомогательных параметров метод был протестирован на синтетических данных и на хорошо изученном сливающемся скоплении Пуля. Показано, что «по умолчанию» детектируется значительное количество ложных гравитационно-связанных групп. Этот недостаток может быть устранён усреднением по большому числу реализаций. Метод DS+ применён к скоплению галактик CL0238.3+2005, для которого доступны фотометрические оценки красных смещений ~100 галактик. Выделены три устойчивые гравитационно-связанные подструктуры, а также охарактеризованы средние скорости и дисперсии выделенных групп.

Ключевые слова: скопления галактик, кинематика и динамика

ВВЕДЕНИЕ

Скопления галактик являются крупнейшими гравитационно-связанными структурами во Вселенной, и их изучение играет ключевую роль в понимании процессов формирования крупномасштабной структуры Вселенной. Особый интерес представляют массивные скопления, находящиеся в процессе слияния, так как они позволяют исследовать динамику взаимодействия тёмной материи, галактик и межгалактического газа. Скопление CL0238.3+2005, расположенное на красном смещении $z = 0{,}42$ (Burenin et al., 2022), является примером такого объекта, демонстрирующего признаки недавнего слияния (Lyskova et al., 2025).

В недавней работе (Lyskova et al., 2025) представлен анализ скопления CL0238.3+2005 на основе данных рентгеновских (телескопы Chandra и eROSITA (*англ.* extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array)) и оптических (российско-турецкий телескоп РТТ-150) наблюдений. Высказано предположение, что наблюдается слияние двух скоплений, разделённых расстоянием около 200 кпк (в плоскости неба), скорость слияния (лучевая компонента) при этом составляет 2000–3000 км/с.

Цель данной работы заключается в выделении возможных гравитационно-связанных подструктур в скоплении галактик CL0238.3+2005 на основе фотометрических оценок красных смещений из работы (Wen et al., 2024). Для

Васильева Полина Сергеевна — бакалавр (прикладные математика и физика) vasileva.ps@phystech.edu
Лыскова Наталья Сергеевна — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, lyskova@cosmos.ru

этой задачи была выбрана усовершенствованная версия классического метода Дресслера – Шектмана DS+, подробно изложенная в работе (Benavides et al., 2023).

МЕТОД DS+

Метод идентификации подструктур Дресслера – Шектмана (Dressler, Shectman, 1988) использует информацию о положении галактик и их лучевой скорости для определения, насколько сильно локальная средняя скорость и локальная дисперсия скоростей в выделенной подструктуре отличается от глобальных характеристик. Важно отметить, что распределение лучевой скорости в динамически спокойном скоплении галактик может быть описано нормальным распределением (например, (Chincarini, Rood, 1977; Halliday et al., 2004; Lokas et al., 2006)), в то время как в сливающихся скоплениях оно значительно отклоняется от нормального (Adami et al., 2005; Colless, Dunn, 1996; Cortese et al., 2004; Girardi et al., 2005).

В работе (Benavides et al., 2023) этот метод, названный DS+, был усовершенствован и протестирован на модельных скоплениях галактик, полученных из космологических симуляций IllustrisTNG (https: //www.tng-project.org/). Авторы работы (Benavides et al., 2023) показали, что при помощи DS+ в модельных скоплениях около 80 % всех галактик, являющихся частью гравитационно-связанных групп, были верно идентифицированы как принадлежащие подструктурам, а не основному скоплению; по крайней мере 60 % галактик, отнесённых к подструктурам, принадлежат реальным группам. Также авторы выложили в открытый доступ программный пакет на языке Python, в котором реализован алгоритм DS+.

Для того чтобы апробировать надёжность детектируемых алгоритмом DS+ групп, было проведено тестирование метода на синтетических данных. Для этого было смоделировано, как бы выглядели положение и лучевая скорость галактик, если бы было всего два скопления, в которых лучевая скорость и координаты галактик имеют нормальное распределение. На таком наборе синтетических данных метод выделяет больше двух компонент (рис. 1), что говорит о том, что воспроизводимость метода нуждается в доработке. Однако «перемешивание» галактик, т. е. приписывание галактик одного модельного скопления другому, не происходит.

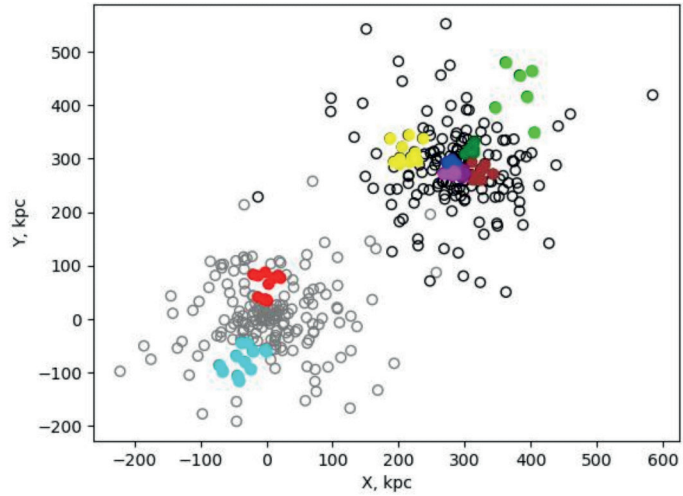


Рис. 1. Иллюстрация работы метода DS+ на синтетическом скоплении. Различные цвета обозначают галактики, отнесённые к разным группам, пронумерованным от 1 до 10

Итак, алгоритм DS+ включает в себя метод случайного сравнения для моделирования подструктур и, таким образом, вычисления вероятности принадлежности галактики к данной подструктуре. Это означает, что каждый «запуск» метода не обязательно восстанавливает те же самые подструктуры, но те, у которых наибольший потенциал для этого, должны быть повторены (например, группа Пуля в скоплении Пуля (*англ.* Bullet Cluster), как обсуждается ниже).

Это значит, что многократные реализации метода, сравнение результатов этих реализаций и отбор по ним оптимальных наборов входных параметров приводят к выделению устойчивых подструктур, увеличивают точность результата, при этом минимизируя его стохастичность, и могут значительно улучшить воспроизводимость реальных групп галактик.

Критерием оптимальности работы метода была выбрана воспроизводимость группы галактик Пуля, а также выделение подструктур, описанных в работе (Benavides et al., 2023).

Оптимальные наборы параметров, найденные при тестировании метода на хорошо изученном скоплении Пуля, дают возможность применить метод DS+ к малоизученному скоплению CL0238.3+2005 для выделения в нём гравитационно-связанных подструктур.

ТЕСТИРОВАНИЕ РАБОТЫ МЕТОДА НА СЛИВАЮЩЕМСЯ СКОПЛЕНИИ ПУЛЯ

В качестве примера скопления для тестирования метода DS+ было выбрано хорошо изученное сливающееся скопление Пуля (1E0657-558).

По данным, указанным авторами работы (Benavides et al., 2023), среднее красное смещение скопления Пуля $z = 0{,}2965 \pm 0{,}0003$, вириальный радиус $r_{200} = 2{,}13$ Мпк.

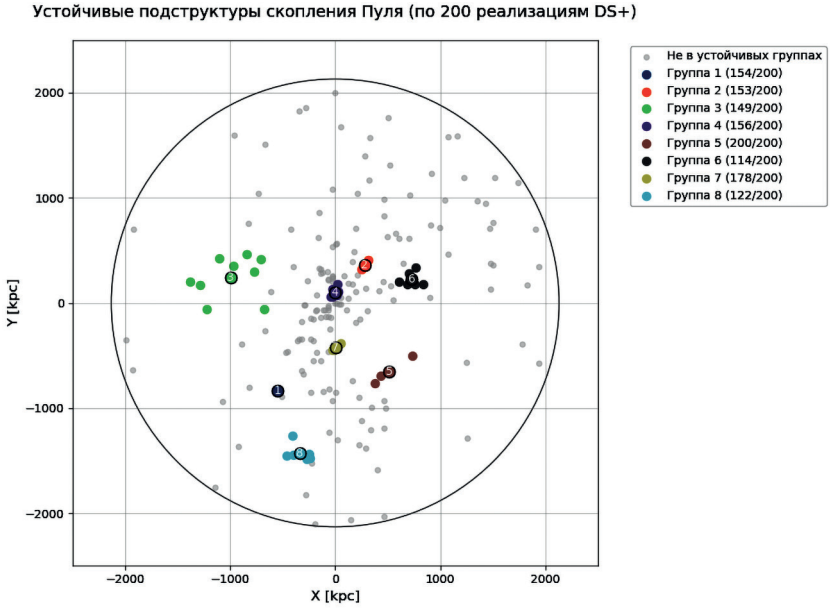


Рис. 2. Иллюстрация работы метода DS+ на скоплении Пуля. Группа 6 — Пуля. Большой серый круг иллюстрирует размер скопления и имеет радиус $r_{200} = 2{,}13$ Мпк

В ходе тестирования входных параметров при многократных реализациях метода было выделено и исследовано несколько наборов параметров, на которых большинство галактик группы Пуля воспроизводится. На данных наборах параметров стохастичность метода сведена к нулю, наблюдается устойчивое поведение алгоритма, а также стабильное выделение группы галактик Пуля.

На рис. 2 представлены результаты анализа воспроизводимости скопления Пуля.

В скоплении галактик Пуля всего выделяется восемь гравитационно-связанных подструктур. Однако в рентгеновском диапазоне и по данным слабого линзирования однозначно можно говорить только о наличии двух компонент (Clowe et al., 2006). Тем не менее, маломассивные группы могут быть реальными гравитационно-связанными структурами и не давать при этом существенного вклада в рентгеновское излучение от всего скопления и в карту распределения массы.

Также важно отметить, что в работе (Benavides et al., 2023) было обнаружено восемь наиболее достоверных (значимых) групп в скоплении Пуля, что согласуется с полученным результатом.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА DS+ К СКОПЛЕНИЮ CL0238.3+2005

В недавней работе (Lyskova et al., 2025) были представлены результаты рентгеновских наблюдений массивного ($\sim 10^{15} M_0$) и горячего ($kT \sim 10$ keV) скопления CL0238.3+2005, которое, как и скопление Пуля, находится в стадии слияния, о чём свидетельствует сравнение рентгеновских и оптических данных. Авторы работы (Lyskova et al., 2025) идентифицируют две сливающиеся подструктуры в этом скоплении.

Отметим, что для CL0238 на момент написания настоящей работы недоступны измерения спектроскопических красных смещений, имеются только фотометрические оценки для ~100 галактик в скоплении (Wen et al., 2024). Распределение лучевой скорости и положение галактик на небе относительно ярчайшей галактики скопления представлены на рис. 3. Характерная ошибка на фотометрические красные смещения галактик в скоплении CL0238 составляет $\Delta z = 0{,}04$, что означает типичную ошибку на лучевую скорость $\Delta V \approx 8000$ км/с на красном смещении скопления. Таким образом, неопределённость в лучевой скорости сравнима со значениями лучевой скорости в данной системе, что делает невозможным точный анализ. Однако, если фотометрические красные смещения в среднем правильные, то выделение гравитационно-связанных подструктур возможно.

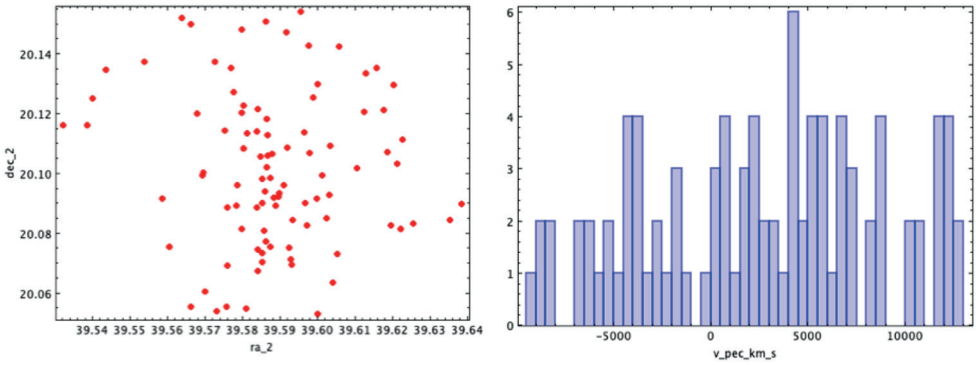


Рис. 3. Карта галактик скопления CL0238.3+2005 (*слева*);
гистограмма скорости (*справа*)

Распределение скорости на гистограмме явно не описывается гауссовским, что указывает на то, что скопление находится в стадии слияния.

На рис. 4 показан результат работы метода DS+ на оптимальных наборах параметров, уточнённых в ходе тестирования метода на скоплении Пуля.

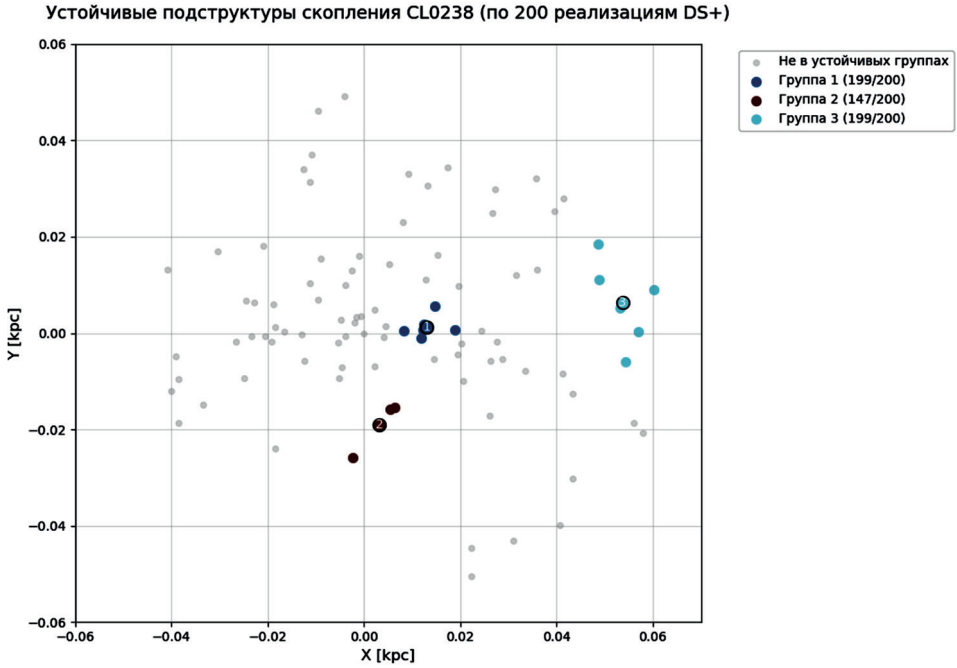


Рис. 4. Иллюстрация работы метода DS+ на скоплении CL0238.3+2005

Методом DS+ были выделены три гравитационно-связанные подструктуры в скоплении галактик CL0238.3+2005 (см. рис. 4) и получены данные о галактиках, находящихся в этих группах. Они сведены в таблицу.

Данные по гравитационно-связанным группам
галактик в скоплении CL0238.3+2005

	Группа 1	**Группа 2**	**Группа 3**
Устойчивость группы, %	99,5	73,5	99,5
Количество галактик в группе	6	3	6
Средняя скорость галактик v, км/с	5869,2+1595,0	1597,5+398,5	7551,1+1710,0
Дисперсия σ, км/с	1747,24	488,02	1873,19

На рис. 5 представлено псевдоцветное изображение скопления галактик CL0238.3+2005. На рис. 5 (*справа*) отмечены галактики, которые принадлежат скоплению CL0238 согласно работе (Wen et al., 2024) и для которых доступны фотометрические оценки красных смещений.

На рис. 6 разными цветами показаны три группы галактик, которые были выделены методом DS+ как гравитационно-связанные подструктуры.

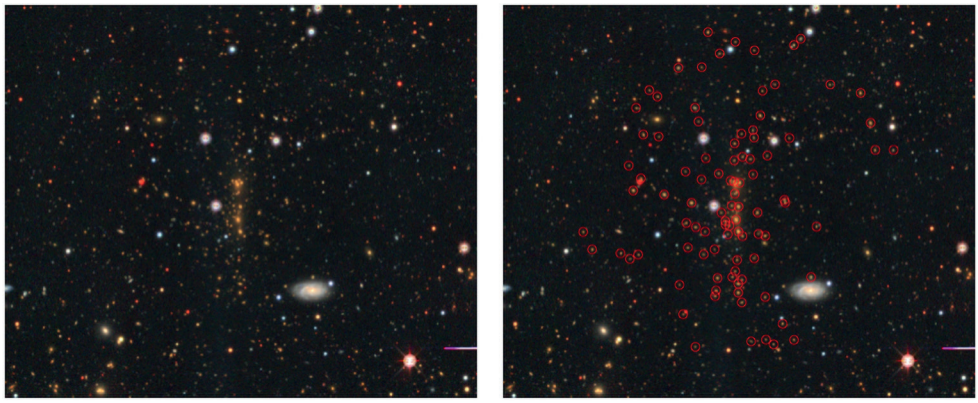


Рис. 5. Псевдоцветное изображение скопления галактик CL0238.3+2005 (*слева*), сформированное по данным обзора DESI (*англ.* Dark Energy Spectroscopic Instrument) в полосах *z*, *r*, *g*; красным цветом (*справа*) обведены галактики, которые принадлежат скоплению CL0238 согласно работе (Wen et al., 2024)

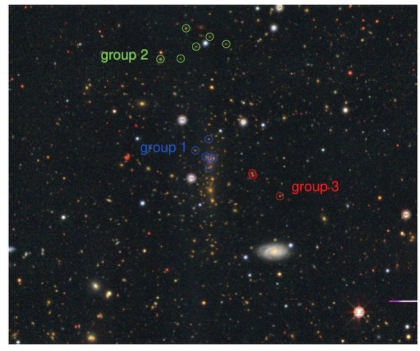


Рис. 6. Изображение скопления галактик CL0238.3+2005, где разными цветами обведены галактики, принадлежащие трём гравитационно-связанным подструктурам согласно таблице

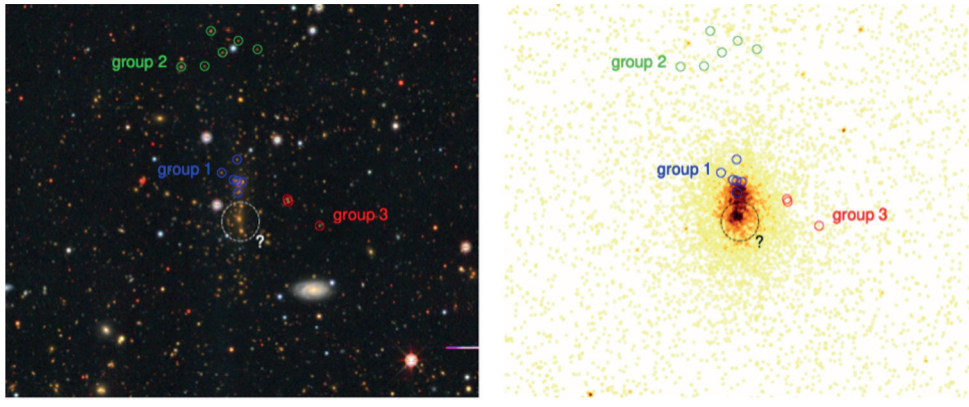


Рис. 7. Белым эллипсом обведены галактики, которые выделил бы человеческий глаз как возможную подструктуру, но алгоритм их не задетектировал (*слева*); рентгеновское изображение скопления с выделенными на основе оптического анализа подструктурами (*справа*)

На рис. 7 справа приведено рентгеновское изображение скопления галактик CL0238.3+2005, на котором можно выделить две области повышенной рентгеновской яркости — на севере и на юге. Группа 1 может быть проассоциирована с северной областью и, скорее всего, является реальной гравитационно-связанной группой.

На рис. 7 слева белым эллипсом обведены галактики, которые выделил бы человеческий глаз как возможную подструктуру, но алгоритм их не задетектировал. Это яркие, а значит, массивные галактики, у которых скорость сильно отличается от группы 1. Соответственно, исходя из оптических и рентгеновских данных, ожидается, что эти галактики должны образовывать гравитационно-связанную подструктуру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведён анализ усовершенствованного метода Дресслера – Шектмана DS+ (Benavides et al., 2023; Dressler, Shectman, 1988), который позволяет на основе информации о положении и скорости галактик в скоплении выделять гравитационно-связанные подструктуры.

Метод DS+ включает в себя ряд вспомогательных параметров, которые оказывают влияние на получаемый результат. Для подбора оптимального набора вспомогательных параметров метод был протестирован на синтетических данных и на хорошо изученном сливающемся скоплении Пуля.

Показано, что «по умолчанию» детектируется значительное количество ложных гравитационно-связанных групп. Этот недостаток может быть устранён усреднением по большому числу реализаций.

Метод DS+ применён к скоплению галактик CL0238.3+2005, для которого доступны фотометрические оценки красных смещений ~100 галактик. Выделены три устойчивые гравитационно-связанные подструктуры, а также охарактеризованы средняя скорость и дисперсия выделенных групп.

ЛИТЕРАТУРА

Adami C., *Biviano A.*, *Durret F.*, *Mazure A.* The build-up of the Coma cluster by infalling substructures // Astronomy and Astrophysics. 2005. V. 443. P. 17–27. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053504.

Benavides J. A., *Biviano A.*, *Abadi M. G.* DS+: A method for the identification of cluster substructures // Astronomy and Astrophysics. 2023. V. 669. Article A147. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245422.

Burenin R. A., *Zaznobin I. A.*, *Medvedev P. S.* Observations of Massive Galaxy Clusters from the All-Sky Survey with the eROSITA Telescope Onboard the SRG Space Observatory // Astronomy Letters. 2022. V. 48.Iss. 12. P. 702–723. DOI: 10.1134/S1063773723010012.

Chincarini G., *Rood H. J.* The structure of the galaxy cluster A 194 // Astrophysical J. 1977. V. 214(351). P. 351–358. DOI: 10.1086/155258.

Clowe D., *Bradač M.*, *Gonzalez A. H.* A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter // Astrophysical J. 2006. V. 648. Iss. 2. P. L109–L113. DOI: 10.1086/508162.

Colless M., *Dunn A. M.* Structure and Dynamics of the Coma Cluster // Astrophysical J. 1996. V. 458. Article 435. DOI: 10.1086/176827.

Cortese L., *Gavazzi G.*, *Boselli A. et al.* Multiple merging in the Abell cluster 1367 // Astronomy and Astrophysics. 2004. V. 425. P. 429–441. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20040381.

Dressler A., *Shectman S. A.* Evidence for Substructure in Rich Clusters of Galaxies from Radial-Velocity Measurements // Astronomical J. 1988. V. 95. Article 985. DOI: 10.1086/114694.

Girardi M., *Demarco R.*, *Rosati P.*, *Borgani S.* Internal dynamics of the z ~ 0.8 cluster RXJ0152.7-1357 // Astronomy and Astrophysics. 2005. V. 442. Iss. 1. P. 29–41. DOI: 10.1051/0004-6361:20053232.

Halliday C., *Milvang-Jensen B.*, *Poirier S. et al.* Spectroscopy of clusters in the ESO Distant Cluster Survey (EDisCS) // Astronomy and Astrophysics. 2004. V. 427. P. 397–413. DOI: 10.1051/0004-6361:20041304.

Lokas E. L., *Wojtak R.*, *Gottloeber S. et al.* Mass distribution in nearby Abell clusters // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. 2006. V. 367(4). P. 1463–1472. DOI:10.1111/j.1365-2966.2006.10151.x.

Lyskova N., *Churazov E.*, *Khabibullin I. et al.* The massive galaxy cluster CL0238.3+2005 (the Peanut cluster) at $z = 0.42$: A merger just after pericenter passage? // Astronomy and Astrophysics. 2025. V. 693. Article A55. 13 p. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202452212.

Wen Z. L., *Han J. L.*, *Yuan Z. S.* A catalogue of merging clusters of galaxies: cluster partners, merging subclusters, and post-collision clusters // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. 2024. V. 532(2). P. 1849–1886. DOI:10.48550/arXiv.2406.00652.

IDENTIFICATION OF GRAVITATIONALLY BOUND SUBSTRUCTURES IN THE FIELD OF THE GALAXY CLUSTER CL0238.3+2005

P. S. Vasileva [1], ***N. S. Lyskova*** [2]

[1] **Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia**
[2] **Space Research Institute RAS, Moscow, Russia**

Identification of substructures in galaxy clusters is an important task for determining the dynamic state of the cluster (whether the cluster is in a quiescent state or undergoing a merger), as well as for refining the characteristics of individual merging components. The objective of this work is to identify possible gravitationally bound substructures in the galaxy cluster CL0238.3+2005 based on information about the positions of galaxies and photometric estimates of redshifts. To identify the substructures, we chose the improved Dressler – Shektman method DS+, which allows one to identify gravitationally bound substructures based on information about the positions and velocities of galaxies in the cluster. The DS+ method includes a number of auxiliary parameters that affect the result. To select the optimal set of auxiliary parameters, the method was tested on synthetic data and on the well-studied merging Bullet cluster. It was shown that a significant number of false gravitationally bound groups are detected "by default". This drawback can be eliminated by averaging over a large number of realizations. The DS+ method was applied to the galaxy cluster CL0238.3+2005, for which photometric redshift estimates of ~100 galaxies are available. Three stable gravitationally bound substructures were identified, and the average velocities and dispersions of the identified groups were characterized.

Keywords: galaxy clusters, kinematics and dynamics

Vasileva Polina Sergeevna — bachelor (applied mathematics and physics)
vasileva.ps@phystech.edu
Lyskova Natalya Sergeevna — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences,
lyskova@cosmos.ru

УДК 524.33 DOI: 10.21046/KMU-2025-72-75

СПОСОБ ПОИСКА НЕИЗВЕСТНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЁЗД

И. Д. Виноградов, Д. В. Денисенко

Образовательный комплекс «Воробьевы горы» Москва, Россия

Предложен способ нахождения неизвестных переменных звёзд, основанный на обзорах неба с помощью разработанного алгоритма. Программа, реализующая алгоритм, написана на сайте ZTF DR23. Она сравнивает минимальную и максимальную яркость звёзд на заданном участке неба. Результатом работы является открытие звезды Vinogradov 1, расположенной в Пегасе. Она оказалась ранее неизвестным вспыхивающим красным карликом типа UV Кита.

Ключевые слова: звёзды, красные карлики, переменные звёзды

В настоящее время существуют разные методы поиска переменных звёзд. Среди них можно выделить визуальный поиск на снимках неба DSS (*англ.* Digitized Sky Survey) и других обзоров (напр., (Nasonov et al., 2024)), метод блинкования изображений с телескопов, а также специализированные программы для автоматического поиска переменности типа VaST (*англ.* Variability Search Toolkit), MuniWin и других. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Первые два способа требуют больших затрат времени, ручного труда и концентрации внимания. А для второго и третьего методов нужны наборы снимков с собственного или арендованного телескопа, что связано с существенными финансовыми затратами. Также эти программы требуют фотографий очень высокого качества.

Целью моей работы было придумать быстрый, эффективный и бесплатный способ поиска переменных звёзд в доступных базах данных, чтобы открыть свою первую переменную звезду и зарегистрировать её в каталоге. Способ заключается в следующем. На сайте ZTF (*англ.* Zwicky Transient Facility) (Masci et al., 2019) формулировался запрос к фотометрической базе данных на языке ADQL (*англ.* Astronomical Data Query Language) (астрономическое расширение SQL, *англ.* Structured Query Language). Эта база содержит фотометрические ряды для почти 2,5 млрд объектов примерно за семь лет работы проекта. Наблюдения проводились с 2018 по 2025 г. на легендарном 48-дюймовом телескопе Паломарской обсерватории (*англ.* Palomar Observatory). В его фокальной плоскости была установлена сборка из шестнадцати ПЗС-матриц (прибор с зарядовой связью) с разрешением 6000×6000 пикселей каждая. Наблюдения ведутся в трёх фильтрах (*g*, *r* и *i*), предельная звёздная величина на снимках в хорошие ночи составляет около 20,5. Данные со снимков делятся на три категории: общие (*англ.* total), хорошие (*англ.* good) и надёжные (*англ.* reliable). По некоторым объектам в базе данных накоплено более 1000 измерений блеска в фильтрах *g* и *r*, но в большинстве случаев есть менее сотни наблюдений.

Для каждого объекта в фотометрической базе данных ZTF приводятся следующие параметры: номер (*англ.* oid, или идентификатор объекта), координаты RA и Dec, фильтр, число общих (*англ.* nobs), хороших (*англ.* ngoodobs) и надёжных (*англ.* ngoodobsrel) измерений блеска в данном фильтре, а также, что самое главное — максимальная и минимальная звёздные величины (maxMag и minMag) со среднеквадратичной ошибкой измерений. Идея метода состоит в том, чтобы найти звёзды со значительной амплитудой переменности, т. е. с большой раз-

Виноградов Иван Дмитриевич — ученик 9-го класса, vinid@internet.ru
Денисенко Денис Владимирович — педагог дополнительного образования, методист, d.v.denisenko@gmail.com

ницей (maxMag – minMag). При этом очевидно, есть большой риск столкнуться с ошибками измерений, дефектами изображения или движущимися объектами (например, астероидами), которые присутствуют только на одном-двух снимках. Поэтому для наибольшей эффективности метода были установлены следующие ограничения:

1) звезда должна присутствовать как минимум на 80 снимках;
2) медианная звёздная величина должна быть ярче 19,0;
3) амплитуда переменности должна быть больше 1,5 величины.

Этим методом можно найти переменные звёзды с высокой амплитудой изменений блеска, в первую очередь катаклизмические (карликовые новые) или вспыхивающие красные карлики. Поскольку наибольшая амплитуда у таких звёзд наблюдается в зелёных лучах, поиск было решено проводить в фильтре *g*. В результате был сформулирован такой запрос к базе данных ZTF на языке ADQL:

filtercode='zg' AND ngoodobs>80 AND medianMag<19.0 AND
maxMag-minMag>1.5

К сожалению, площадь запроса к базе данных ZTF DR23 ограничена участком неба размером 20×20 угл. мин (квадрат со стороной 1200 угл. с). Таким образом, для проверки одного квадратного градуса надо задать девять запросов со сдвигом центра координат на 20 угл. мин (0,3333°) по прямому восхождению и склонению. На первом этапе работы было проверено 10 таких площадок, и в одной из них нашлась переменная звезда со вспышкой от 19,0 до 16,9 звёздной величины на снимках в фильтре *g* (рис. 1). Проверка на известность производилась в Международном реестре переменных звёзд AAVSO VSX (*англ.* American Association of Variable Star Observers Variable Star IndeX) (Watson et al., 2006) на сайте https://vsx.aavso.org. Она показала, что на момент открытия (17 ноября 2024 г.) звезда не была занесена в каталог.

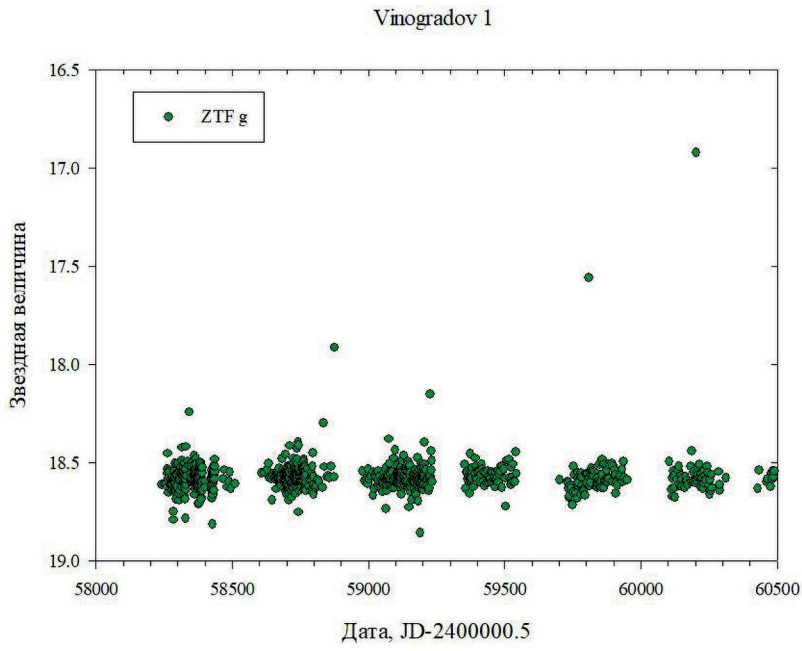


Рис. 1. Кривая блеска переменной звезды Vinogradov 1 по данным проекта ZTF

На рис. 2 показаны три снимка участка неба с сайта проекта ZTF, полученные 13, 15 и 17 сентября 2023 г. Новая переменная звезда находится в центре поля зрения. Видно, что на снимке 15 сентября (20230915) она действительно вспыхнула. Проверка на сайте Центра малых планет MPC (*англ.* Minor Planet Center) показала, что в указанную дату в радиусе 30 угл. мин не было астероидов ярче 20-й звёздной величины. Показатель цвета (*J*-*K*) согласно каталогу 2MASS (*англ.* Two Micron All-Sky Survey) (Skrutskie et al., 2006) равен 0,85. По третьему релизу данных космической обсерватории Gaia (Gaia..., 2022) расстояние составляет 217±3 пс, абсолютная звёздная величина в фотометрической полосе Gaia $M_G = 10{,}0$. Это соответствует красному карлику спектрального класса M. Звезда была зарегистрирована в Международном реестре переменных звёзд под именем Vinogradov 1 как переменная типа UV Кита (вспыхивающий красный карлик). Данные о звезде приведены в таблице.

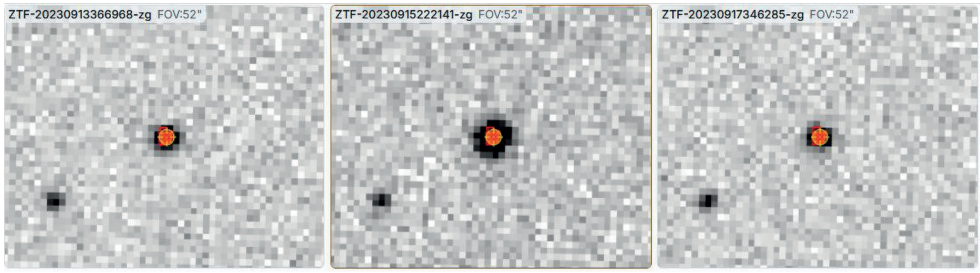


Рис. 2. Изображения звезды Vinogradov 1 в минимуме блеска и во вспышке

Характеристики звезды Vinogradov 1

Координаты (эпоха 2000,0)	22 20 47,95 +33 39 14,3
Созвездие	Пегас
Диапазон изменений блеска	16,9–19,0*g*
Тип переменности	UV

В заключение хочется сказать, что мной были проверены всего лишь около десяти участков неба общей площадью чуть более одного квадратного градуса. Всего же обзором ZTF за семь лет работы охвачено около 30 тысяч квадратных градусов, т. е. примерно три четверти небесной сферы к северу от склонения –30°. Тот факт, что на таком маленьком участке неба была обнаружена вспыхивающая звезда, приводит к выводу, что в базах данных астрономических обзоров до сих пор остаются неоткрытыми тысячи переменных звёзд. Среди них могут скрываться астрофизически ценные объекты редких, а возможно и неизвестных ранее типов.

Работа выполнена в рамках проекта «Центр открытия астрономических объектов» на занятиях кружка «Практическая астрофизика» Московского дворца пионеров (ГБОУ «Воробьевы горы»).

ЛИТЕРАТУРА

Gaia Data Release 3 (Gaia DR3). Part 1. Main source. 2022. https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/I/355.

Masci F. J., *Laher R. R.*, *Rusholme R. et al.* The Zwicky Transient Facility: Data Processing, Products, and Archive // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2019. V. 131. Iss. 995. Article 18003. DOI: 10.1088/1538-3873/aae8ac.

Nasonov D., *Denisenko D.*, *Minkovskiy A.*, *Gusev A.* New Variable Stars Discovered at Moscow Palace of Pioneers. Part 1. Eclipsing Binaries // Peremennye Zvezdy: Prilozhenie. 2024. V. 24. No. 3. DOI: 10.24412/2221-0474-2024-24-3. (= *Насонов Д. С.*, *Денисенко Д. В.*, *Минковский А. Ф.*, *Гусев А. В.* Новые переменные звёзды, открытые в Московском Дворце пионеров. Часть 1. Затменные переменные // Переменные Звёзды (Приложение). 2024. Т. 24. № 3.)

Skrutskie M. F., *Cutri R. M. Stiening R. et al.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // The Astronomical J. 2006. V. 131. Iss. 2. P. 1163–1183. DOI: 10.1086/498708.

Watson C. L., *Henden A. A.*, *Price A.* The International Variable Star Index (VSX) // The Society for Astronomical Sciences 25th Annual Symp. Telescope Sciences. 2006. Article 47.

NEW METHOD OF SEARCHING FOR THE UNKNOWN VARIABLE STARS

I. D. Vinogradov, D. V. Denisenko

State education center "Vorobyovy gory", Moscow, Russia

A method for detecting previously unknown variable stars is presented, based on processing sky surveys using a newly developed algorithm. The script implementing this algorithm is hosted on the ZTF DR23 website. It identifies candidate variable stars by comparing their maximum and minimum magnitudes within a selected region of the sky. As a result of this work, a new variable star—Vinogradov 1—was discovered in the Pegasus constellation. It was found to be a previously unknown flaring red dwarf of the UV Ceti type.

Keywords: stars, red dwarfs, variable stars

Vinogradov Ivan Dmitrievich — 9th grade student, vinid@internet.ru
Denisenko Denis Vladimirovich — teacher of supplementary education, methodist, d.v.denisenko@gmail.com

УДК 621.382 DOI: 10.21046/KMU-2025-76-80

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Е. В. Виноградова, М. А. Юдин

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Проведена оценка радиационной надёжности полупроводниковых интегральных микросхем путём сравнения значений концентрации глубоких уровней.

Ключевые слова: радиационная надёжность, релаксационная спектроскопия, глубокий уровень, концентрация

Радиационная стойкость полупроводниковых материалов и приборов тесно связана с концентрацией глубоких уровней в запрещённой зоне. Создаваемые дефектами и примесями глубокие уровни играют ключевую роль в процессах генерации и рекомбинации носителей заряда, которые напрямую влияют на радиационную стойкость. Чем выше начальная концентрация глубоких уровней, тем больше вероятность их взаимодействия с новыми радиационными дефектами, что может приводить к ухудшению свойств материала. Глубокие уровни действуют как центры рекомбинации, захватывая электроны и дырки, снижая тем самым время жизни носителей заряда и увеличивая скорость рекомбинации. При облучении концентрация содержащихся в образце глубоких уровней увеличивается, ухудшая электрические характеристики прибора за счёт увеличения обратного тока p-n-перехода и снижения коэффициента усиления транзисторов.

В ходе работы исследовались образцы интегральных микросхем IN74VHC02D производства завода «Интеграл» из одной партии методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней.

Метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней позволяет изучать температурную зависимость релаксации ёмкости полупроводниковых структур. Суть метода заключается в том, что в результате подачи импульса напряжения ловушки захватывают носители заряда, а снятие импульса приводит к постепенному высвобождению захваченных носителей, что приводит к изменению ёмкости или тока перехода (Lang,1974) (рис. 1).



Рис. 1. Суть метода релаксационной спектроскопии глубоких уровней

Виноградова Елизавета Владимировна — ассистент, аспирант, tikhonravova.elizaveta@mail.ru
Юдин Максим Андреевич — аспирант, maks-2013.yudin@yandex.ru

В результате исследования были получены частотные сканы образцов, после обработки которых вычислялись ёмкостные параметры релаксации, а именно, амплитуда DLTS-сигнала, постоянная релаксация глубоких уровней, показатель нелинейности и неэкспоненциальность (рис. 2, 3).

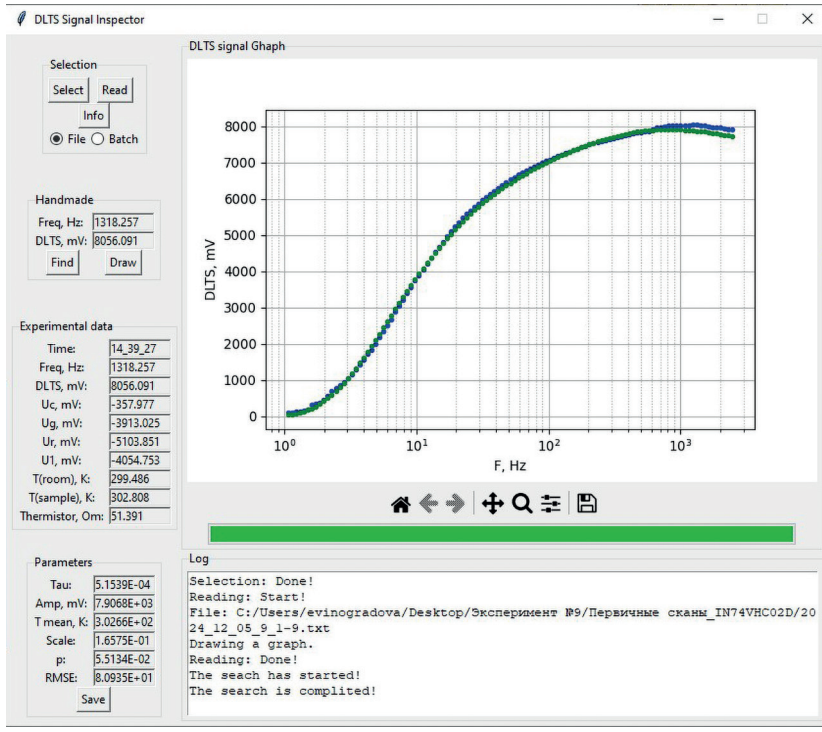


Рис. 2. Обработанный частотный скан для образца № 11 при температуре 303 K

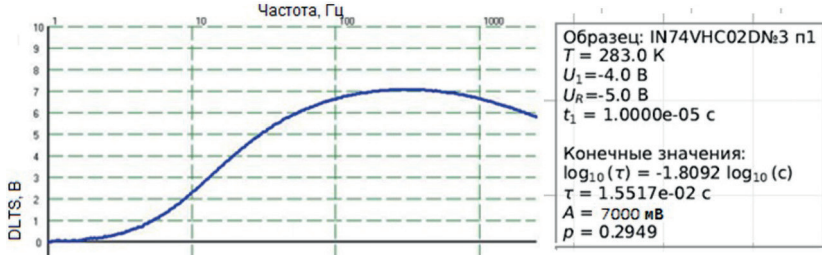


Рис. 3. Частотный скан, полученный для образца № 3 при температуре 283 K

После обработки полученных параметров релаксации по стандарту ASTM F978-02 были построены графики в координатах Аррениуса (ASTM..., 2002) для возможности расчёта энергии активации глубоких уровней (рис. 4, 5).

Полученные значения энергии активации позволили определить концентрацию глубоких уровней образцов путём сравнения углов наклона температурных зависимостей степени ионизации глубоких уровней, полученных для разной концентрации с углом наклона, высчитанным для температурной зависимости амплитуды пиков DLTS-сигнала (*англ.* Deep Level Transient Spectroscopy).

Угол наклона температурной зависимости амплитуды пиков DLTS-сигналов определялся с помощью расчёта первой производной уравнения регрессии, полученного аппроксимацией полиномом второго порядка температурной зависимости амплитуды пиков DLTS-сигналов.

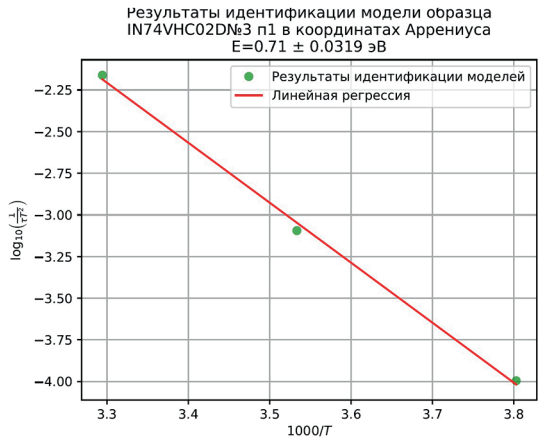


Рис. 4. Результаты идентификации модели образца № 3 в координатах Аррениуса

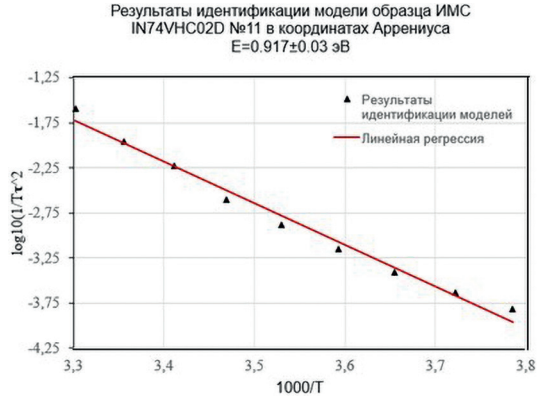


Рис. 5. Результаты идентификации модели образца № 11 в координатах Аррениуса

Определение углов наклона температурных зависимостей ионизированных глубоких уровней проводилось с использованием расчёта первой производной уравнений регрессии, полученных аппроксимацией полиномами второго порядка температурных зависимостей ионизированных глубоких уровней (рис. 6, 7).

Значение концентрации глубоких уровней оказалось ниже у образца № 3 и составило 0,71±0,032 эВ, что свидетельствует о более высокой радиационной стойкости, чем у образца № 11 с концентрацией глубоких уровней, равной 0,917±0,03 эВ.

Для повышения радиационной стойкости электронных компонентов необходимо использовать высококачественные материалы с минимальным количеством примесей и дефектов, а также применять различные методы контроля кристаллической структуры, в том числе релаксационную спектроскопию глубоких уровней, на различных этапах производства.

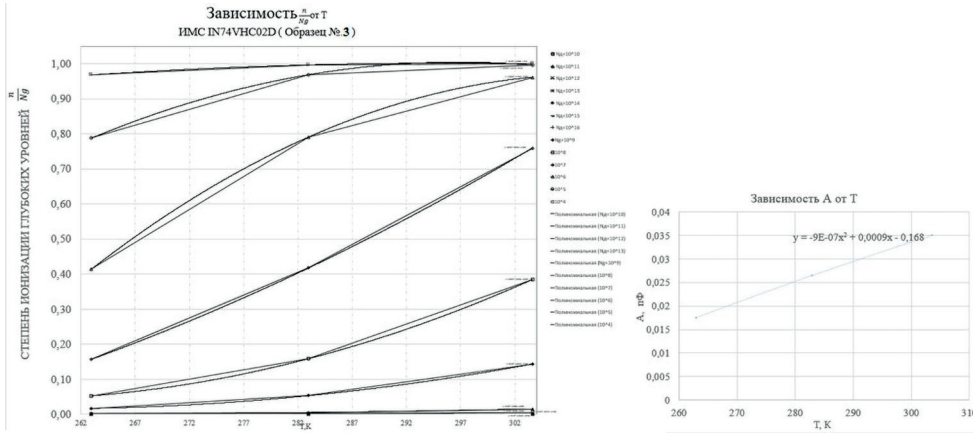


Рис. 6. Определение углов наклонов температурной зависимости амплитуд пиков DLTS-сигналов и температурных зависимостей ионизированных глубоких уровней для образца № 3

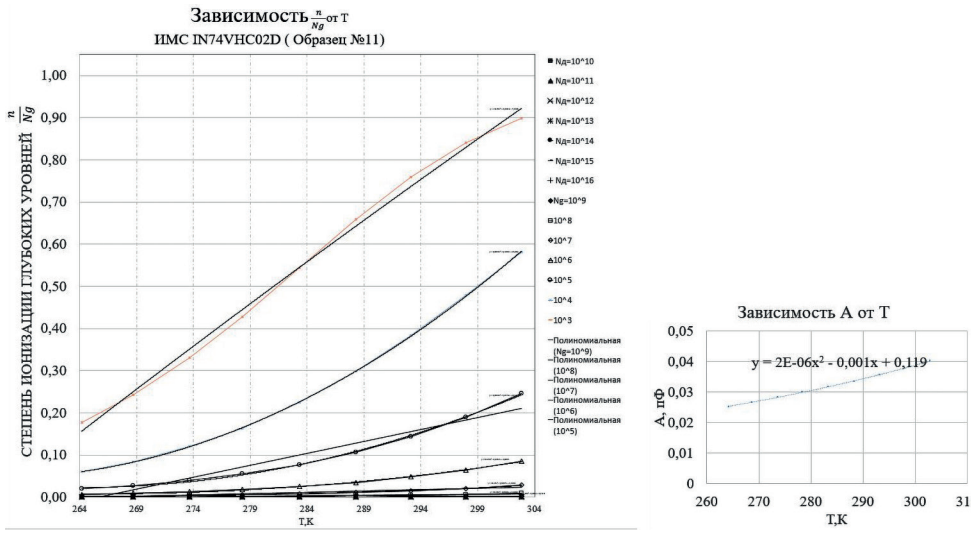


Рис. 7. Определение углов наклонов температурной зависимости амплитуды пиков DLTS-сигналов и температурных зависимостей ионизированных глубоких уровней для образца № 11

ЛИТЕРАТУРА

Lang D. V. Deep level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors // J. Applied Physics. 1974. V. 45. No. 7. P. 3023–3032.

ASTM F 978-02 Standard test method for characterizing semiconductor deep levels by transient capacitance techniques // Annual Book of ASTM Standards. 2002. V. 10.05. P. 489–496.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF DEEP LEVEL CONCENTRATION ON THE RADIATION RESISTANCE OF INTEGRATED CIRCUITS

E. V. Vinogradova, M. A. Yudin

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

The assessment of the radiation reliability of semiconductor integrated circuits was carried out by comparing the values of deep level concentrations.

Keywords: radiation reliability, relaxation spectroscopy, deep level, concentration

Vinogradova Elizaveta Vladimirovna — assistant, postgraduate, tikhonravova.elizaveta@mail.ru
Yudin Maxim Andreevich — postgraduate, maks-2013.yudin@yandex.ru

УДК528.8 DOI: 10.21046/KMU-2025-81-84

ИНТЕГРАЦИЯ ТЕМАТИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ В ИНТЕРЕСАХ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ «ВЕГА-ГИДРО»

М. В. Врублевский, М. А. Бурцев

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Для решения широкого набора задач гидрологии (от мониторинга водных объектов до оценки последствий наводнений) был разработан спутниковый сервис «Вега-Гидро», осуществляющий сбор, хранение и предоставление данных широкого набора спектральных диапазонов, типов, пространственного и временного разрешения, а также имеющий специализированный инструментарий для осуществления комплексного анализа разнородных данных. В рамках реализации информационной системы «Вега-Гидро» был подготовлен программный комплекс получения и интеграции тематических продуктов. В работе описаны интегрируемые продукты, их источник, а также архитектура программного комплекса, осуществляющего опрос, загрузку и подготовку полученных данных для архивации. Описываемые продукты интегрированы в систему и доступны пользователю как для отображения в картографическом интерфейсе, так и для работы с базовым инструментарием системы.

Ключевые слова: гидрология, тематические продукты, «Вега-Гидро», «Вега-Science»

Внутренние водоёмы, выступая основным источником пресной воды, постоянно подвергаются антропогенному воздействию, наблюдение последствий которого активно ведут с помощью методов дистанционного зондирования (см., напр., (Константинова, Лупян, 2020; Трошко и др., 2020; Шинкаренко, Барталев, 2023; Шинкаренко и др., 2024)). Не менее важную роль играют и климатические факторы, тесно связанные с развитием водоёмов, изменения которых можно отслеживать по спутниковым данным (см., напр., (Тихонов и др., 2021; Шинкаренко и др., 2021)).

Для проведения таких работ зачастую используют спутниковые сервисы, такие как «Вега-Science» (Лупян и др., 2021), позволяющие проводить мониторинг наземных экосистем. Для решения широкого набора задач гидрологии (от мониторинга водных объектов до оценки последствий наводнений) был разработан спутниковый сервис «Вега-Гидро» (Бурцев и др., 2024), осуществляющий сбор, хранение и предоставление данных широкого набора спектральных диапазонов, типов, пространственного и временного разрешения, а также имеющий специализированный инструментарий для осуществления комплексного анализа разнородных данных.

Среди множества данных, использующихся для мониторинга внутренних вод, существует большой пласт тематических продуктов, предоставляемый сервисом мониторинга суши «Коперник» CLMS (*англ.* Copernicus Land Monitoring Service, https://land.copernicus.eu), который также предоставляет доступ к результатам обработки. Такие продукты включают: данные о мутности, концентрации хлорофилла *a*, концентрации взвешенного вещества, температуре поверхности озёр, запасе воды в снежном покрове, маски водной поверхности и т. п. Основная информация о продуктах приведена в таблице.

Врублевский Михаил Вячеславович — аспирант, vrublevsky@d902.iki.rssi.ru
Бурцев Михаил Александрович — старший научный сотрудник, кандидат технических наук

Тематические продукты CLMS

Продукт	Глубина архива, годы	Прибор (спутник)	Разрешение	
			Временное	Пространственное
Snow Cover Extent	2018 – наст.	VIIRS (SNPP)	1 день	1 км
Snow Water Equivalent	2006 – наст.	VIIRS (SNPP)		5 км
Lake Surface Water Temperature	2002–2012	AATSR (ENVISAT)	10 дней	1 км
Lake Surface Water Temperature	2016 – наст.	SLSTR_N (Sentinel-3)		
Water Bodies 100m	2020 – наст.	MSI (Sentinel-2)	1 месяц	100 м
Water Bodies 300m	2020 – наст.	MSI (Sentinel-2)		300 м
Lake Ice Extent	2021 – наст.	SLSTR_N (Sentinel-3)	1 день	500 м
Lake Water Quality offline	2002–2012	MERIS (ENVISAT)	10 дней	300 м
Lake Water Quality NRT v1	2016–2024	OLCI (Sentinel-3)		
Lake Water Quality NRT v2	2024 – наст.	OLCI (Sentinel-3)		

Для решения задач мониторинга внутренних водоёмов в сервисе «Вега-Гидро» в рамках текущей работы был подготовлен программный комплекс, осуществляющий сбор, агрегацию и интеграцию тематических продуктов сервиса CLMS.

Архитектура описываемого программного комплекса представлена на рис. 1.



Рис. 1. Архитектура программного комплекса

Первый блок осуществляет опрос каталога за интересующий временной интервал на указанную территорию и формирование очереди загрузки данных. Также модуль реализует загрузку данных с поддержкой очереди и возможностью увеличения числа потоков загрузки при необходимости. Загружаемые данные сохраняются во временном хранилище.

Второй блок предназначен для подготовки данных к архивации с помощью технологии UNISAT (Прошин и др., 2016). Для этого полученные данные обрезаются под территорию интереса, приводятся к необходимому типу данных и формату, автоматически создаётся файл метаданных о продукте, границах территории интереса, источнике данных, спутнике и приборе, с помощью которых получены данные, а также информация о времени наблюдений.

В результате подготовленные данные усваиваются технологией UNISAT в архивы ЦКП (центр коллективного пользования) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) и становятся доступны в информационных системах семейства «Вега». Пример визуализации продукта в интерфейсе системы «Вега-Гидро» показан на рис. 2. Данные тематические продукты в составе сервиса «Вега-Гидро» значительно расширяют возможности специалистов при решении задач гидрологии.

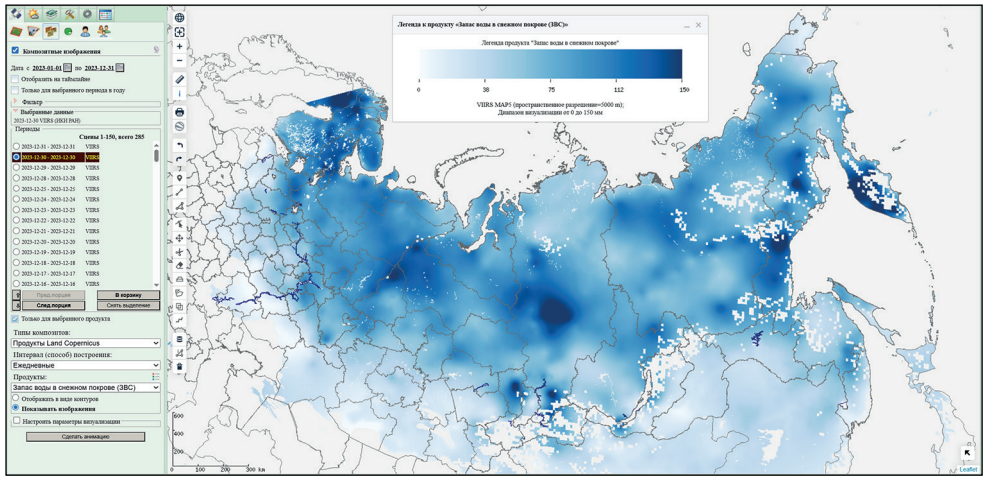


Рис. 2. Продукт «Запас воды в снежном покрове» (на 30.12.2023) в интерфейсе «Вега-Гидро» (в полярной проекции)

Работа выполнена с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» при поддержке Минобрнауки в рамках темы «Мониторинг» (гос. регистрация № 122042500031-8).

ЛИТЕРАТУРА

Бурцев М. А., *Уваров И. А.*, *Лупян Е. А. и др.* «Вега-Гидро» — спутниковый сервис для задач гидрологии // Материалы 22-й Международной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2024. С. 354. DOI: 10.21046/22DZZconf-2024a.

Константинова А. М., *Лупян Е. А.* Анализ последствий прорыва дамбы Сардобинского водохранилища 1 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 261–266. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-261-266.

Лупян Е. А., *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Кашницкий А. В. и др.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

Лупян Е. А., *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А. и др.* Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.

Прошин А. А., *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В.*, *Кашницкий А. В.*, *Бурцев М. А.* Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной

для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27.

Тихонов В. В., *Романов А. Н.*, *Хвостов И. В. и др.* Межгодовые вариации собственного микроволнового излучения Обской губы в период ледостава и их связь с гидрологическими и климатическими изменениями региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-185-199.

Трошко К. А., *Денисов П. В.*, *Лаврова О. Ю. и др.* Наблюдение загрязнений реки Амбарной, возникших в результате аварии на ТЭЦ-3 города Норильска 29 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 267–274. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-267-274.

Шинкаренко С. С., *Барталев С. А.* Последствия повреждения плотины Каховской ГЭС на реке Днепр // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 314–322. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-314-322.

Шинкаренко С. С., *Барталев С. А.*, *Берденгалиева А. Н.*, *Выприцкий А. А.* Динамика площадей водоёмов Западного ильменно-бугрового района дельты Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 285–290. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-285-290.

Шинкаренко С. С., *Барталев С. А.*, *Лупян Е. А.* Мониторинг последствий наводнения в Оренбургской области при половодье на реке Урал в 2024 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 339–347. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-339-347.

INTEGRATION OF THEMATIC PRODUCTS FOR THE PURPOSES OF MONITORING WATER BODIES IN THE VEGA-HYDRO INFORMATION SYSTEM

M. V. Vrublevsky, M. A. Bourtsev

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

To solve a wide range of hydrological problems (from monitoring water bodies to assessing the consequences of floods), the satellite service Vega-Hydro was developed. It collects stores and provides data of a wide range of spectral ranges, types, spatial and temporal resolutions, and has specialized tools for complex analysis of heterogeneous data. As part of the development of the information system Vega-Hydro, a software package for obtaining and integrating thematic products was prepared. The work describes the integrated products, its sources, as well as the architecture of the software package that polls, loads and prepares the obtained data for archiving. The described products are integrated into the system and are available to the user both for display in the cartographic interface and for working using the basic tools of the system.

Keywords: hydrology, thematic products, Vega-Hydro, Vega-Science

Vrublevsky Mikhail Vyacheslavovich — postgraduate, vrublevsky@d902.iki.rssi.ru
Bourtsev Mikhail Aleksandrovich — senior researcher, candidate of engineering sciences

УДК 681.515.8 DOI: 10.21046/KMU-2025-85-96

АНАЛИЗ НАСТРОЕК ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА РЕНТГЕНОВСКОГО МОНИТОРА СПИН-Х1-МВН

Д. М. Гамков, М. В. Бунтов, В. А. Арефьев

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

В настоящее время на Международной космической станции (МКС) проводится эксперимент по высокоточной регистрации космического рентгеновского фона (КРФ) Вселенной, осуществляемый с помощью рентгеновского монитора всего неба СПИН-Х1-МВН. Поддержание стабильной температуры рентгеновских детекторов является критически важным фактором для обеспечения высокоточной регистрации КРФ Вселенной. В данной работе рассматривается задача идентификации тепловой модели объекта управления и настройки пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов при изменяющихся температурных условиях окружающей среды на примере активной системы обеспечения теплового режима (АСОТР) СПИН-Х1-МВН. Здесь объектом управления (ОУ) является блок рентгеновского детектора, управляемая и наблюдаемая величина — мощность и температура нагревателей соответственно. Для рассмотрения различных подходов к идентификации математической модели ОУ, расчёта и верификации коэффициентов ПИД-регуляторов разработан программно-аппаратный комплекс испытательного стенда на базе опытного образца СПИН-Х1-МВН, позволяющий моделировать нестационарные внешние температурные условия. С помощью программно-аппаратного комплекса разработана методика для проведения экспериментов по идентификации ОУ непосредственно на МКС и рассчитаны коэффициенты ПИД-регуляторов, удовлетворяющие необходимым требованиям по стабилизации температуры ОУ с учётом существующих ограничений АСОТР.

Ключевые слова: система автоматического управления, система обеспечения теплового режима, идентификация объектов управления, пропорционально интегрально дифференциальный регулятор, эксперимент МВН

На текущем этапе эксплуатации рентгеновского монитора всего неба СПИН-Х1-МВН зафиксированы значительные колебания температуры посадочных мест детекторов. Эти колебания обусловлены выраженной двухпериодичной переменностью внешнего теплового воздействия — орбитальной (связанной с изменением положения станции относительно Солнца) и годовой (связанной с изменением угла наклона между плоскостью вращения МКС вокруг Земли и направлением на Солнце) (Сербинов и др., 2022). В результате, параметры теплового режима выходят за оптимальный диапазон, что оказывает негативное влияние на работу рентгеновских детекторов.

Для обеспечения требуемого температурного режима детекторов в пределах ± 2 °C при заданной температуре -20 °C необходимо корректно настроить работу системы обеспечения теплового режима, реализованную в приборе СПИН-Х1-МВН.

Цель настоящей работы заключается в предварительном анализе и настройке пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов активной системы обеспечения теплового режима (АСОТР) СПИН-Х1-МВН. Основное внимание здесь уделяется проблеме компенсации нестационарных тепловых возмущений.

Гамков Данила Михайлович — ведущий инженер, аспирант, danila_gamkov@cosmos.ru
Бунтов Михаил Владимирович — начальник лаборатории, buntov@cosmos.ru
Арефьев Вадим Александрович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, arefiev@cosmos.ru

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Разработка программно-аппаратного комплекса (ПАК) испытательного стенда, предназначенного для воспроизведения нестационарных тепловых возмущений и тестирования АСОТР СПИН-X1-МВН КДИ образца.
2. Обработка и анализ телеметрических данных, поступающих из прибора, установленного на МКС, для определения основных характеристик изменяющихся во времени тепловых потоков.
3. Проведение экспериментов для идентификации математической модели объекта управления.
4. Построение модели системы автоматического регулирования с учётом нелинейности и ограничений, а также расчёт оптимальных параметров ПИД-регуляторов.

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ДЕТЕКТОРОВ СПИН-X1-МВН

Система обеспечения теплового режима (СОТР) СПИН-X1-МВН состоит из пассивной термобалансной системы и активной системы термостабилизации.

Термобалансная система включает в себя два оппозитно расположенных профилированных радиаторов, объединенных тепловыми трубами (рис. 1). Основное назначение пассивной системы заключается в обеспечении баланса между приходящими и выходящими тепловыми потоками в условиях сильной двухпериодичной (орбитальной и годовой) переменности облученности поверхности прибора.

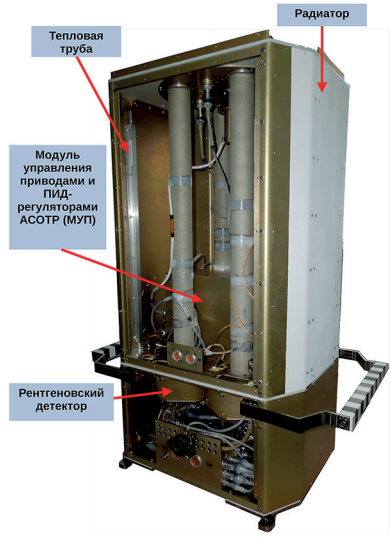


Рис. 1. Система обеспечения теплового режима СПИН-X1-МВН

Для дополнительной компенсации тепловых возмущений используется АСОТР. Данная система состоит из шести распределённых по конструкции СПИН-X1 нагревательных элементов с датчиками термосопротивления и модуля управления приводами (МУП). Программная часть МУП помимо функций управления приводами обеспечивает опрос датчиков температуры (термосо-

противлений), оцифровку показаний датчиков, фильтрацию шумов, алгоритм ПИД-регулирования и формирование управляющих воздействий на нагреватели в виде сигналов широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Блок-схема одного канала управления АСОТР, включающего ПИД-регулятор, исполнительное устройство, датчик температуры и объект управления, представлена на рис. 2.

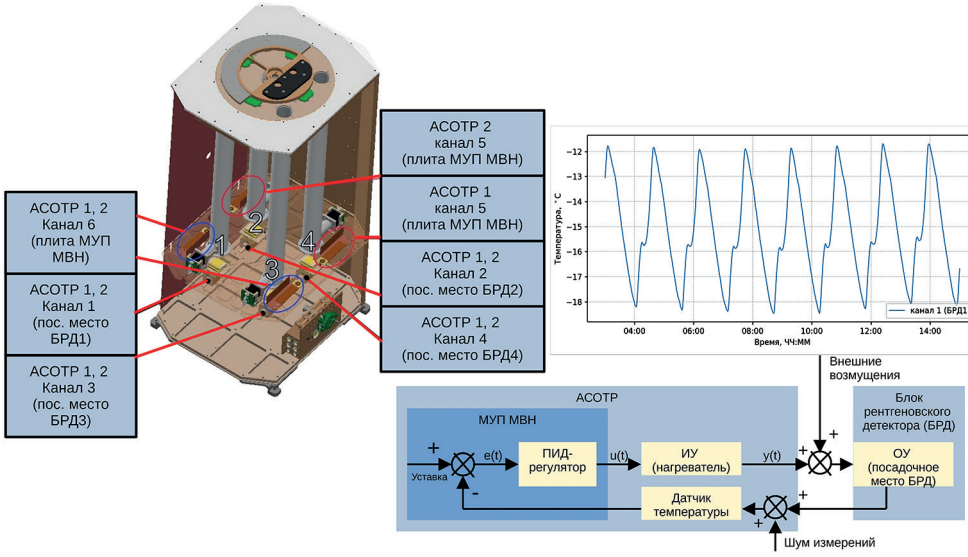


Рис. 2. Активная система обеспечения теплового режима (АСОТР) детекторов СПИН-Х

ПИД-регулятор управляет нагревателем, а датчик температуры снимает показания температуры объекта управления, формируя отрицательную обратную связь. Объектом управления в данной системе регулирования является посадочное место блока рентгеновского детектора (БРД).

Закон ПИД регулирования одного канала АСОТР описывается следующим уравнением в дискретной форме:

$$q[k] = K_p e[k] + K_i \sum_{i=0}^{k} e[i] + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{\Delta t_s},$$

где Δt_s – время дискретизации (период опроса датчика термосопротивления); $q[k]$ — управляющее воздействие на шаге k, выраженное в доле мощности (в %), подаваемой на нагревательный элемент за единицу времени (Δt_s); K_p, K_i, K_d — коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющей соответственно; $e[k]$ — ошибка регулирования, представляющая собой разность между измеренным значением температуры T_k в момент k и заданной величиной температуры (уставкой) T_{set}, $e[k] = T_k - T_{set}$.

На рис. 3 представлена схема ПИД-регулятора, программно реализованного в приборе МУП. Здесь предусмотрено три нелинейных элемента типа «ограничение»:

1) ограничение на значение интегральной составляющей;
2) на значение дифференциальной составляющей;
3) на выходе ПИД-регулятора значением от 0 до 100 % выдаваемой мощности (5 Вт).

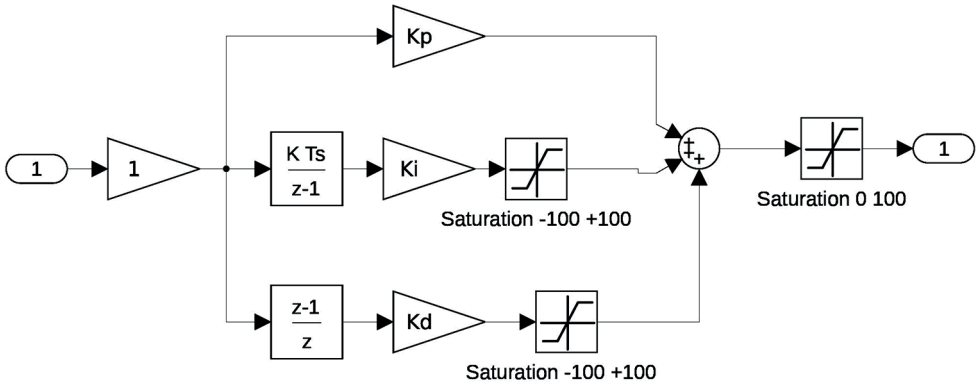


Рис. 3. Блок-схема дискретного ПИД-регулятора, реализованного в МУП

С помощью ограничения на значение интегральной составляющей реализована простейшая защита от интегрального насыщения. Данная реализация ПИД-регулятора является нелинейной, что накладывает свои ограничения на применение методов аналитической настройки ПИД-регуляторов, которые, как правило, подходят для классических ПИД-регуляторов (Сидорова, 2012; Obika, Yamamoto, 2005).

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА АСОТР КДИ СПИН-Х1-МВН

Для анализа работы АСОТР в различных условиях реализована система управления экспериментом, представляющая собой программно-аппаратный комплекс испытательного стенда КДИ СПИН-Х1-МВН (рис. 4).

Для моделирования внешних периодических температурных возмущений в экспериментальной установке используется саморегулируемый нагревательный элемент (СНЭ) (Бунтов и др., 2022). С целью обеспечения надёжного теплового контакта СНЭ зафиксирован в непосредственной близости от нагревателя АСОТР с применением термопасты (см. рис. 4).

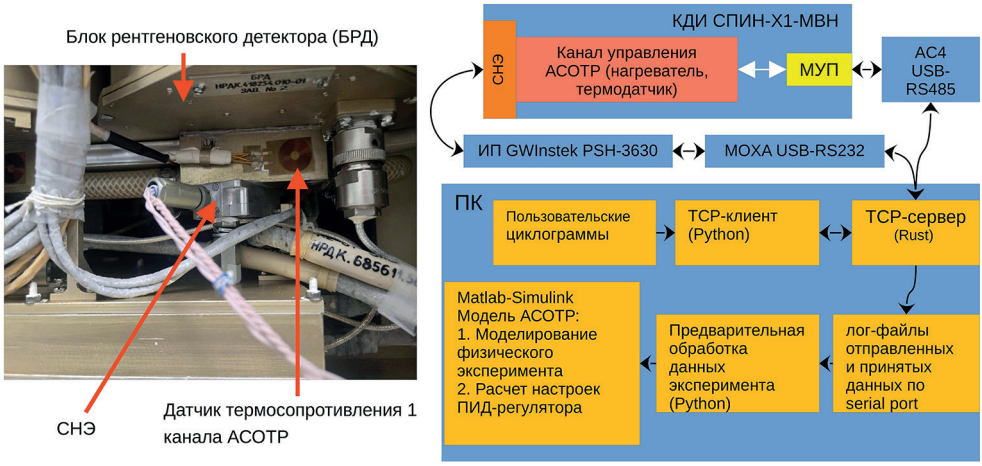


Рис. 4. ПАК испытательного стенда для КДИ СПИН-Х1-МВН

При разработке ПАК выбрана клиент-серверная архитектура, обеспечивающая независимость как от операционной системы, так и соответствующего стека технологий, применяемых при реализации отдельных программных компонентов.

В качестве межпрограммного интерфейса используется TCP-сервер, предоставляющий простой текстовый командный протокол, с помощью которого осуществляется управление приборами через последовательный интерфейс (COM-port). Связь с МУП и СНЭ осуществляется с использованием преобразователей интерфейсов USB-RS232 MOXA UPort 1150I и USB-RS485 AC4 соответственно.

TCP-клиенты, подключающиеся к серверу, с помощью встроенного интерпретатора команд выполняют синтаксический разбор управляющих команд, записанных в пользовательских циклограммах.

В процессе работы TCP-сервер формирует log-файлы, содержащие временные массивы данных с информацией о взаимодействии с приборами. Далее модули-анализаторы извлекают и обрабатывают информацию из log-файлов, формируя предварительно обработанные данные. Эти данные используются для уточнения математической модели системы АСОТР и для расчёта оптимальных коэффициентов ПИД-регуляторов.

С помощью ПАК испытательного стенда КДИ СПИН-Х1-МВН последовательно реализованы следующие этапы, необходимые для оптимальной настройки ПИД-регуляторов:

1. Идентификация ОУ в условиях имитации переменности внешних тепловых потоков с целью создания модели АСОТР.
2. Предварительная ручная настройка ПИД-регуляторов.
3. Расчёт и верификация коэффициентов ПИД-регуляторов.

Для имитации невесомости тепловых труб СПИН-Х1 был переведён в горизонтальное положение. Все эксперименты с КДИ СПИН-Х1 проводились в нормальных физических условиях с колебанием окружающей температуры в пределах ±1 °С.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСОТР КДИ СПИН-Х1-МВН

Для построения математической модели АСОТР с целью дальнейшего анализа её динамических характеристик и оптимизации коэффициентов ПИД-регуляторов необходимо провести процедуру идентификации ОУ.

В данной работе для описания математической модели ОУ используется модель, представленная в виде передаточной функции преобразования Лапласа выходного сигнала к преобразованию Лапласа входного сигнала при нулевых начальных условиях. Для идентификации модели ОУ выбрано ступенчатое воздействие и прямоугольный импульс. Такой выбор обусловлен тем, что реакция ОУ на такие простые с точки зрения технической реализации воздействия позволяет построить модель, достаточную для настройки ПИД-регулятора в некоторой окрестности точки регулирования (Åström, Hägglund, 1995).

Ввиду того, что внешние температурные возмущения на ОУ на поверхности МКС невозможно устранить, для проведения эксперимента по ступенчатой переходной характеристике была разработана специальная экспериментальная методика, включающая в себя следующие положения (рис. 5):

1) начало ступенчатого воздействия приходится на середину фазы остывания и продолжается в течение 25 мин, когда направление внешнего теплового потока остаётся постоянным.
2) подача прямоугольного импульса длительностью 120 с производится также в середине фазы остывания. Для исключения влияния остаточных

тепловых эффектов от предыдущего воздействия должна быть выдержана пауза в течение одного термоцикла.

Подача прямоугольного импульса используется в целях верификации модели, полученной по реакции на ступенчатое воздействие.

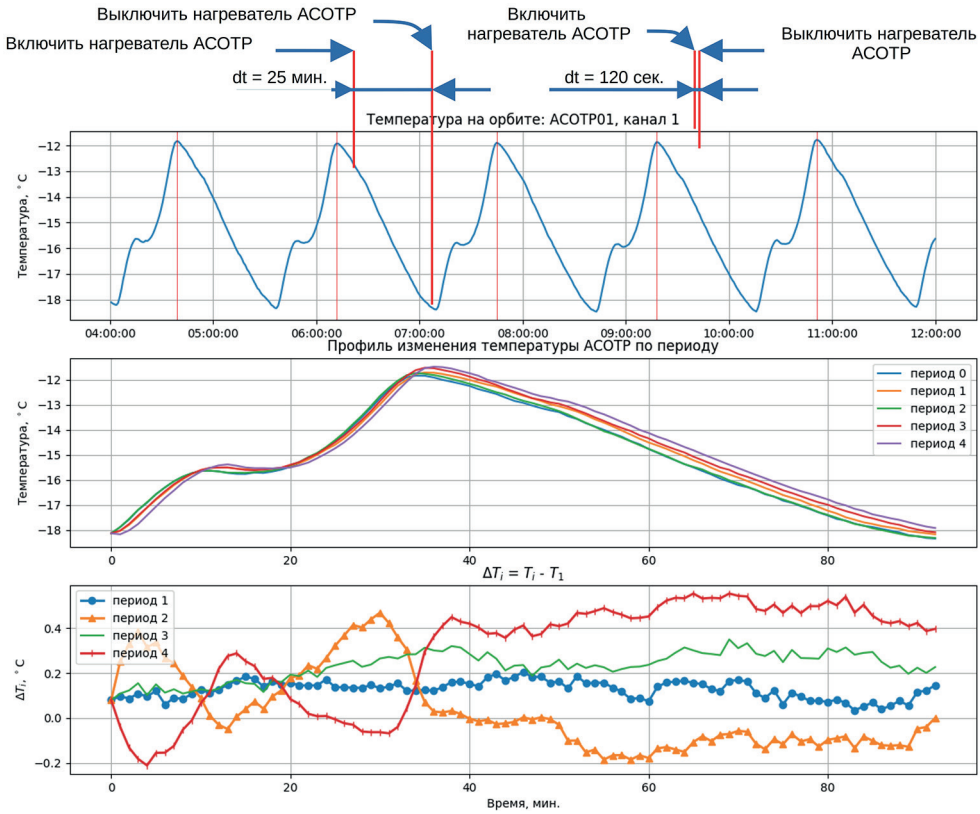


Рис. 5. Методика проведения экспериментов по идентификации ОУ

После получения телеметрических данных, предлагается метод обработки, основанный на вычитании температуры двух смежных орбитальных периодов для нахождения искомой переходной характеристики. Как показывает анализ данных (см. рис. 5, нижний график), температурные условия в соседних орбитальных термоциклах (равных обращению МКС вокруг Земли) слабо различаются, особенно в фазе остывания. Это позволяет провести дополнительную нормировку и смещение одной из температурных кривых относительно другой, что повышает точность восстановления переходной характеристики.

На рис. 6*б* представлен результат наземного эксперимента по подаче ступенчатого воздействия на первый канал АСОТР КДИ СПИН-Х1-МВН. Эксперимент в максимально возможной степени воспроизводит условия, ожидаемые при проведении аналогичного эксперимента, который планируется в ближайшее время на орбите. В результате вычитания термоциклов была получена реакция на ступенчатое воздействие (см. рис. 6*а*). Полученная реакция на ступенчатое воздействие полностью совпадает с реакцией, полученной в стационарных тепловых условиях в пределах погрешности измерений (см. рис. 6*в*).

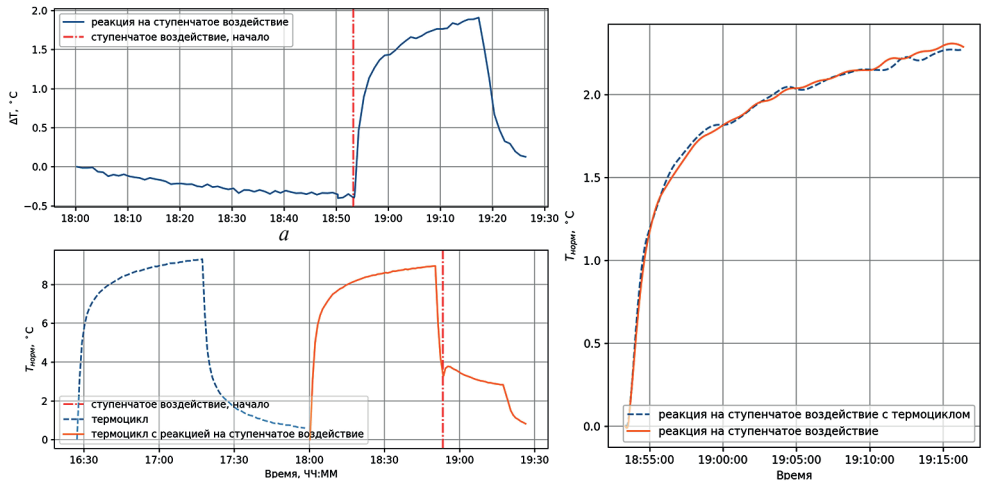


Рис. 6. Эксперимент по подаче ступенчатого воздействия на 1 канал АСОТР КДИ СПИН-Х1-МВН в условиях моделирования термоциклов

Параметрическая и структурная идентификация ОУ была выполнена с использованием инструмента System Identification в среде MatLab. Для тепловых процессов, как правило, характерна апериодическая динамика, т. е. передаточная функция ОУ не должна содержать комплексно-сопряжённые полюса. Это означает, что все корни характеристического уравнения должны быть вещественными и отрицательными. Поскольку для настройки ПИД-регулятора, как правило, используются простые модели, класс структурных динамических моделей для последующей параметрической идентификации был ограничен следующими тремя передаточными функциями:

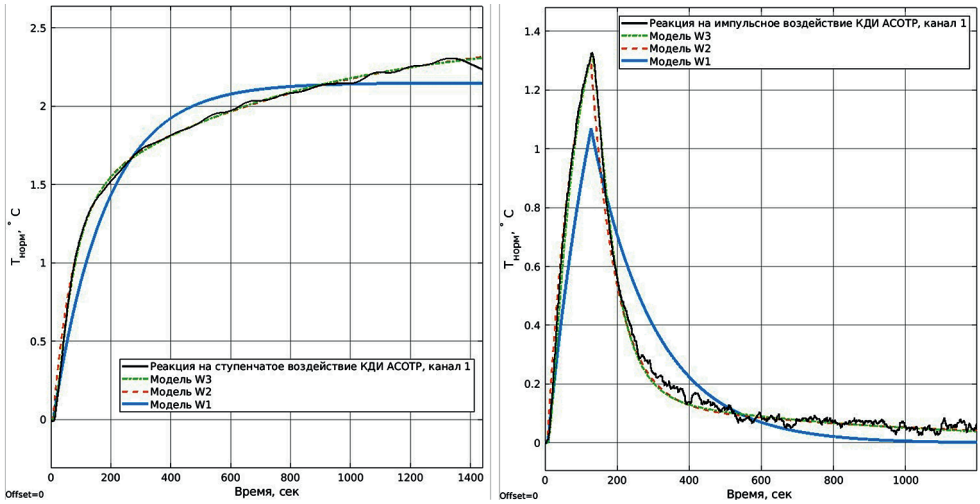
$$W_1(s)=\frac{b_0}{a_1 s+a_0}e^{-T_d s},\quad W_2(s)=\frac{b_1 s+b_0}{a_2 s^2+a_1 s+a_0}e^{-T_d s},$$

$$W_3(s)=\frac{b_1 s+b_0}{s^3+a_2 s^2+a_1 s+a_0}e^{-T_d s},$$

где T_d — транспортная задержка, обусловленная конечной скоростью распространения тепловой энергии и наличием физического расстояния между нагревателем и датчиком термосопротивления.

Параметрическая идентификация моделей $W_1(s)$, $W_2(s)$, $W_3(s)$ проводилась методом градиентного спуска путём аппроксимации экспериментальной переходной характеристики, полученной ранее (см. рис. 6*а*). Анализ моделей показал следующее (рис. 7):

1. Модель W_1 не позволяет достоверно воспроизвести ни наклон начального участка переходной характеристики, ни установившееся значение. Отсутствует характерная инерционность ОУ.
2. Модель W_2 улучшает согласование по форме, но по-прежнему не позволяет точно аппроксимировать начальный участок отклика ОУ.
3. Модель W_3 наилучшим образом описывает экспериментальные данные (точность 96,5 %, FPE = 0,002 (*англ.* Final Prediction Error, ошибка предсказания).



а *б*

Рис. 7. Результат идентификации по отклику на ступенчатое воздействие (*а*) и валидация моделей по отклику на прямоугольный импульс (*б*)

В результате проведённого анализа в качестве модели ОУ выбрана передаточная функция W_3 в виде апериодического устойчивого звена с транспортной задержкой:

$$W(s) = \frac{0{,}002191s + 5{,}244e - 06}{s^3 + 0{,}1042s^2 + 0{,}001666s + 2{,}133e - 06} e^{-5s}.$$

НАСТРОЙКА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ АСОТР КДИ СПИН-Х1-МВН

Для оптимизации настроек ПИД-регулятора АСОТР КДИ СПИН-Х1-МВН был использован генетический алгоритм (функция GA в MatLab). Данный алгоритм широко используется при решении некоторых инженерных задач оптимизации, в том числе для расчёта коэффициентов ПИД-регуляторов в реальных системах управления, обладающих нелинейностью и ограничениями (Joseph et al., 2022).

Одним из ключевых этапов оптимизации с помощью GA является задание функции приспособленности (*англ.* fitness function) J, представляющей собой функцию от нескольких параметров $x_1, x_2, ...$, подлежащих оптимизации с целью минимизации значения $J(x_1, x_2, ...)$. Данная функция служит основным инструментом оценки степени соответствия каждой отдельной особи популяции (представляющей собой набор параметров $x_1, x_2, ...$) в процессе эволюционного отбора наименьшему значению $J(x_1, x_2, ...)$. Функцию приспособленности обычно задают с помощью выбранного критерия оптимизации (Li et al., 2005).

Также необходимым условием для работы GA является определение граничных значений изменения коэффициентов ПИД-регулятора.

Дифференциальный коэффициент (K_d) ограничен сверху значением 2000 на основании статистического анализа измеренного шума показаний датчика термосопротивления при стационарных внешних температурных условиях.

Пропорциональный коэффициент K_p ограничен значением 700 экспериментально по модели АСОТР путём постепенного увеличения коэффициента K_p до тех

пор, пока не будут наблюдаться устойчивые колебания температуры в окрестности уставки температуры, что говорит о приближении АСОТР к границе области устойчивости.

Исходя из основных требований к работе БРД, изложенных во введении, целью ПИД-регулятора АСОТР является поддержание заданной температуры ОУ в диапазоне −20±2 °С и компенсация внешних возмущений.

С помощью первичных экспериментов, произведённых с использованием ПАК испытательного стенда КДИ СПИН-Х1-МВН, осуществлена предварительная эмпирическая настройка коэффициентов ПИД-регулятора и выяснилось следующее (рис. 8):

1. Интегральная составляющая K_i в текущей реализации приводит к накоплению ошибки при больших внешних возмущениях и замедляет реакцию регулятора, поэтому она должна быть устранена.
2. Предположение о возможности эффективного уменьшения амплитуды термоциклов за счёт применения Д-регулятора не подтвердилось ввиду того, что при больших значениях K_d из-за высокой чувствительности к шуму измерений наблюдается чрезмерно активная реакция регулятора не только в фазе остывания, но и в фазе нагрева. Такое поведение является крайне нежелательным, поскольку приводит к избыточному нагреву ОУ.
3. Полное подавление даже малых внешних возмущениях (с размахом >3 °С) невозможно при текущем уровне мощности нагревателя (5 Вт) в нормальных физических условиях.

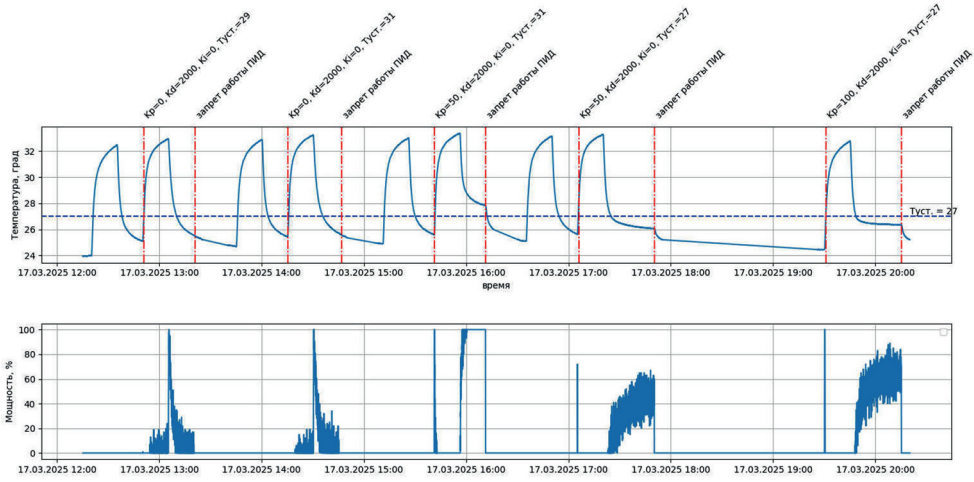


Рис. 8. Эксперименты по настройке ПИД-регулятора на 1 канале АСОТР КДИ СПИН-Х1

Для повышения точности регулирования в фазе охлаждения, когда уставка температуры выше, чем измеренная температура, был предложен модифицированный критерий оптимизации — положительная интегральная квадратичная ошибка IPSE (*англ.* Integral Positive Squared Error):

$$J = \int_0^T e_p^2(t)\,\mathrm{d}t, \quad e_p(t) = \begin{cases} e(t), & e(t) \geqslant 0, \\ 0, & e(t) < 0, \end{cases}$$

где T — время моделирования; e_p — положительное значение ошибки регулирования.

Для определения оптимальных коэффициентов осуществлено несколько запусков алгоритма GA на модели АСОТР с различными начальными условиями и настройками (таблица).

Результат работы алгоритма GA

№ запуска GA	Кол-во поколений	Особей/ поколение	Критерий оптимизации (fitness function)	Время расчёта, с	Рассчитанные коэффициенты ПИД (K_p; K_i; K_d)
1	30	50	ISE	3150	878; 0; 1137
2	20	100	IPSE	4200	615; 0,00115; 1300
3	20	100	IPSE	4200	690; 0; 1824
4	30	300	IPSE	18900	693; 0,002910; 1115

Примечание: ISE — *англ.* Integral Square Error.

Параметры границ поиска: $K_p \in [0;700]$, $K_i \in [0;2]$, $K_d \in [0;2000]$, $T_{set} = 1{,}5$ °C, амплитуда возмущений 1,5 °C.

Из данных таблицы видно, что поверхность целевой функции характеризуется наличием нескольких локальных минимумов. При этом наблюдается характерная особенность генетического алгоритма — склонность к преждевременной сходимости, приводящей к «застреванию» в локальных экстремумах.

В качестве итогового решения были выбраны следующие коэффициенты ПИД-регуляторов, обеспечивающие оптимальное расстояние от установленных граничных условий: $K_p = 615$; $K_i = 0{,}000115$; $K_d = 1300$.

Дальнейшие эксперименты на испытательном стенде КДИ СПИН-Х1-МВН (рис. 9) подтвердили корректность настройки ПИД-регулятора: перерегулирование отсутствует, а среднеквадратическое отклонение температуры в фазе остывания составляет менее 1 °C.

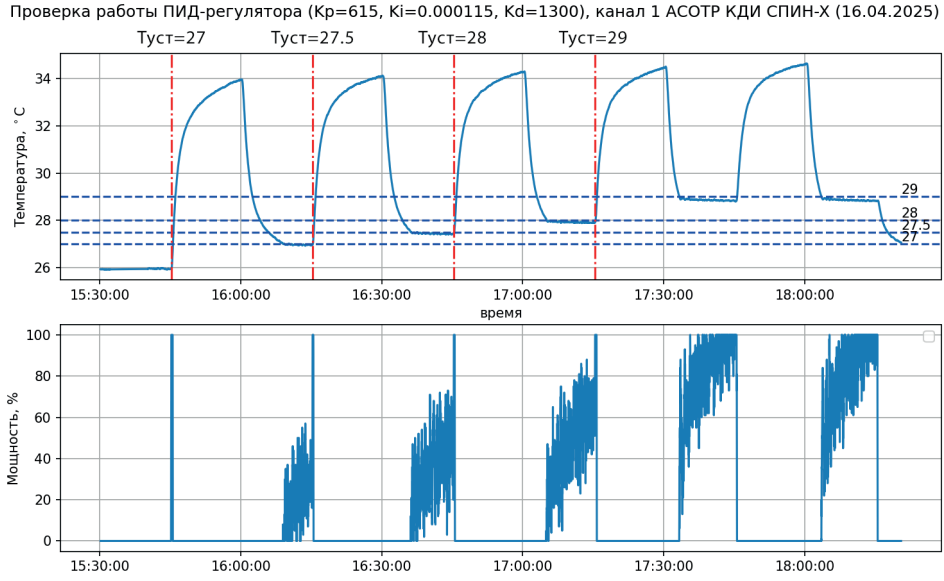


Рис. 9. Проверка работы ПИД-регулятора для канала 1 АСОТР КДИ СПИН-Х1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы реализован программно-аппаратный комплекс испытательного стенда для инженерного образца АСОТР СПИН-X1, с помощью которого осуществлены следующие задачи:

- экспериментально смоделированы внешние возмущающие воздействия;
- проверены различные гипотезы, касающиеся возможности уменьшения амплитуды термоциклов, а также проведена оценка возможностей АСОТР по компенсации внешних возмущений;
- предложена и опробована методика идентификации ОУ в условиях нестационарных внешних воздействий;
- произведена валидация коэффициентов ПИД-регулятора, рассчитанных с помощью метаэвристического метода (GA).

Описанные выше результаты необходимы для безопасного проведения экспериментов по подаче тестовых воздействий и уточнения математической модели ОУ для АСОТР лётного СПИН-X1, осуществляющего научную миссию на МКС.

По результатам проведённого моделирования ожидается, что алгоритм ПИД-регулирования АСОТР из-за достаточно малой мощности нагревателей (5 Вт) сможет полностью компенсировать только относительно малый размах колебаний температуры (до 3 °C в нормальных физических условиях).

ЛИТЕРАТУРА

Бунтов М. В., *Присташ А. М.*, *Семена Н. П.*, *Липилин В. А.* Патент на полезную модель № 211199 РФ, B64G 1/50 (2006.01), G05D 23/19 (2006.01), H05B 3/02 (2006.01). Опубл. 25.05.2022. Бюл. № 15.

Сербинов Д. В., *Семена Н. П.*, *Семена А. Н. и др.* Монитор всего неба для высокоточного измерения космического рентгеновского фона с борта МКС // Письма в Астрон. журн. 2022. Т. 48. № 4. С. 243–264. DOI: 10.31857/S0320010822040052.

Сидорова А. А. Определение наиболее эффективного метода настройки ПИД-регулятора // Проблемы информатики. 2012. № 5. С. 143–150. EDN: RBJHZF.

Åström K. J., *Hägglund T.* PID controllers, Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1995. 343 p.

Joseph S., *Dada E.*, *Abidemi A. et al.* Khammas Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: review, approaches and open problems // Heliyon. 2022. V. 8. No. 5. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09399.

Li Jie, *Xie Jian-ying*, *Wu Zheng-mao.* Design of Disturbance Rejection PID Controllers for Time Delay System Based on Genetic Algorithms // 2005 Intern. Conf. Neural Networks and Brain. 2005. P. 876–880. DOI: 10.1109/ICNNB.2005.1614761.

Obika M., *Yamamoto T.* An evolutionary design of robust PID controllers // IEEE Interna. Conf. Mechatronics and Automation. 2005. V. 1. P. 101–106. DOI: 10.1109/ICMA.2005.1626530.

ANALYSIS PID REGULATOR SETTINGS OF THE THERMAL CONTROL SYSTEM OF THE SPIN-X1-MVN X-RAY MONITOR

D. M. Gamkov, M. V. Buntov, V. A. Arefiev

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

A space experiment is currently being conducted aboard the International Space Station (ISS) to perform high-precision measurements of the cosmic X-ray background (CXB) using the SPIN-X1-MVN all-sky X-ray monitor. Maintaining a stable temperature of the X-ray detectors is a critical requirement for ensuring high-precision registration of the CXB. This study considers the problem of identifying the thermal model of the plant and tuning PID controllers under varying external temperature conditions using the active thermal control system (ATCS) of SPIN-X1-MVN as a case study. In this context, the plant is the X-ray detector unit, with power as the controlled input and temperature as the observed output. To explore various approaches to system identification and PID parameter tuning and validation, a hardware-in-the-loop experimental testbed has been developed based on an engineering model of the SPIN-X1-MVN. This setup enables the simulation of non-stationary external thermal conditions representative of the space environment. Using this testbed, a methodology has been developed for conducting system identification experiments directly onboard the ISS, and PID controller parameters have been calculated that meet the thermal stabilization requirements of the detector block, taking into account the physical and functional constraints of the ATCS.

Keywords: automatic control system, system identification, thermal control system, proportional integral differential regulator, MVN experiment

Gamkov Danila Mikhailovich — lead engineer, postgraduate, danila_gamkov@cosmos.ru
Buntov Mikhail Vladimirovich — head of laboratory, buntov@cosmos.ru
Arefiev Vadim Alexandrovich — senior research, candidate of physical and mathematical sciences, arefiev@cosmos.ru

УДК 551.515 DOI: 10.21046/KMU-2025-97-103

ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ ПРИЗЕМНОГО ДАВЛЕНИЯ И ВОЛН ХОЛОДА НАД ЕВРАЗИЕЙ ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНОГО СТРАТОСФЕРНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ (СМЕЩЕНИЕ)

А. Г. Головко, Т. С. Ермакова

Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург, Россия

Исследование пяти зимних сезонов (2003/04, 2005/06, 2006/07, 2007/08, 2013/14 гг.) с внезапными стратосферными потеплениями (ВСП) при смещении циркумполярного вихря показало, что их воздействие на тропосферу проявляется с задержкой в 1–2 недели. В отличие от событий расщепления, при смещении вихря полярные антициклоны чаще смещаются в сторону Среднесибирского плоскогорья и Якутии, но редко продвигаются дальше на юг. Волны холода, наблюдаемые через 2–3 недели после ВСП, оказываются менее интенсивными: минимальная температура фиксировалась в Якутске (−49,2 °C) и Тикси (−45,9 °C). Усиление планетарной волны с волновым числом 1 (до 2700 гп. м) (геопотенциальный метр) обычно предшествует потеплению, а планетарная волна с волновым числом 2 (до 1200 гп. м) коррелирует с самим событием ВСП. Синоптический анализ выявил, что устойчивые антициклоны формируют области высокого давления, способствуя аномальному похолоданию. Однако их влияние менее продолжительно и экстремально по сравнению с годами расщепления вихря. Полученные данные важны для уточнения среднесрочных прогнозов погоды в северных регионах России.

Ключевые слова: внезапное стратосферное потепление, смещение циркумполярного вихря, волны холода, синоптический анализ

Внезапное стратосферное потепление (ВСП) — стратосферный феномен преимущественно Северного полушария, наблюдаемый зимой и возникающий в среднем шесть раз за десятилетие. В холодный сезон над полюсом формируется устойчивый полярный стратосферный вихрь — область с сильной западной циркуляцией и низкой температурой. Однако во время ВСП западные ветра за несколько дней ослабевают и сменяются восточными, вместе с тем в стратосфере происходит резкое и быстрое повышение температуры на несколько десятков градусов. Это явление оказывает влияние не только на стратосферу, но и на тропосферу, мезосферу и более высокие слои атмосферы (Baldwin et al., 2021).

В рамках исследования события ВСП были классифицированы на основе их динамических особенностей, с особым вниманием к синоптическим условиям при смещении циркумполярного вихря. Согласно моделированию, проведённому Я. П. Уайтом с соавторами (White et al., 2021), при свободном распространении расщепления циркумполярного вихря баротропная реакция во всей стратосфере и тропосфере происходит практически мгновенно, тогда как при смещении реакция у поверхности проявляется лишь через 1–2 недели. Кроме того, установлено, что приповерхностные аномалии температуры после расщепления циркумполярного вихря оказывают более сильное воздействие на Северную кольцевую моду, чем при смещении (Mitchell et al., 2013). В средних широтах расщепление циркумполярного вихря часто приводит к аномальному похолоданию у поверхности, что влечёт за собой волны холода (Lindsey, 2021). Для повышения точности среднесрочных прогнозов погоды в высоких и средних широтах необходим анализ отклика тропосферы не только при ВСП в целом, но и при различных его видах.

Головко Анастасия Германовна — студент, golovko01@mail.ru
Ермакова Татьяна Сергеевна — доцент, кандидат физико-математических наук
taalika@mail.ru

В работе изучено и описано пять зим: 2003/04, 2005/06, 2006/07, 2007/08, 2013/14 гг.

Данные для средней зональной температуры и среднезональной компоненты ветра, планетарных волн в поле геопотенциальной высоты с волновым числом 1 и 2

Год	Зональная температура и ветер	Амплитуда планетарной волны, гп. м волновое число	
		1	2
2003/04	14–25.12.2003, Δt = 35 K. Ослабление ветра до 0 м/с на 40 км, обращение ветра произошло позже	16.12.2003 = 2400	20.12.2003, 900
2005/06	1) 05–10.01.2006, Δt = 20 K. Ослабление ветра до 10 м/с на 30 км, обращение ветра до 10 м/с на 40 км. 2) 18–20.01.2006, Δt = 20 K. Обращение ветра до 20 м/с на 30 км, до 58 м/с на 40 км	1) 01.12.2005-17.12.2005 = 2100 2) 01.01.2006-10.01.2006 = 3000	–
2006/07	1) 01–03.02.2007, Δt = 20 K. Обращения ветра нет, только ослабление. 2) 23–25.02.2007, Δt = 30 K. Обращение ветра до 20 м/с на 30 км, до 30 м/с на 40 км. На высоте 40 км (температура) и 50 км (ветер): 1) 30.01–02.02.2007, Δt = 20 K. Обращения ветра нет. 2) 17–18.02.2007, Δt = 20 K. Обращение ветра до 30 м/с	1) 16.12.2006 = 3000 2) 01.01.2007 = 3000	16.02.2007, 1050
2007/08	20–22.01.2008, Δt = 45 K. Ветер ослаб до 20 м/с на 30 км, до 0 м/с на 40 км	24.01.2008 = 2400	16.01.2008, 1050
2013/14	02–08.02.2014, Δt = 25 K. Ослабление ветра 30 м/с на 30 км, обращение ветра до 10 м/с на 40 км. На высоте 40 км (температура) и 50 км (ветер): 02–05.02.2014, Δt = 35 K. Обращение ветра до 20 м/с	01.01.2014-01.02.2014, 2000	1) 01–16.01.2014, 1200. 2) 03.02.2014, 1050

В таблице представлены данные для среднезональной температуры и зональной компоненты ветра, планетарных волн (ПВ) в поле геопотенциальной высоты с волновым числом 1 ($ПВ_1$) и 2 ($ПВ_2$) для рассматриваемых зим. При построении таких графиков (графики не представлены) использовались данные реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2). В исследовании для определения планетарных волн применялся спектральный анализ на основе преобразования Фурье. При обработке выделялись волновые компоненты, соответствующие зональным числам 1 и 2, с применением регрессионного анализа по методу наименьших квадратов (МНК). Метод наименьших квадратов позволяет достичь наилучшего соответствия между модельными и реальными волновыми параметрами за счёт минимизации ошибок. Расчёт волновой амплитуды выполнен по уравнению:

$$y = A\cos[2\pi(\sigma t + s\lambda)] + B\sin[2\pi(\sigma t + s\lambda)] + C,$$

где A, B и C — параметры, для подбора которых используется МНК; σ, t, s и λ — частота, время, зональное волновое число и долгота, соответственно.

Для определения волн холода были использованы значения среднесуточной температуры с сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (графики не представлены), средние климатические значения температуры — с сайта Гидрометцентра России (таблица не представлена). В данном исследовании применялся 10-й процентиль, рассчитанный для каждой станции для каждого года за 1984–2023 гг. с декабря по февраль. Этот показатель широко распространён в международной практике (включая методики Всемирной метеорологической организации и Межправительственной группы экспертов по изменению климата), поскольку обеспечивает стандартизацию оценок для различных климатических регионов и позволяет сопоставлять результаты между странами с существенными различиями в температурных режимах (например, Португалией и Финляндией). В то время как 3-й и 5-й процентили обычно используются при локальном анализе, когда требуется акцентировать внимание на более выраженных аномалиях. Учитывая, что данная работа охватывает территорию всей России, расположенной в четырёх климатических поясах (арктическом, субарктическом, умеренном и субтропическом) и простирающейся от Европы до Дальнего Востока, выбор 10-го процентиля был наиболее обоснованным.

Зимой 2003/04 г. резкое увеличение температуры в стратосфере составило 35 K (от 197 до 232 K) за 14–25.12.2003. Западная циркуляция ослабла до нуля, но в этот период направление не сменила; 16.12.2003 усилилась амплитуда планетарной волны с волновым числом 1 на высоте 46–59 км и составила 2400 гп. м. А усиление планетарной волны с волновым числом 2 зафиксировано 20.12.2003 на высоте 45–56 км до 900 гп. м.

Синоптический анализ показал, что 14.12.2003 над Россией фиксировалось два антициклона: над Волгоградом (1023 гПа) и над Верхоянским хребтом (1010 гПа), изобары были расположены параллельно широтам от ЕТР до 120° в. д. Но уже на следующий день, 15.12.2003, над всем севером Евразии фиксировались циклоны с центром над Балтийским морем (973 гПа), над посёлком Диксон (984 гПа), над Верхоянским хребтом (1008 гПа) и над Анадырем (978 гПа), а над Сереным Ледовитым океаном вблизи островов Канады — антициклон (1027 гПа). Далее один из центров антициклона сместился в сторону Колымской низменности (1019 гПа), затем он смещался в восточном направлении до Анадыря (1007 гПа), а раннее упомянутый антициклон долгое время располагался над акваторией Северного Ледовитого океана. Также 17.12.2003 антициклон, который шёл по траектории от острова Гренландия на север Скандинавии, проник через Баренцево море до Санкт-Петербурга (1016 гПа) и оставался там до 21.12.2003. Кроме того, от полярного антициклона сформировался новый центр над Гренландией и 22.12.2003 стал смещаться в северную часть Атлантического океана (1041 гПа), далее, 25.12.2003, образовалось два центра области высокого давления над западом Франции (1032 гПа) и над северной частью Украины (1039 гПа), влияние которого протянулось до Уральских гор.

Зимой 2003/04 г. (ВСП за 14–25.12.2003) проявились волны холода в Нарьян-Маре в течение шести дней: с 14.02.2004 (–28,5 °C) по 19.02.2004 (–35,8 °C), в Салехарде в течение пяти дней: с 16.02.2004 (–34,1 °C) по 20.02.2004 (–33,8 °C), в Тикси в течение семи дней: с 07.02.2004 (–41,7 °C) по 13.02.2004 (–45,9 °C), в Ханты-Мансийске в течение пяти дней: с 16.02.2004 (–25,3 °C) по 20.02.2004 (–27,9 °C) и в Якутске в течение пяти дней: с 01.01.2004 (–43,5 °C) по 05.01.2004 (–43,9 °C).

В зимний период 2005/06 г. резкий скачок температуры в стратосфере составил 20 K (от 215 до 235 K) за 05–10.01.2006 и ветер перешёл в восточное направ-

ление до 10 м/с. А за 18–20.01.2006 температура вновь повысилась на 20 К (с 225 до 245 К), а ветер достиг 58 м/с в восточном направлении. На высоте от 43–58 км усилилась планетарная волна с волновым числом 1 за 01–17.12.2005 и составила 2100 гп. м, а за 01–06.01.2006 — 2400 гп. м на тех же высотах. Усиление планетарной волны с волновым числом 2 не случилось.

Анализируя погоду в этот период, стоит отметить, что 05.01.2006 над Среднесибирским плоскогорьем фиксировался циклон с центром южнее полуострова Таймыр (1006 гПа), над остальной частью — высокое давление. 10 января 2006 г. полярный антициклон пытался проникнуть на материк, но лишь немного захватил полуостров Ямал (1025 гПа), а затем его вытеснил глубокий циклон, который двигался с Атлантического океана на север. И уже 11 января 2006 г. центр этого циклона стал двигаться на Нарьян-Мар (1011 гПа). В это же время полярному антициклону удавалось зафиксироваться только над полуостровом Таймыр (1049 гПа). Циклон продолжал движение дальше вглубь материка и 16 января 2006 г. центр был в районе Оренбурга (1003 гПа). 17 января 2006 г. антициклон сместился с Финляндии на юг архипелага Новая Земля (1050 гПа) и объединился с полярным, 21 января 2006 г. центр объединившегося антициклона переместился на Кольский полуостров (1055 гПа). Затем он сместился немного западнее и потом спускался на юг восточной Европы (1041 гПа 25.01.2006). К 30 января 2006 г. центр антициклона с Карского моря смещался вначале на запад к северу Уральских гор, а затем на восток к устью реки Лена, и после сместился в южную часть Среднесибирского плоскогорья (1049 гПа). К 2 февраля 2006 г. его центр смещался к озеру Байкал (1063 гПа).

Зимой 2005/06 г. (ВСП за 05–10.01.2006 и 18–20.01.2006) проявилось волна холода у поверхности в Архангельске в течение шести дней: с 17.01.2006 (–33,5 °С) по 22.01.2006 (–28,9 °С), в Мурманске в течение четырёх дней: с 19.01.2006 (–22,0 °С) по 22.01.2006 (–21,8 °С), в Нарьян-Маре в течение семи дней: с 14.01.2006 (–31,3 °С) по 20.01.2006 (–31,4 °С), в Санкт-Петербурге за пять дней: с 18.01.2006 (–23,6 °С) по 22.01.2006 (–21,5 °С) и в Якутске за семь дней: с 14.01.2006 (–45,1 °С) по 20.01.2006 (–49,2 °С).

Зима 2006/07 г. характеризуется увеличением температуры в стратосфере на 20 К (от 205 до 225 К) за 01–03.02.2007, обращения ветра не случилось. «Второе» потепление в стратосфере зафиксировано 23–25.02.2007, оно составило 30 К (от 205 до 235 К) вместе со сменой ветра на восточное направление до 30 м/с. Задолго до потепления (ВСП) были отмечены значительные усиления амплитуды планетарной волны с волновым числом 1 в дни 16.12.2006 и 01.01.2007 и составили 2700 гп. м. А 16.02.2007 во время второго «скачка» температуры в стратосфере уже усилилась амплитуда планетарной волны с волновым числом 2 до 1050 гп. м.

При анализе перемещения приземных барических образований в этот период отмечались полярные антициклоны 30.01–04.02.2007 (1044 гПа), а над территорией РФ преобладали области низкого давления и седловины. С 07.02.2007 область высокого давления вытягивалась по 110° з.д. — через Северный Ледовитый океан и полуостров Таймыр. 09.02.2007 сформировалась седловина и в итоге 10.02.2007 один из центров антициклона оторвался и сместился на Северо-Сибирскую низменность, а от Баренцева моря до моря Лаптевых погоду определяла двуцентровая депрессия. В период 11–13.02.2007 располагались антициклоны над Среднесибирским плоскогорьем и также над Северным Ледовитым океаном. За 14–17.02.2007 над Северным полюсом, над европейской территорией и над всем севером страны (кроме единственного циклона над полуостровом Ямал) фиксировались антициклоны.

В холодный период 2006/07 г. (ВСП за 01–03.02.2007 и с 23–25.02.2007) волны холода фиксировались в Архангельске за семь дней: с 01.02.2007 (–23,2 °С) по 07.02.2007 (–22,2 °С), в Санкт-Петербурге за пять дней: с 06.02.2007 (–16,9 °С)

по 10.02.2007 (–14,8 °С), в Хатанге дважды за пять дней: с 09.02.2007 (–45,9 °С) по 13.02.2007 (–45,5 °С) и второе понижение с 25.02.2007 (–44,8 °С) по 01.03.2007 (–47,5 °С).

Для зимы 2007/08 г. резкое повышение температуры в стратосфере составило 45 К (от 195 до 240 К) за 20–22.01.2008 без обращения ветра. 24.01.2008 произошло усиление $ПВ_1$ на 40–58 км до 2400 гп. м. Усиление $ПВ_2$ фиксировалось с 16.01.2008 на высоте 43–52 км и составило 1050 гп. м.

Анализируя поля приземного давления необходимо отметить, что 16.01.2008 в основном над всей РФ погоду определяли области высокого давления, кроме трёх циклонов над полуостровом Таймыр (1029 гПа), над полуостровом Камчатка (1002 гПа) и над полюсом (1004 гПа). 18.01.2008 антициклон с побережий Северной Америки сместился прямо на полюс (1019 гПа), в это же время над РФ отсутствуют циклоны (кроме единственного над Магаданом — 1022 гПа). Но 21.01.2008 движущиеся с Атлантики и огибающие Европу глубокие циклоны смещались на север и устремлялись на Балтийское море (977 гПа) и на полуостров Таймыр (994 гПа). «Балтийский» циклон смещался вначале на Санкт-Петербург и затем южнее до Волгограда (1010 гПа 24.01.2008). Вместе с тем циклон, образованный на северных берегах Канады, смещался на северо-восток (через юг острова Гренландия), 26.01.2008 стал оказывать влияние практически на всю европейскую часть России до Волгограда (центр над архипелагом Шпицберген, 972 гПа). 27.01.2008 центр несколько сместился к Кольскому полуострову (976 гПа). На следующий день, 28.01.2008, он разделился на два центра над архипелагом Новая Земля (989 гПа) и юго-восточнее Москвы (989 гПа). Второй центр через два дня сместился в юго-восточном направлении, а первый сместился восточнее архипелага Северная Земля (1002 гПа 01.02.2008 г). В течение этого периода (с 25.01.2008 по 01.02.2008) над Якутией фиксировались антициклоны, однако их возникновение не было связано с полярными регионами, поскольку в это время над полюсом преобладала область низкого давления. В связи с этим нельзя точно утверждать, что они смещались с севера.

Для зимы 2007/08 г. (ВСП за 20–22.01.2008) волны холода наблюдались в Салехарде за шесть дней: с 16.02.2008 (–34,0 °С) по 21.02.2008 (–31,0 °С) и в Санкт-Петербурге за семь дней: с 03.01.2008 (–10,8 °С) по 09.01.2008 (–5,4 °С).

Зимой 2013/14 г. отмечалось увеличение температуры в стратосфере на 25 К (с 209 до 234 К) в 02–08.02.2014 и ветер сменился на восточное направление до 10 м/с. На высоте 40 км температура увеличилась на 35 К за 02–05.02.2014, ветер также поменял направление и достиг 20 м/с. За месяц до ВСП, а именно 01.01–01.02.2014, усилилась амплитуда $ПВ_1$ и составила 2000 гп. м, $ПВ_2$ усилилась 01–16.01.2014 и достигла 1200 гп. м, 03.02.2014 $ПВ_2$ достигла 1050 гп. м.

Синоптический анализ показывает, что 08.02.2014 над материковой частью Евразии преимущественно погоду определяла область высокого давления (1045 гПа). С 09.02.2014 антициклон со стороны Восточно-Сибирского моря сместился на Среднесибирское плоскогорье (1046 гПа). А по оси от Канады — через северный полюс вдоль Уральских гор — вытягивается область повышенного давления с центром севернее архипелага Новая Земля (1024 гПа). Эта синоптическая ситуация сохранится до 13.02.2014. С 16.02.2014 циклоны вытесняют антициклоны и 18.02.2014 над всей РФ преобладает область низкого давления (до 999 гПа).

В зимний период 2013/14 г. (ВСП за 02–08.02.2014) волны холода после ВСП у поверхности не наблюдались. Однако было несколько волн холода в период усиления $ПВ_1$ (01.01–01.02.2014) и $ПВ_2$ (01–14.01.2014) — в Игарке за пять дней: с 24.01.2014 (–46,4 °С) по 28.01.2014 (–49,5 °С), в Мурманске за пять дней: с 17.01.2014 (–17,7 °С) по 21.01.2014 (–17,2 °С), в Салехарде за пять дней: с 24.01.2014 (–37,7 °С) по 28.01.2014 (–39,1 °С), в Среднеколымске за семь дней: с 16.01.2014 (–43,8 °С) по 22.01.2014 (–45,3 °С), в Сыктывкаре за шесть дней:

с 24.01.2014 (–28,2 °С) по 29.01.2014 (–29,5 °С), в Ханты-Мансийске за шесть дней: с 24.01.2014 (–35,3 °С) по 29.01.2014 (–42,3 °С).

Обобщая можно отметить, что во время и после ВСП со смещением циркумполярного вихря смещение антициклонов наблюдаются в сторону Среднесибирского плоскогорья (3/5 зимы), Республики Саха (2/5), п-ова Таймыра (2/5), архипелага Новая Земля (2/5), Чукотского автономного округа (1/5), Кольского полуострова (1/5), с острова Гренландия до Санкт-Петербурга (1/5 зима). Особых отличий в траектории смещения полярных антициклонов при ВСП со смещением по сравнению с событиями расщепления не обнаружено. Однако полярные антициклоны во время расщепления смещаются не только на материк, но и до более южных широт, например, достигая границ Казахстана в 2021 г.

Волны холода при смещении стратосферного полярного вихря также фиксировались (через 2–3 недели после ВСП), но в основном их значения не такие высокие по сравнению с годами расщепления. Расщепление циркумполярного вихря сопровождалось более резкими и длительными похолоданиями, особенно в Арктике и Сибири, например, зимой 1984/85 г. (ВСП за 18.12.1984–01.01.1985) в Мурманске четыре дня: с 05.01.1985 (–34,9 °С) по 08.01.1985 (–29,8 °С), в Салехарде пять дней: с 02.01.1985 (–37,5 °С) по 06.01.1985 (–37,8 °С), в Хатанге шесть дней: с 11.02.1985 (–42,0 °С) по 16.02.1985 (–37,0 °С). Зимой 2008/09 г. две волны холода наблюдались в Игарке: с 30.01.2009 (–41,2 °С) по 02.02.2009 (–41,6 °С) четыре дня и с 09.02.2009 (–43,2 °С) по 13.02.2009 (–41,9 °С) пять дней, в Нарьян-Маре пять дней: с 05.02.2009 (–33,2 °С) по 09.02.2009 (–33,1 °С), в Салехарде шесть дней: с 06.02.2009 (–35,2 °С) по 11.02.2009 (–39,0 °С), в Тикси пять дней: с 05.02.2009 (–39,2 °С) по 09.02.2009 (–42,0 °С). И также зимой 2020/21 г. (ВСП за 20.12.2020–02.01.2021) волна холода зарегистрирована в Игарке в течение шести дней: с 21.01.2021 (–47,5 °С) по 26.02.2021 (–42,3 °С), в Среднеколымске в течение семи дней: с 17.01.2021 (–45,6 °С) по 23.01.2021 (–44,7 °С), в Хатанге в течение пяти дней: с 28.01.2021 (–42,1 °С) по 01.02.2021 (–44,5 °С), в Якутске в течение пяти дней с 22.01.2021 (–47,5 °С) по 26.01.2021 (–48,2 °С). При расщеплении вихря температурные минимумы были ниже, а продолжительность холодов достигала 5–7 дней. Можно предполагать, что для зим со смещением циркумполярного вихря не характерно продвижение полярных антициклонов далеко на юг материка, а погодные условия у поверхности менее суровые.

ЛИТЕРАТУРА

Baldwin M. P., *Ayarzagüena B.*, *Birner T. et al.* Sudden stratospheric warmings // Reviews of Geophysics. 2021. V. 59. No. 1. Article e2020RG000708. https://doi.org/10.1029/2020RG000708.

Mitchell D. M., *Gray L. J.*, *Anstey J. et al.* The influence of stratospheric vortex displacements and splits on surface climate // J. Climate. 2013. V. 26. No. 8. P. 2668–2682. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00030.1.

Lindsey R. Understanding the Arctic polar vortex // NOAA Climate.gov. 2021.

White I. P., *Garfinkel C. I.*, *Cohen J. et al.* The impact of split and displacement sudden stratospheric warmings on the troposphere // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2021. V. 126. No. 8. Article e2020JD033989. https://doi.org/10.1029/2020JD033989.

CHARACTERISTICS OF SURFACE PRESSURE PATTERNS AND COLD WAVES OVER EURASIA DURING SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING (VORTEX DISPLACEMENT)

A. G. Golovko, T. S. Ermakova

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

A study of five winter seasons (2003/04, 2005/06, 2006/07, 2007/08, 2013/14) with sudden stratospheric warming events during displacement of the circumpolar vortex revealed that their impact on the troposphere is delayed by 1–2 weeks. Unlike vortex splitting events, displacement-type SSWs are associated with polar anticyclones that more frequently shift toward the Central Siberian Plateau and Yakutia but rarely move further south. Cold waves observed 2–3 weeks after SSWs were less intense, with minimum temperatures recorded in Yakutsk (−49.2 °C) and Tiksi (−45.9 °C). Amplification of planetary wave 1 (up to 2700 geopotential meters) typically precedes the warming, while planetary wave 2 (up to 1200 geopotential meters) correlates with the SSW event itself. Synoptic analysis showed that persistent anticyclones form high-pressure areas, contributing to anomalous cooling. However, their influence is less prolonged and extreme compared to vortex splitting years. These findings are crucial for improving medium-range weather forecasts in northern Russia.

Keywords: Sudden stratospheric warming, polar vortex displacement, cold waves, synoptic analysis

Golovko Anastasiia Germanovna — student, golovko01@mail.ru
Ermakova Tatyana Sergeevna — docent, candidate of physical and mathematical sciences
taalika@mail.ru

УДК 631.481 DOI: 10.21046/KMU-2025-104-110

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕСТЕСТВЕННЫХ ЗАПАДИН НА ТЕРРИТОРИИ ТРУБЧЕВСКОГО ОПОЛЬЯ

Е. А. Государева

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия

На территории Трубчевского ополья в Брянской области были закартированны и геоморфологически атрибутированы более 700 западин на территории около 82 000 га. Данные были подвергнуты статистической обработке. Предложена модель, демонстрирующая большую точность ($R^2 \geqslant 0{,}90$) при описании распределения площадей западин, а также описывающая единым уравнением западины размером от 0,4 до 3,0 га.

Ключевые слова: западины, ополье, степенное распределение, логнормальное распределение, ГИС

ВВЕДЕНИЕ

Ополья

На территории Брянской области широко представлен полесско-опольный ландшафт, на основе которого была создана карта ополий, часть которой приведена ниже (рис. 1). Эта карта хорошо согласуется с более мелкомасштабной картой почв Брянской области, где в соответствующих опольям контурам представлены разные типы серых лесных почв.

В данной работе было изучены западины Трубчевского ополья. Западины — неглубокие, обычные округлые впадины в лесостепной зоне. Имеют длину до десятков сотен метров и глубину в несколько метров или доли метров (Большая..., 1972).

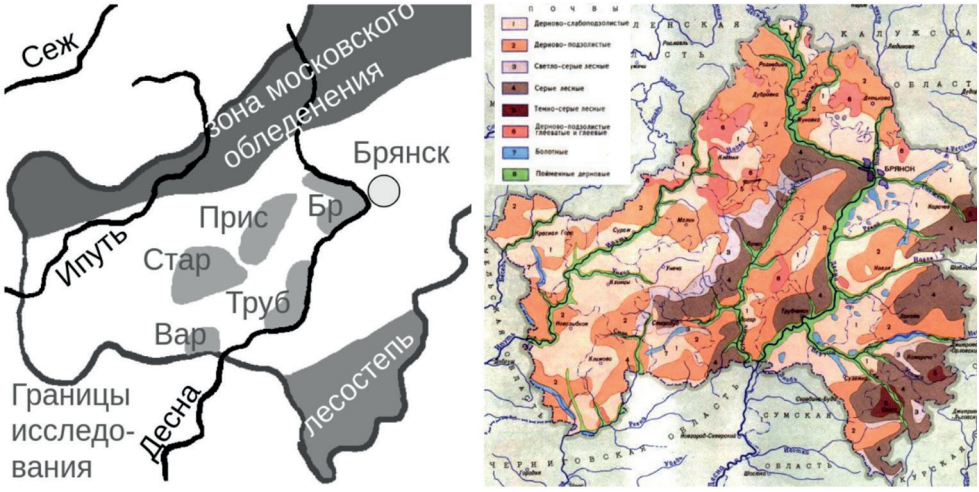


Рис. 1. Сравнение карты ополий по Милькову и карты почв Брянской области: Бр — Брянское, Труб — Трубчевское, Прис — Присудольское, Стар — Стародубское, Вар — Вара-Судостьское

Государева Екатерина Алексеевна — почвовед, аспирант, ekaterina_gos@mail.ru

Практическая часть

Для выделения западин сначала требовалось ограничить зону исследования. Для этого использовались данные, предоставленные на карте ополий. Однако эта карта очень крупномасштабная, поэтому для уточнения ареала использовалась карта почв Брянской области, так как в опольях формируются серые лесные почвы, по которым можно выделить нужную зону. После этого использовался материал Google Earth для окончательной корректировки на местности.

Для ограничения зоны исследования исследуемого ареала была использована крупномасштабная схема ополий (Мильков, 1981) уточнённая с помощью почвенной карты Брянской области (Атлас..., 1976). Основанием для использования почвенной карты как диагностического критерия служит распространение серых лесных почв в качестве зонального индикатора опольных ландшафтов. Окончательная корректировка границ выполнена по актуальным спутниковым данным Google Earth (https://earth.google.com). Расположение всех западин показано на рис. 2.

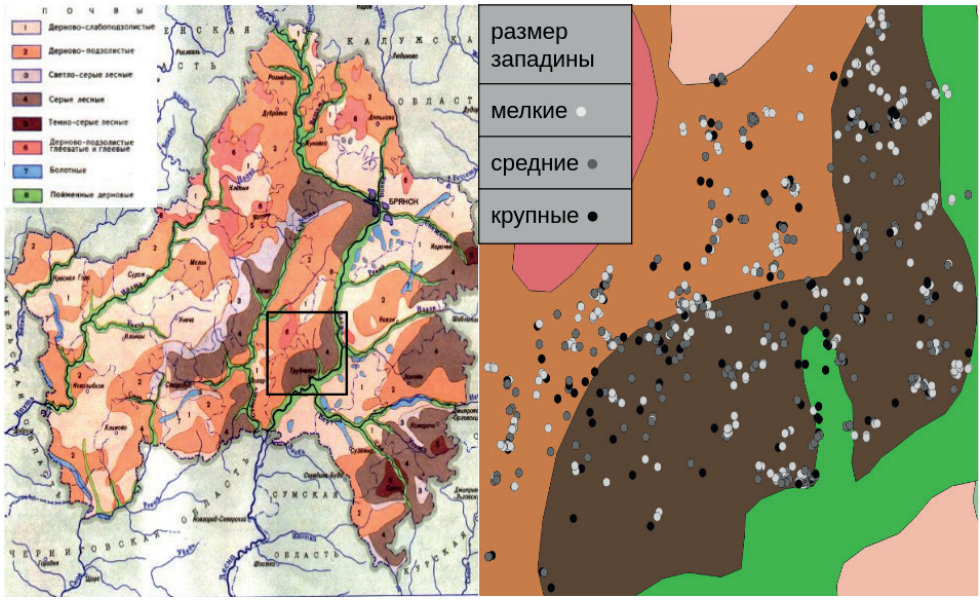


Рис. 2. Расположение западин. Центр зоны исследований: 52° 37′ с. ш., 33° 40′ в. д.

Дешифрирование выполнялось с помощью актуальных снимков высокого разрешения адаптивным выборочным методом с учётом морфологии рельефа. Антропогенные объекты исключены по данным Публичной кадастровой карты (https://pkk.rosreestr.ru); кроме того, из итоговой выборки были опущены любые западины со следами антропогенного преобразования, например, неестественно правильной формы. Полнота выборки обеспечена поэтапной сквозной проверкой широтных и меридиональных трансект с шагом, соответствующим разрешению экрана.

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием библиотек pandas и numpy в языке программирования Python. Также с помощью этого языка были созданы графики, при этом использовалась библиотека seaborn, которая является надстройкой над библиотекой matplotlib.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАДИН ПО РАЗМЕРУ

Гистограммы

Для анализа распределения западин по размерам построен совмещённый график: гистограмма численности объектов в классе объединена с гистограммой суммарной площади западин данного размерного класса, что обеспечило компактность и информативность визуализации.

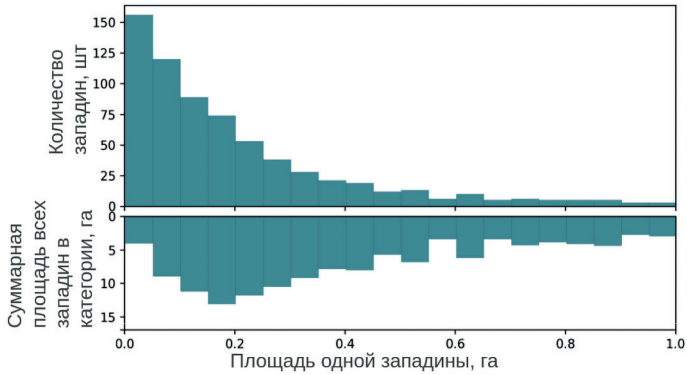


Рис. 3. Гистограммы площадей западин

Обычно мы ожидаем нормального распределения природных объектов. Однако здесь обе тенденции демонстрируют ненормальное распределение — в первом случае можно наблюдать резкое уменьшение от высоких значений, а потом — тяжёлый хвост в высоких значениях. В случае гистограммы с суммарной площадью распределение оказывается близкой к логнормальному, т. е. сначала идёт повышение, а потом понижение с ещё более тяжёлым хвостом. Следует обратить внимание, что на графике (рис. 3) показаны западины размером до 1 га из соображений читабельности.

Ранговый анализ

Альтернативно гистограммам данные можно представить, ранжировав западины по площади S и присвоив каждой порядковый номер (ранг) N (Ibanez et al., 2020), начиная с минимальной площади, как показано на рис. 4. Применение логарифмической шкалы преобразует степенное распределение в линейное и обеспечивает корректное отображение крупных западин без потери детализации.

Распределение, согласно графику (таблица), аппроксимируется несколькими последовательными степенными зависимостями. Аппроксимация проводилась в координатах натурального логарифма, согласованных с аналитическими выражениями.

Формулы аппроксимаций зависимости номера западин от площади

Размер западин, га	**ln:** $\ln(N) = a \cdot \ln(S) + b$	**Степень:** $N = e^{b} S^{a}$	**Коэффициент детерминации** (R^2)
Мелкие (0–0,12)	$\ln(N) = 1{,}98 \ln(S) + 12{,}45$	$N = 12{,}45\, S^{1{,}98}$	0,90
Средние (0,12–0,43)	$\ln(N) = 0{,}84 \ln(S) + 7{,}49$	$N = 7{,}49\, S^{0{,}84}$	0,99
Крупные (0,43–3,00)	$\ln(N) = 0{,}05 \ln(S) + 6{,}47$	$N = 6{,}47\, S^{0{,}05}$	0,93

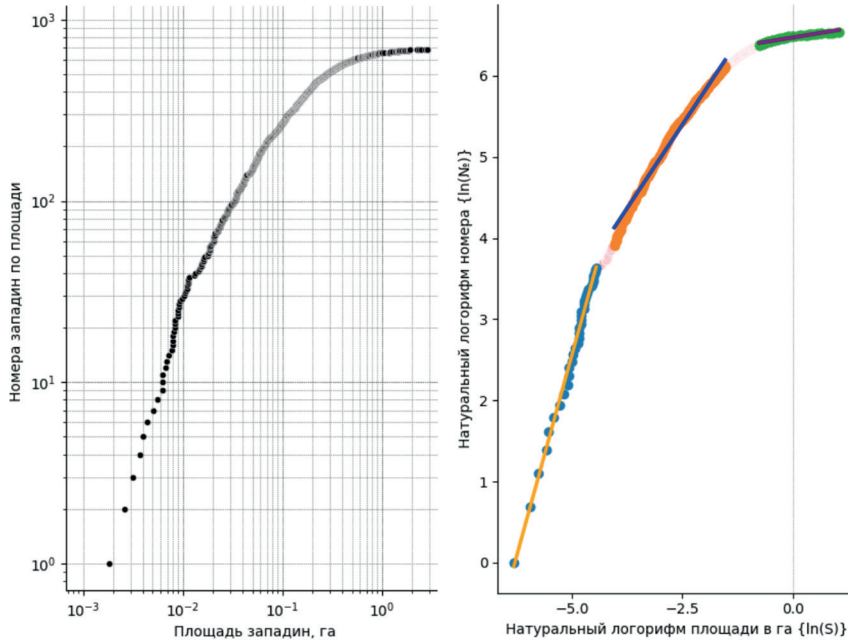


Рис. 4. Ранговый анализ площадей западин с последующей аппроксимацией

Существенно, что стратификация по размерам обусловлена статистически значимыми различиями. Каждая модель характеризуется коэффициентом детерминации не менее 0,90 (для логарифмирования величин).

Различные кривые могут свидетельствовать о разных факторах, контролирующих размер западин.

ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

Коэффициент удлинённости

В геоморфологии для численной оценки форм можно использовать несколько параметров. Первый из них, коэффициент удлинённости K, который представляет собой отношение большей L оси к меньшей W (Симонов, 1988):

$$K = \frac{L}{W}.$$

Данный показатель варьирует от 1 для окружности до бесконечности и обладает высокой интерпретационной наглядностью.

Индекс компактности

Индекс компактности C (Carvalho et al., 2014) считается как соотношение площади S и квадрата периметра P, умноженное на 4π.

$$C = 4\pi \frac{S}{P^2}.$$

Он определяет степень приближения формы к кругу. Его базой служит сравнение безразмерного отношения P^2/S объекта со значением этого отношения для окружности. Это соотношение для любой окружности равно 4π.

$$C = \frac{P_{\text{окр}}^2}{S_{\text{окр}}} \div \frac{P^2}{S}, \quad \frac{P_{\text{окр}}^2}{S_{\text{окр}}} = \frac{(2\pi r)^2}{\pi} r^2 = 4\pi.$$

Индекс варьирует от 1 для идеальной окружности до приближения к 0 у сильно вытянутых или изрезанных форм, чувствителен к сложности контура. Важно отметить, что этот индекс требует данных в однородных единицах измерения (периметр и площадь должны выражаться в метрах и квадратных метрах соответственно).

Оценки коэффициента удлинённости

Для данной работы был разработан индекс, который совмещает оба этих подхода.

Его выведение основано на моделировании западин в виде эллипсов с известными соотношениями большой (a) и малой (b) полуоси.

Используя стандартные формулы площади и периметра для эллипса:

$$P = \pi\sqrt{2(a^2 + b^2)}, \quad S = \pi ab$$

и введя через коэффициент удлинённости k меньшую полуось:

$$k = a/b, \quad a = kb$$

можно вывести уравнения, решаемые относительно k при заданных S и P:

$$P = \pi\sqrt{2(k^2b^2 + b^2)}, \quad S = \pi kb^2.$$

Точное соответствие достигается только для идеального эллипса. В реальных условиях полигональное представление контуров искажает площадь и периметр относительно эллиптических. Морфология западин, особенно крупных, характеризуется сложностью форм, и даже малые западины нередко отклоняются от овальных форм к каплевидным.

Поэтому k рассматривается как оценочный параметр. Вместо аналитического решения используется численный подбор k в диапазоне 1,0–10,0 с шагом 0,1 (для данной работы). Алгоритм:

1) для текущего k вычисляется b по S;
2) определяется теоретический периметр;
3) сравнивается с фактическим периметром полигона;
4) итерация прекращается при превышении фактическим периметром теоретического, принимается предыдущее k.

Этот коэффициент обеспечивает интуитивно понятную интерпретируемость, учёт сложной морфологии, а также лёгкий программный подсчёт.

Графики округлости

Визуализация (рис. 5) демонстрирует преобладание округлых форм западин. Размерные группы (крупные — снизу, мелкие — сверху) дифференцированы цветом; доля когорты в столбце отображается числами белым цветом. Зелёные эллипсы визуализируют форму при соответствующих k. Диапазон значений оценки коэффициента удлинённости на оси абсцисс ограничен ($1{,}4 \leqslant k \leqslant 5{,}0$) для исключения малорепрезентативных данных.

В отличие от него, индекс компактности (0, 1] не требует усечения, однако его нелинейность, выраженная в почти равные расстояния между парами 2 и 3, 3 и 5, 5 и 10, снижает интуитивность восприятия по сравнению с линейной шкалой оценки коэффициента удлинённости.

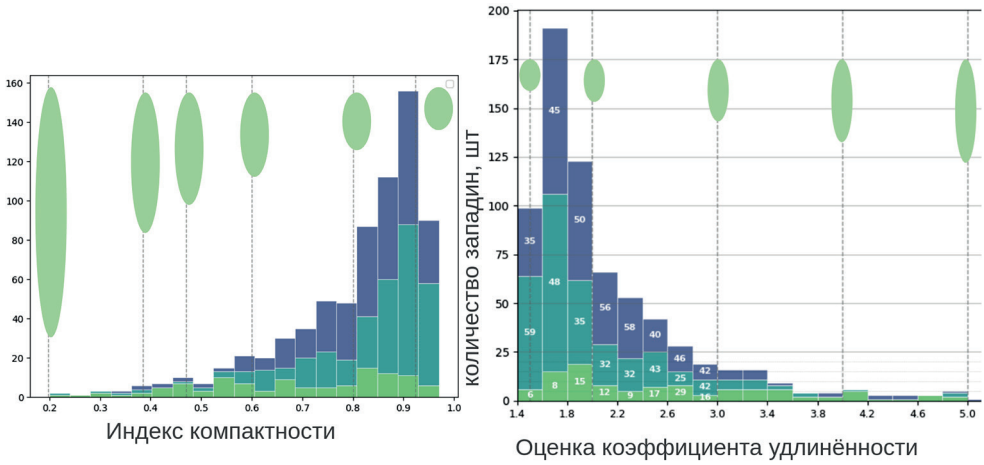


Рис. 5. Гистограммы округлости западин — сравнение индекса компактности и предложенного в данной работе оценке коэффициента удлинённости

Наблюдаемое распределение индекса напоминает логнормальное с тяжёлым хвостом. Ключевой результат — отсутствие устойчивой связи размера и формы западин. Таким образом, этот параметр также не продемонстрировал нормального распределения. Более важным является вывод, что, по-видимому, отсутствует выраженная корреляция между размером западины её формой, при отдельном анализе западин любого из трёх размеров они демонстрируют склонность к логнормальному распределению.

Крупные западины характеризуются более тяжёлым хвостом распределения, менее выраженным пиком (мода смещена с 1,6–1,8 у мелких/средних на 1,8–2,0) и большей сглаженностью графика по сравнению с мелкими.

ВЫВОДЫ

1. Распределение частоты западин по площади в Трубчевском ополье не является нормальным, однако с высокой точностью ($R^2 \geqslant 0{,}90$) аппроксимируется последовательностью трёх степенных функций.
2. Хотя традиционное определение западин предполагает их размер до 1 га, анализ показал, что распределение объектов в диапазоне 0,4–1,0 га подчиняется той же степенной зависимости, что и западины размером 1–3 га.
3. В отличие от количества западин в классе, которое описывается степенной функцией, суммарная площадь западин в каждом классе соответствует логнормальному распределению с модой в интервале 0,15–0,20 га.
4. Распределение значений оценки коэффициента удлинённости и индекса компактности западин также соответствует логнормальному закону с модой 1,7 и 0,9 соответственно.
5. Не обнаружено зависимости между размером западины и оценкой коэффициента удлинённости или индексом компактности.

ЛИТЕРАТУРА

Атлас Брянской области / ред. Гладкова Е. В. и др. М.: ГУГК, 1976. С. 28–29.

Большая советская энциклопедия / гл. ред. Прохоров А. М. В 30 т. Т. 9. 3-е изд. М.: Советская энцикл., 1972. 322 с.

Классификация и диагностика почв СССР / ред. Иванова Е. Н. М.: Колос, 1977. 224 с. С. 104–109.

Мильков Ф. Н. Физическая география: современное состояние, закономерности, проблемы. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1981. 400 с.

Симонов Ю. Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: Недра, 1988. 251 с. С. 45–46.

Carvalho O. A., Jr., Guimarães R. F., Montgomery D. R. et al. Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-Derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil // Remote Sensing. 2014. V. 6. P. 330–351. DOI: 10.3390/rs6010330.

Ibáñez J.-J., Ramírez-Rosario B., Fernández-Pozo L., Brevik E. C. Land system diversity, scaling laws and polygons map analysis // European J. Soil Science. 2020. V. 71. P. 5–8. DOI: 10.1111/ejss.13035.

PATTERNS OF SPATIAL-STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF NATURAL DEPRESSIONS IN THE TRUBCHEVSKOE OPOLYE TERRITORY

E. A. Gosudareva

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Over 700 natural depressions were mapped and geomorphologically attributed within the Trubchevskoe Opolye territory (Bryansk Oblast, Russia), covering approximately 82,000 hectares. The dataset underwent statistical analysis. A model demonstrating high accuracy ($R^2 \geqslant 0{,}90$) in describing the size distribution of depressions was developed, successfully unifying depressions ranging from 0.4 to 3 ha under a single equation.

Keywords: Natural depressions, opolye, power-law distribution, lognormal distribution, GIS

Gosudareva Ekaterina Alekseevna — soil scientist, postgraduate, ekaterina_gos@mail.ru

УДК 524.386 DOI: 10.21046/KMU-2025-111-117

ОТКРЫТИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТМЕННОЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЗВЕЗДЫ GRIGORIEV 1

В. С. Григорьев, Д. В. Денисенко

Образовательный комплекс «Воробьевы горы» Москва, Россия

Работа посвящена открытию затменной переменной звезды Grigoriev 1 и определению параметров двойной системы. Звезда была открыта в ходе проверки ультрафиолетовых источников космической обсерватории GALEX на участке неба в созвездии Пегаса. Анализ данных проекта ZTF показал наличие у звезды затмений глубиной в две звёздных величины с периодом 6,5997 сут. При этом длительность затмения составляет всего 1 % орбитального периода, а частные фазы короче ещё как минимум в 30 раз. Такие параметры указывают на то, что звезда является двойной системой с белым карликом, видимой с ребра. Новый объект был зарегистрирован в Международном реестре переменных звёзд AAVSO VSX под именем Grigoriev 1. В базе данных VSX на 10 млн объектов насчитывается всего 188 переменных звёзд типа EA/WD. Среди них Grigoriev 1 — рекордсменка по длительности орбитального периода. Кроме того, по данным космической обсерватории Gaia её абсолютная звёздная величина M в максимуме блеска составляет около +6,8. На диаграмме «цвет – светимость» она занимает промежуточное положение между горячими субкарликами и белыми карликами, что делает её ещё более интересной и заслуживающей дополнительного исследования на профессиональных телескопах.

Ключевые слова: звёзды, двойные звёзды, белые карлики, переменные звёзды, затменные переменные

В Центре астрономического и космического образования Московского дворца пионеров на Воробьевых горах с 2021 г. реализуется проект «Центр открытия астрономических объектов». За четыре учебных года около тридцати школьников стали первооткрывателями более 60 сверхновых и 120 переменных звёзд. Большинство из них являются типичными представителями наиболее распространённых классов переменности (пульсирующие, затменные, вспыхивающие, катаклизмические). Однако время от времени школьникам удаётся открыть звёзды, не имеющие аналогов среди известных объектов. При этом с каждым годом число переменных, открытых профессиональными обзорами и обсерваториями, растёт, и найти свою звезду становится всё труднее. В 2025 г. база данных Международного реестра переменных звёзд AAVSO VSX (*англ.* American Association of Variable Star Observers Variable Star IndeX) превысила 10 млн записей. Поэтому приходится постоянно изобретать новые методы поиска, в том числе с использованием астрономических ресурсов интернета, находящихся в свободном доступе.

Новый способ поиска подсказала переменная Minkovskiy 6, ранее открытая школьником Артуром Минковским на Паломарских пластинках (см. (Nasonov et al., 2024)). Эта звезда на снимках в ультрафиолетовом диапазоне выглядела значительно ярче, чем в видимом свете. Нами был сделан вывод, что интересные объекты надо искать именно среди ультрафиолетовых источников. Работа была начата во время выездной проектной астрономической смены на базе Образовательного центра «Команда» Дворца пионеров.

Поиск проводился следующим образом. На сайте Simbad визуально выбирались объекты, которые отличаются синим цветом на снимках GALEX, но при этом выглядят как обычные звёзды на снимках Паломарского обзора неба DSS

Григорьев Виктор Сергеевич — ученик 7-го класса
Денисенко Денис Владимирович — педагог дополнительного образования, методист, d.v.denisenko@gmail.com

Colored (*англ.* Digitized Sky Survey). Затем кривые блеска этих объектов проверялись на сайте Фабрики транзиентов Цвики ZTF (*англ.* Zwicky Transient Facility) (Masci et al., 2019). Некоторые из таких объектов оказывались квазарами, другие — уже открытыми переменными звёздами. Наконец 24 октября 2024 г. автору этой статьи удалось найти звезду в созвездии Пегаса, которая меняла свой блеск на 2 звёздные величины (рис. 1), при этом не числилась ни в каких каталогах переменных звёзд. Её не было ни в базе данных астрономических объектов Simbad, ни в Международном реестре AAVSO VSX. Проверка на сайте Vizier показала, что факт переменности не упоминается ни в данных космической обсерватории Gaia, ни в проектах ATLAS, ZTF, CSS (*англ.* Catalina Sky Survey), ASAS-SN (*англ.* All Sky Automated Survey for Supernovae) и каких-либо других. Это означало, что открыта новая переменная звезда, блеск которой время от времени падает примерно с 18 до 20 звёздной величины.

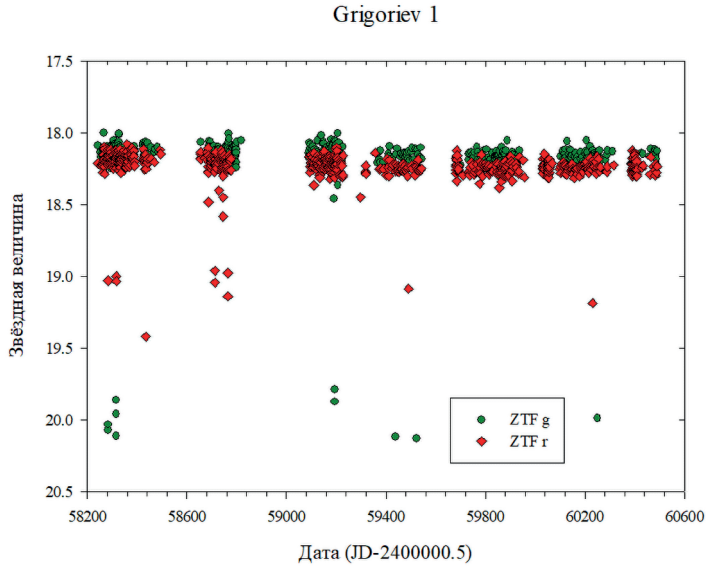


Рис. 1. Кривая блеска переменной звезды Grigoriev 1 по данным проекта ZTF. Зелёные кружки — наблюдения в фильтре g, красные ромбики — в фильтре r

Для определения периода затмений использовалась программа WinEffect В. П. Горанского. Он оказался равен 6,5997 сут (рис. 2). Звезду отправили на регистрацию в Международный реестр переменных звёзд AAVSO VSX (Watson et al., 2006) под именем Grigoriev 1, и менее чем через 12 ч после открытия она была включена в каталог как переменная типа EA/WD (затменная двойная типа Алголя с белым карликом). Данные о новой звезде приведены в табл. 1. Оказалось, что она является чрезвычайно редкой. В базе данных VSX среди примерно 10 млн объектов насчитывается всего 188 переменных звёзд этого типа, причём из них Grigoriev 1 занимает второе место по длительности орбитального периода. Более длинный период имеет только звезда GSC 04047-00113 в Кассиопее, но в ней затмения белого карлика вызваны аккреционным диском вокруг второго компонента и имеют гораздо меньшую глубину, всего 0,06 звёздной величины. Среди разделённых двойных систем из белого и красного карликов переменная Grigoriev 1 является единоличным лидером с отрывом более чем в 2,5 раза от ближайшего аналога с периодом 2,308 сут.

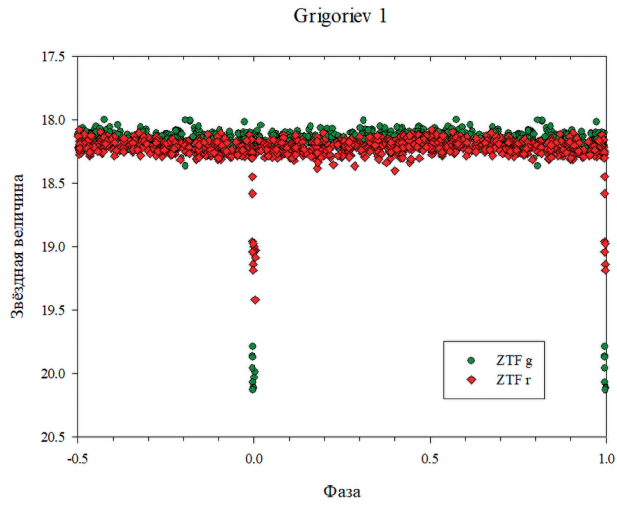


Рис. 2. Фазовая кривая блеска переменной звезды Grigoriev 1 с периодом 6,5997 сут

Таблица 1. Характеристики звезды Grigoriev 1

Параметр	Значение параметра
Координаты (эпоха 2000,0)	22 20 52,12 +33 14 51,1
Созвездие	Пегас
Диапазон изменений блеска	18,1–19,5r; 18,1–20,1g
Орбитальный период	6,5997 сут (158,4 ч)
Эпоха минимума затмения	JD = 2459524.684
Тип переменности	EA/WD

Затмение в двойной системе Grigoriev 1 длится всего 1 % от орбитального периода, то есть около 1,5 ч, а частные фазы короче ещё как минимум в 30 раз. Это означает, что размер затмевающего компонента примерно во столько же раз больше размера затмеваемой звезды. А поскольку блеск звезды во время затмения падает примерно в шесть раз (на две величины), затмеваемый компонент оказывается примерно в пять раз ярче затмевающего. Такое возможно только в том случае, если затмевающий объект — более холодный (например, красный карлик), а затмеваемый — более горячий (белый карлик или субкарлик). Это подтверждается и глубиной затмения в разных диапазонах видимого света. В фильтре g блеск падает на две величины (в 6,3 раза), в фильтре r — на 1,4 величины (в 3,6 раза).

Предположив, что суммарная масса двух компонентов звезды Grigoriev 1 примерно равна 1 массе Солнца, можно рассчитать по третьему закону Кеплера параметры двойной системы. Скорость движения компонентов легко вычислить по формуле $V = 2\pi a/P$, где a — радиус орбиты; P — орбитальный период, определённый из наблюдений. Значение V равно 113,5 км/с в предположении массы системы, равной 1 массе Солнца.

На рис. 3 показан фрагмент фазовой кривой блеска Grigoriev 1 вблизи затмения. Видно, что частные фазы примерно в 30 раз короче главного минимума. На основании этого можно оценить диаметры компонентов. Они приведены в табл. 2.

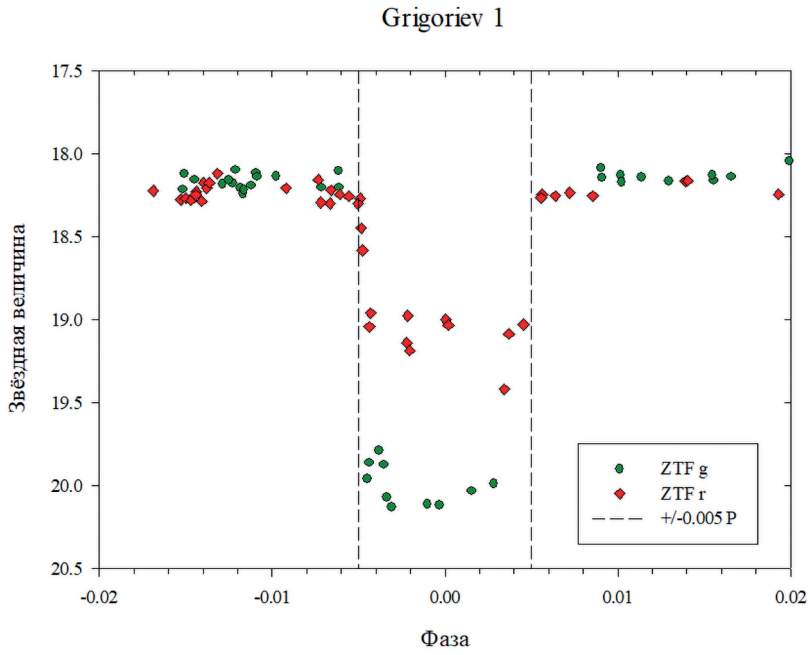


Рис. 3. Увеличенный фрагмент фазовой кривой блеска в интервале ±0,01 периода

Таблица 2. Физические параметры двойной системы Grigoriev 1

Параметр	Значение параметра
Радиус орбиты, а.е.	0,06886
Радиус орбиты, тыс. км	10300
Орбитальная скорость, км/с	113,5
Диаметр холодного компонента, тыс. км	647
Диаметр горячего компонента, тыс. км	~20

Как видно из табл. 2, радиус холодного компонента составляет около 320 тыс. км, или 0,032 орбитального радиуса. Это означает, что наклонение плоскости орбиты отличается от 90° менее чем на 1,8° (0,032 рад). Вероятность такой ориентации орбитальной плоскости в пространстве составляет 3 %. Иначе говоря, из 33 двойных систем, подобных Grigoriev 1, только в одной будет наблюдаться затмение. Этим объясняется тот факт, что ранее такие затменные переменные звёзды не обнаруживались. Используя третий релиз данных космической обсерватории Gaia (Gaia..., 2022), можно по значению параллакса 0,546±0,111 мс дуги оценить расстояние до Grigoriev 1 в 1830±370 пк. В пределах 1 кпк вероятность наличия подобных систем крайне мала, а на больших расстояниях они становятся слабее 19–20 звёздной величины, что делает их недоступными для открытия существующими поисковыми обзорами.

На рис. 4 показано распределение переменных звёзд типа EA/WD по периодам затмений. Размер одного бина 0,05 сут. Видно, что большинство таких систем — короткопериодические ($P < 0,5$ сут), а Grigoriev 1 заметно выделяется среди них.

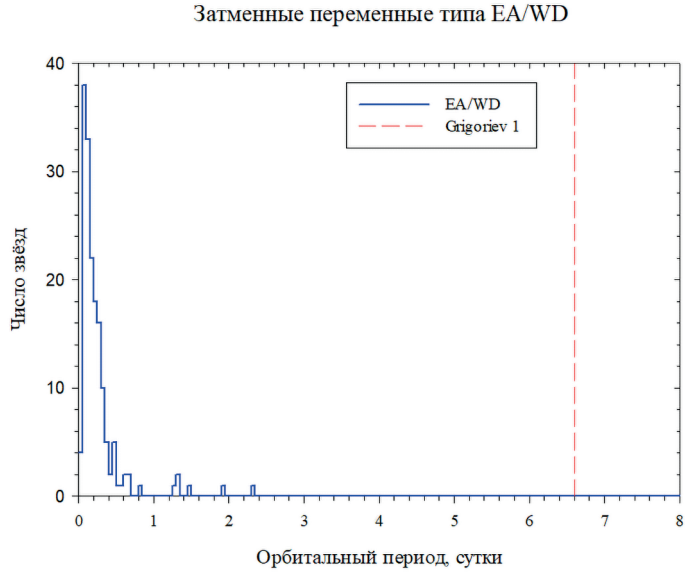


Рис. 4. Распределение 188 известных затменных переменных звёзд с белыми карликами по орбитальным периодам. Период Grigoriev 1 отмечен красной вертикальной линией

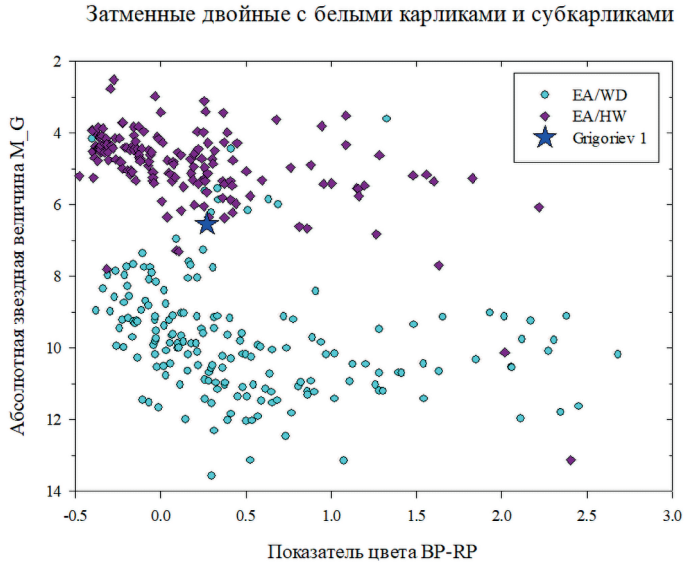


Рис. 5. Grigoriev 1 на диаграмме «цвет – светимость» для затменных переменных звёзд с белыми карликами (голубые кружки) и горячими субкарликами (фиолетовые ромбы)

Абсолютная звёздная величина звезды Grigoriev 1 в максимуме блеска составляет около +6,8. На рис. 5 приведена диаграмма «цвет – абсолютная звёздная величина» для затменных переменных с белыми карликами (EA/WD) и горячими субкарликами типа HW Девы (EA/HW по классификации VSX). По горизонтальной оси отложены показатели цвета (g – r) по данным Gaia DR3, по вертикальной оси — величины в фотометрической полосе Gaia (M_G). На этой диаграмме

Grigoriev 1 (отмечена синей звёздочкой) занимает промежуточное положение между горячими субкарликами и белыми карликами, что делает её ещё более интересной. Скорее всего, горячий компонент двойной системы находится на переходной стадии эволюции от одного типа объектов к другому. Показатель цвета в ультрафиолетовом диапазоне по данным космической обсерватории GALEX (FUV — NUV = –0,666) (*англ.* Far UltraViolet, Near UltraViolet) говорит о чрезвычайно высокой температуре горячего компонента. При этом стоит отметить, что эффект отражения на кривой блеска составляет менее 0,1 величины из-за большого расстояния между компонентами.

Звезда заслуживает дополнительного исследования на профессиональных телескопах. В первую очередь необходимо измерить кривую лучевых скоростей и оценить функцию масс. Относительно низкая орбитальная скорость позволяет практически напрямую определить размер компонентов и распределение яркости по диску горячего субкарлика. Во время затмения, которое длится полтора часа, можно получить спектр холодного компонента и уточнить зависимость между массой, температурой и радиусом для красных карликов в двойных системах. Также интерес представляет высокоточная фотометрия вблизи вторичного затмения на фазах от 0,49 до 0,51.

Работа выполнена в рамках проекта «Центр открытия астрономических объектов» на занятиях кружка «Практическая астрофизика» Московского дворца пионеров (ГБОУ «Воробьевы горы»).

ЛИТЕРАТУРА

Gaia Data Release 3 (Gaia DR3). Part 1. Main source. 2022. https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/I/355.

Masci F. J., *Laher R. R.*, *Rusholme R. et al.* The Zwicky Transient Facility: Data Processing, Products, and Archive // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2019. V. 131. Iss. 995. Article 18003. DOI 10.1088/1538-3873/aae8ac.

Nasonov D., *Denisenko D.*, *Minkovskiy A.*, *Gusev A.* New Variable Stars Discovered at Moscow Palace of Pioneers. Part 1. Eclipsing Binaries // Peremennye Zvezdy: Prilozhenie. 2024. V. 24. No. 3. DOI: 10.24412/2221-0474-2024-24-3. (= Насонов Д. С., Денисенко Д. В., Минковский А. Ф., Гусев А. В. Новые переменные звёзды, открытые в Московском Дворце пионеров. Часть 1. Затменные переменные // Переменные Звёзды (Приложение). 2024. Т. 24. № 3.)

Watson C. L., *Henden A. A.*, *Price A.* The International Variable Star Index (VSX) // The Society for Astronomical Sciences 25th Annual Symp. Telescope Sciences. 2006. Article 47.

DISCOVERY AND STUDY OF THE ECLIPSING VARIABLE STAR GRIGORIEV 1

V. S. Grigoriev, D. V. Denisenko

State education center "Vorobyovy gory", Moscow, Russia

This work is devoted to the discovery of the eclipsing variable star Grigoriev 1 and determining the parameters of its binary system. The star was found during the systematic checking of ultraviolet sources of GALEX space observatory in Pegasus constellation. Analysis of the ZTF project data has shown the presence of the eclipses with a depth of two magnitudes and a period of 6.5997 days. The duration of eclipse covers only 1 % of the orbital period, yet the partial phases are at least

30 times shorter. Those parameters imply that the star is a detached binary system with the white dwarf seen edge-on. The new object was added to the International Variable Star Index AAVSO VSX as Grigoriev 1. Over the 10 million objects in VSX database there are only 188 variable stars of EA/WD type. Among them, Grigoriev 1 has the longest orbital period. Moreover, its absolute magnitude M at maximum light from Gaia space observatory data is about +6.8. On the "color-luminosity" diagram it occupies the intermediate position between hot subdwarfs and white dwarfs which makes it even more interesting and worth studying at the professional telescopes.

Keywords: stars, binary stars, white dwarfs, variable stars, eclipsing binaries

Grigoriev Victor Sergeevich — 7th grade student
Denisenko Denis Vladimirovich — teacher of additional education, methodist

УДК 523.2 DOI: 10.21046/KMU-2025-118-123

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОТОКА ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА МГНС ВДОЛЬ ТРАССЫ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «БЕПИКОЛОМБО» К МЕРКУРИЮ

В. Д. Губарев [1,2], ***А. С. Козырев*** [1], ***И. Г. Митрофанов*** [1], ***М. Л. Литвак*** [1]

[1] **Институт космических исследований РАН, Москва, Россия**
[2] **Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт), Москва, Россия**

Проводится анализ потока нейтронов по данным российского эксперимента МГНС (Меркурианский гамма и нейтронный спектрометр), установленного на космическом аппарате ЕКА МПО (Меркурианский планетный орбитальный аппарат)/«БепиКоломбо». Нейтроны являются вторичными частицами, которые образуются в веществе космического аппарата под воздействием галактических космических лучей (ГКЛ). Данные вдоль трассы движения космического аппарата к Меркурию покрывают период с начала «круиза» КА «БепиКоломбо» (начало 2019 г.) по настоящее время. Данные эксперимента МГНС сопоставляются с данными нейтронных детекторов экспериментов ХЕНД/«Марс Одиссей» и БТН-М1/МКС (Блок тепловых нейтронов-М1 на Международной космической станции), которые проводят измерения на орбитах вокруг Марса и Земли, соответственно. Сопоставление данных прибора МГНС с данными других экспериментов позволяет оценить относительное уменьшение среднего потока ГКЛ около 20 % при приближении к Солнцу от орбиты Земли к орбите Меркурия.

Ключевые слова: галактические космические лучи, МГНС, ХЕНД, БТН-М1, Меркурий, поток нейтронов

ВВЕДЕНИЕ

Галактические космические лучи (ГКЛ) — высокоэнергетичные заряженные частицы, приходящие из межзвёздного пространства. Их интенсивность в Солнечной системе зависит от энергии космических частиц, активности Солнца и положения в гелиосфере. Поток ГКЛ уменьшается при приближении к Солнцу. Изучение этой зависимости важно для понимания физики гелиосферы, прогнозирования радиационной обстановки в космосе и уточнения моделей распространения космических лучей.

Методом исследования переменности ГКЛ является регистрация вторичных нейтронов, возникающих при взаимодействии ГКЛ с веществом космического аппарата (КА). Высокоэнергетические заряженные частицы сталкиваются с ядрами материалов, входящих в КА и вызывают ядерные реакции, в которых образуются нейтроны.

В данной работе исследуется изменение интенсивности потока ГКЛ вдоль траектории КА ЕКА МПО/БепиКоломбо (Меркурианский планетный орбитальный аппарат)/«БепиКоломбо») (*англ.* Mercury Planetary Orbiter/BepiColombo) к Меркурию по данным российского эксперимента МГНС (Меркурианский гам-

Губарев Виктор Дмитриевич — студент, лаборант, v.gubarev@np.cosmos.ru
Козырев Александр Сергеевич — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук
Митрофанов Игорь Георгиевич — заведующий отделом, доктор физико-математических наук
Литвак Максим Леонидович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, litvak@iki.rssi.ru

ма и нейтронный спектрометр) (Mitrofanov et al., 2021). Также данные эксперимента МГНС сопоставляются с данными следующих экспериментов:

- ХЕНД (*англ.* High-Energy Neutron Detector — HEND) — научная аппаратура, установленная на КА НАСА «Марс Одиссей» (*англ.* Mars Odyssey), для изучения нейтронного излучения поверхности Марса (Митрофанов и др., 2002);
- БТН-М1 (Блок тепловых нейтронов-М1) — научная аппаратура для проведения космического эксперимента «БТН-Нейтрон» по изучению потоков быстрых и тепловых нейтронов на борту служебного модуля Российского сегмента Международной космической станции (МКС) (Третьяков и др., 2010).

На рис. 1 представлена временная зависимость расстояния от Солнца до Марса (ХЕНД/«Марс Одиссей»), Земли (БТН-М1/МКС), Меркурия и КА «БепиКоломбо» (МГНС). На этом рисунке показано изменение расстояния между Солнцем и КА «БепиКоломбо» вдоль трасы его движения от орбиты Земли к орбите Меркурию, а также взаимное расположения научных приборов ХЕНД/«Марс Одиссей» и БТН-М1/МКС в Солнечной системе.

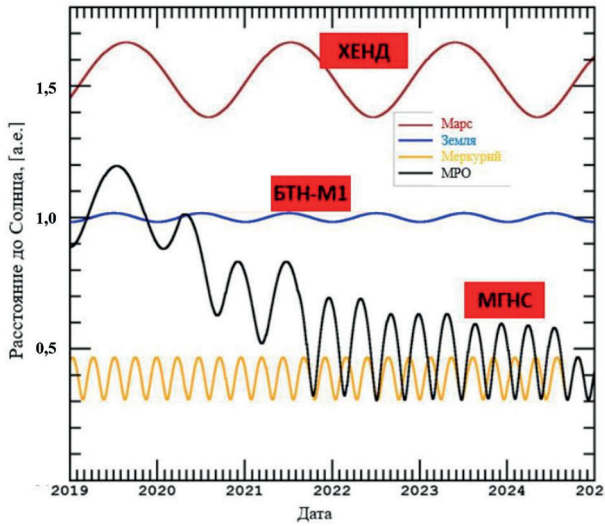


Рис. 1. Временные профили расстояния от Солнца до Марса (ХЕНД/«Марс Одиссей»), Земли (БТН-М1/МКС), Меркурия и КА БепиКоломбо (МГНС)

ОПИСАНИЕ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ

В работе используются данные трёх российских космических экспериментов, предназначенных для регистрации нейтронов: эксперимент МГНС на борту КА ЕКА МПО/«БепиКоломбо» для изучения нейтронного излучения поверхности Меркурия, эксперимент ХЕНД на борту КА НАСА «Марс Одиссей» для изучения нейтронного излучения поверхности Марса, и эксперимент БТН-М1 на борту МКС, измеряющий нейтронные потоки в околоземном пространстве. Научная аппаратура в этих космических экспериментах использует одинаковую методику детектирования нейтронов в широком энергетическом диапазоне, основанную на применении газонаполненных пропорциональных счётчиков на базе гелия-3

(^{3}He) для регистрации тепловых и эпитепловых нейтронов и сцинтилляционных детекторов на базе органического кристалла стильбена для регистрации быстрых нейтронов.

Принцип регистрации тепловых и эпитепловых нейтронов пропорциональным счётчиком основывается на ядерной реакции захвата теплового нейтрона ядром ^{3}He. Для разделения нейтронов по энергии и расширения регистрируемого диапазона в сторону более высоких энергий используются конструктивные элементы: кадмиевые фильтры, эффективно поглощающие тепловые нейтроны с энергией ниже ~0,4 эВ, и полиэтиленовые замедлители, содержащие водород, который замедляет быстрые нейтроны до энергий, доступных для регистрации ^{3}He-счётчиками после прохождения кадмиевого фильтра.

В эксперименте МГНС применяется система из нескольких нейтронных детекторов на основе ^{3}He-счётчиков с разной конфигурацией экранировки. Детектор SETN (*англ*. Sensor of EpiThermal Neutron), экранированный кадмиевой фольгой, регистрирует преимущественно эпитепловые нейтроны в диапазоне энергии ~0,4–1 кэВ, так как кадмий поглощает тепловую компоненту. Детектор SFN (*англ*. Sensor of Fast Neutron), снабжённый как полиэтиленовым замедлителем толщиной 1 см, так и кадмиевым фильтром, регистрирует нейтроны в более широком диапазоне: ~0,4–500 кэВ (преимущественно эпитепловые и резонансные); полиэтилен замедляет быстрые нейтроны, а кадмий отсекает тепловые. Неэкранированный детектор STN (*англ*. Sensor of Thermal Neutron) чувствителен в основном к тепловым нейтронам (Mitrofanov et al., 2021).

Эксперимент ХЕНД на КА «Марс Одиссей» имеет схожую компоновку нейтронных детекторов. Для регистрации тепловых и эпитепловых нейтронов используются пропорциональные ^{3}He-счётчики с полиэтиленовыми замедлителями разного объёма (детекторы SD (*англ*. Small Detector), MD (*англ*. Medium Detector), LD (*англ*. Large Detector)), что позволяет повысить эффективность регистрации нейтронов в широком энергетическом диапазоне. Принцип разделения нейтронов по энергиям идентичен эксперименту МГНС и достигается использованием кадмиевых экранов и полиэтиленовых замедлителей различной толщины. В частности, детектор MD оснащён полиэтиленовым замедлителем толщиной 1 см и кадмиевым фильтром толщиной 1 мм, аналогично детектору SFN в эксперименте МГНС (Митрофанов и др., 2002).

Эксперимент БТН-М1 на МКС использует прибор, который является запасным лётным образцом прибора ХЕНД. Поэтому он имеет идентичную конструкцию нейтронных детекторов, включая пропорциональные ^{3}He-счётчики SD, MD, LD с полиэтиленовыми замедлителями и кадмиевыми фильтрами для регистрации тепловых/эпитепловых нейтронов (Третьяков и др., 2010).

Для проведения совместного анализа данных экспериментов МГНС, ХЕНД и БТН-М1, расположенных в различных областях Солнечной системы, были выбраны детекторы SFN (МГНС) и MD (ХЕНД и БТН-М1). Этот выбор обусловлен их механической конструкцией с одинаковой толщиной полиэтиленового замедлителя (1 см) и кадмиевого фильтра (1 мм), что обеспечивает регистрацию нейтронов в едином энергетическом диапазоне ~0,4–500 кэВ. Такой подход минимизирует систематические ошибки при анализе данных нейтронных потоков от различных космических экспериментов.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе данных космических экспериментов МГНС/БепиКоломбо, ХЕНД/«Марс Одиссей» и БТН-М1/МКС был проведён анализ переменности нейтронных потоков за период с 2019 по 2025 г.

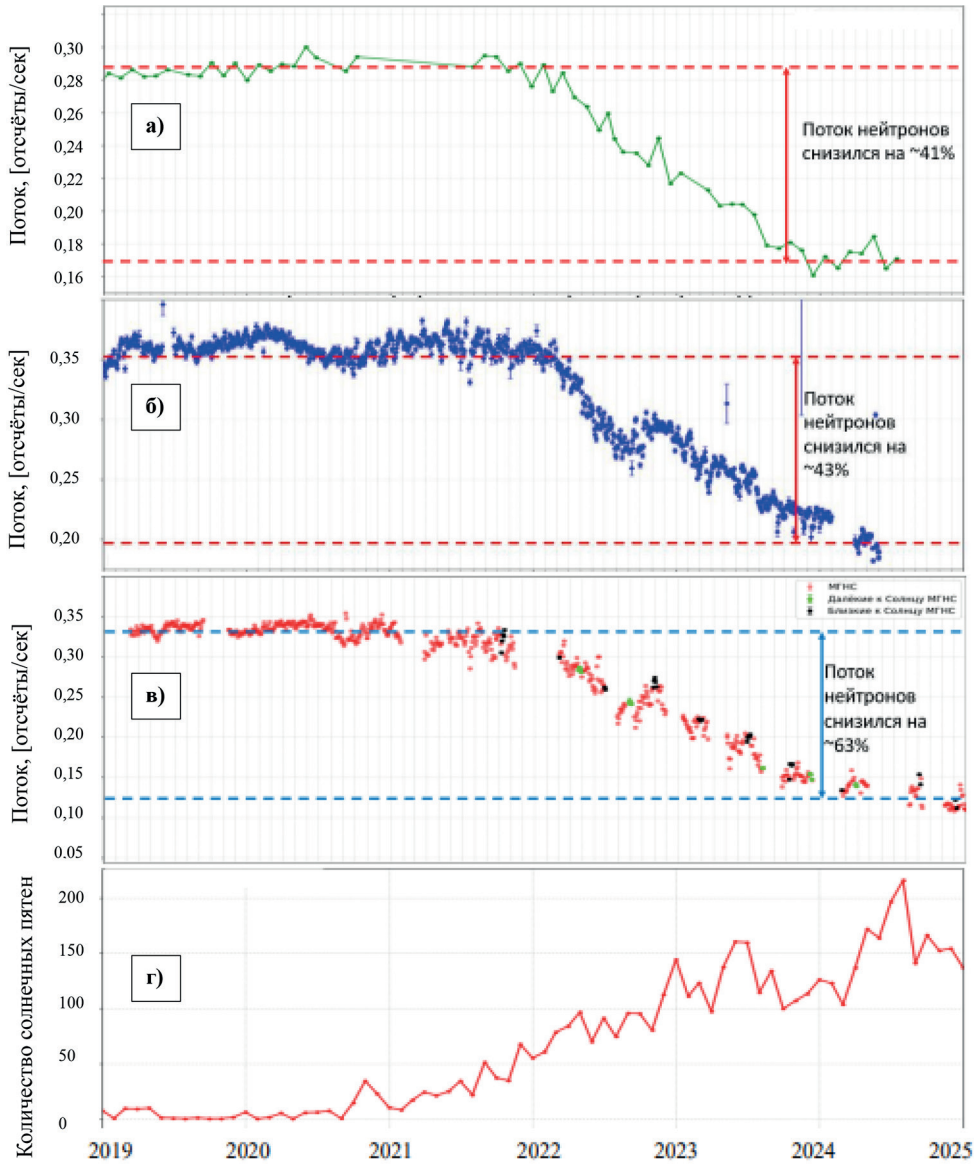


Рис. 2. Временные профили потока нейтронов: *а* — детектор MD эксперимента БТН-М1/МКС; *б* — детектор MD эксперимента ХЕНД/«Марс Одиссей»; *в* — детектор SFN эксперимента МГНС/«БепиКоломбо». Временной профиль количества солнечных пятен (солнечная активность) (*г*)

В ходе исследования были построены временные профили интенсивности нейтронного потока для этих экспериментов (рис. 2*а*–*в*). Для сопоставления нейтронного потока с активностью Солнца была построена зависимость солнечных пятен от времени в том же временном интервале (рис. 2*г*).

В таблице указано снижение потока нейтронов для приборов, используемых в исследовании. Доля снижения потока (в %) рассчитывалась от среднего значения в период 2019 – середина 2020 г., потому что именно в этот промежуток времени

солнечная активность была минимальна и постоянна и не вносила свой вклад в изменении интенсивности ГКЛ.

Из полученных данных можно сделать вывод, что на всех профилях наблюдается заметное снижение потока нейтронов, связанное с увеличением солнечной активности с середины 2020 г. При этом профили потоков нейтронов приборов ХЕНД/«Марс Одиссей» и БТН-М1/МКС на различных гелиоцентрических расстояниях для Марса и для Земли демонстрируют практически совпадающую относительную величину уменьшения потока ГКЛ около 40 % вследствие нарастания солнечной активности. Можно предположить, что указанная величина характеризует уменьшения потока ГКЛ во всей гелиосфере.

Доля снижения потока нейтронов, регистрируемого приборами

Прибор	Снижение потока нейтронов, %
БТН-М1/МКС	41
ХЕНД/«Марс Одиссей»	43
МГНС/«БепиКоломбо»	63

С другой стороны, было обнаружено, что относительное уменьшение потока нейтронов прибором МГНС вдоль траектории движения космического аппарата «БепиКоломбо» на расстояниях от 1,0 до 0,4 а. е. достигает 63 %. Вероятно, указанный эффект объясняется сочетанием двух факторов: уменьшением потока ГКЛ примерно на 40 % вследствие нарастания солнечной активности и дополнительным уменьшением ГКЛ на 20 % вследствие приближения аппарата «БепиКоломбо» к Солнцу. Отсюда следует, что имеет место радиальное ослабление усреднённого потока ГКЛ во внутренней области гелиосферы на масштабе от гелиоцентрического радиуса орбиты Земли до гелиоцентрического радиуса орбиты Меркурия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставлены нейтронные данные приборов МГНС/«БепиКоломбо», ХЕНД/«Марс Одиссей» и БТН-М1/МКС для выявления влияние гелиосферы на распространение ГКЛ на расстояниях от 0,4 до 1,5 а. е.

Выявлены ключевые закономерности в изменении интенсивности нейтронных потоков при движении космического аппарата «БепиКоломбо» к внутренним областям гелиосферы. При приближении к центру Солнечной системы КА «БепиКоломбо» накладываются два эффекта, снижающие поток ГКЛ на 63 % (таблица): первый эффект вызван увеличением солнечной активности, второй — приближением к центру Солнечной системы. Экспериментальным путём показано наличие радиальной составляющей уменьшения потока ГКЛ при приближении к Солнцу.

Полученные результаты могут быть полезны для уточнения математических моделей распространения галактических космических лучей в гелиосфере.

ЛИТЕРАТУРА

Митрофанов И. Г., *Анфимов Д. С.*, *Козырев А. С. и др.* Высокоэнергетический нейтронный детектор HEND для миссии Mars Odyssey: описание прибора и первые результаты // Косм. исслед. 2002. Т. 40. № 3. С. 255–281. DOI: 10.1023/A:1020851215265.

Третьяков В. И., *Митрофанов И. Г.*, *Бобровницкий Ю. И. и др.* Первый этап космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту Российского сегмента Международной космической станции // Косм. исслед. 2010. Т. 48. № 4. С. 293–307.

Mitrofanov I. G., *Kozyrev A. S.*, *Lisov D. I. et al.* The Mercury Gamma-Ray and Neutron Spectrometer (MGNS) Onboard the Mercury Planetary Orbiter of the BepiColombo Mission: Design Updates and First Measurements in Space // Space Science Reviews. 2021. V. 217. Article 67. DOI: 10.1007/s11214-021-00842-7.

STUDY OF THE INTENSITY DEPENDENCE OF GALACTIC COSMIC-RAY FLUX ALONG THE TRAJECTORY OF THE BEPICOLOMBO MISSION TO MERCURY BASED ON DATA FROM THE MGNS EXPERIMENT

V. D. Gubarev [1,2], ***A. S. Kozyrev*** [1], ***I. G. Mitrofanov*** [1], ***M. L. Litvak*** [1]

[1] **Space Research Institute of the RAS, Moscow, Russia**
[2] **National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) Moscow, Russia**

This study analyzes the neutron flux using data from the Russian MGNS experiment installed on the European Space Agency's MPO/BepiColombo spacecraft. Neutrons are secondary particles generated in the spacecraft's material under the effect of galactic cosmic rays (GCRs). The data collected along the spacecraft's trajectory to Mercury cover the period from the beginning of the BC cruise phase (early 2019) to the present. The data from the MGNS experiment are compared with data from neutron detectors in the HEND/Mars Odyssey and BTN-M1/ISS experiments, which perform measurements in orbits around Mars and Earth, respectively. Comparing data from the MGNS instrument with data from other experiments provides an estimate of the relative decrease in the average GCR flux of about 20 % when approaching the Sun from Earth's orbit to Mercury's orbit.

Keywords: Galactic Cosmic Rays, MGNS, HEND, BTN-M1, Mercury, neutron flux.

Gubarev Victor Dmitrievich — student, laboratory assistant, v.gubarev@np.cosmos.ru
Kozyrev Alexander Sergeevich — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences
Mitrofanov Igor Georgievich — head of department, doctor physical and mathematical sciences
Litvak Maxim Leonidovich — head of laboratory, doctor of physical and mathematical sciences, litvak@iki.rssi.ru

УДК 520.6 DOI: 10.21046/KMU-2025-124-132

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗВЁЗД ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ ШТАТНЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ДАТЧИКА ЗВЁЗДНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

В. Ю. Дементьев

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Визуализация изображений звёзд необходима на различных этапах наземных испытаний датчика звёздной ориентации. В особенности это проявляется в задаче отладки его программно-математического обеспечения. Цифровое моделирование небесной сферы в поле зрения прибора имеет неоспоримые преимущества перед наблюдением за реальным небосводом. Такой подход позволяет в непрерывном режиме вести отработку звёздного прибора, проверять работу штатных режимов функционирования, корректировать и вносить исправления в текущее программно-математическое обеспечение. В ИКИ РАН для этих целей используется специализированное программное обеспечение (ПО), входящее в состав стендового комплекса. В работе рассматривается модификация ПО, сохранившая преимущества предыдущих версий и получившая новые возможности. В частности, расширен функционал моделирования помеховых факторов внешней среды. Добавлена опция имитации дефектных пикселей, когда на фоне вывода небесной сферы фиксированное число пикселей на экране монитора целенаправленно остаётся подсвеченным. Благодаря такой программной реализации воссоздаётся имитация повреждения матричного фотоприёмника (МФП), характерная для условий работы в космосе с повышенным уровнем ионизирующего излучения. В результате этого стала доступной отработка специальных режимов датчика звёздной ориентации. В числе них разработанный специалистами ИКИ РАН режим автокоррекции дефектных пикселей МФП. Рассмотрены принципы, положенные в основу работы ПО. Описаны внешний интерфейс программы и способ взаимодействия с ней, который получил комплексный характер с возможностью управления по сети. Приведены функции, предназначенные для калибровки и юстировки стендового комплекса в процессе наземных испытаний, объединённые в рамках единого ПО.

Ключевые слова: ИКИ РАН, звёздный датчик, наземная отработка, дефектные пиксели

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отработка датчика звёздной ориентации неразрывно связана с созданием программного обеспечения (ПО), позволяющего визуализировать изображения звёзд в наземных условиях. Такой подход позволяет в непрерывном режиме вести отладку звёздного прибора, проверять работу штатных режимов функционирования, корректировать и вносить исправления в текущее программно-математическое обеспечение. Возможности натурного эксперимента имеют естественные стеснения, соединённые с погодными условиями, определяющими качество съёмки, учётом влияния атмосферной рефракции и др. В то же время недоступность всей небесной сферы и наблюдение за единичным участком реального небосвода не позволяет в полной мере оценить работу прибора. Ограниченность натурного эксперимента проявляется также и отсутствием условий, характерных для космического пространства. В числе них: заряженные частицы различной природы, включая и принадлежащие собственной внешней атмосфере космического аппарата (КА), засветка поля зрения и др. Имитация таких условий, достоверность их воспроизведения — важная составляющая в процедуре проверки помехоустойчивости звёздного прибора, эффективности заложенных внутренних алгоритмов защиты.

Дементьев Владимир Юрьевич — младший научный сотрудник, dementyev@cosmos.ru

Появление и широкое распространение в начале 2000-х гг. цифровых экранов мониторов стало первым шагом на пути к замещению реальной небесной сферы её имитационным изображением (Вицентий, 2019). Новые мониторы, пришедшие на смену ЭЛТ-мониторам (электронно-лучевой трубке), обеспечивали одинаковое расстояние между пикселями, что означало возможность сохранить одинаковое расстояние между изображениями звёзд при их экранном моделировании. В ИКИ РАН обозначенное время совпало с разработкой и исследованием первых датчиков звёздной ориентации. Для полноценной отработки этих приборов требовалась сканирование по всей небесной сферы с возможностью регулирования светооптической обстановки.

В результате специалистами ИКИ РАН было разработано специализированное ПО, вошедшее впоследствии в состав стендового комплекса (Аванесов и др., 2009а; Воронков, 2002а; Кондратьева, 2005). Под управлением данного ПО на экране жидкокристаллического монитора воспроизводился произвольный участок небесной сферы как в статике, так и в динамике. За счёт движения небесной сферы по экрану монитора достигалась симуляция орбитального полёта КА вместе с прибором. Дополнительно на изображение, выводимое на монитор, могли быть наложены световые помехи и компонента фона, имитирующая засветку от Солнца или других ярких объектов.

Многообразие вариантов движения с их вариациями открыло широкие возможности для отработки штатных режимов датчика звёздной ориентации, подтверждающих надёжность определения ориентации по всей небесной сфере. Моделирование помеховых ситуаций позволило максимально приблизить враждебность космических условий к реальности. Для их имитации использовались снимки изображений после мощных солнечных вспышек, полученные с геостационарного спутника «Ямал». На переданных изображениях со спутника содержалось помимо звёзд большое количество помеховых объектов. Данный материал лёг в основу не только программного моделирования последствий солнечных вспышек — потока заряженных частиц, но и дал импульс серии опытных экспериментов по облучению матричного фотоприёмника (МФП) на наземных источниках заряженных частиц (протонных ускорителях). Подобные эксперименты на базе современных МПФ продолжаются и теперь для более глубокого изучения радиационных эффектов, происходящих в них (Аванесов и др., 2009б; Белинская и др., 2018).

В процессе стендовых испытаний тестируемый прибор располагался неподвижно напротив экрана монитора со звёздами. Между ними размещался широкоугольный объектив (коллиматор) для создания оптической иллюзии удаления изображений звёзд в бесконечность. Съём телеметрических данных с прибора осуществлялся посредством контрольно-испытательной аппаратуры, замещающей бортовой комплекс управления. Параметры ориентации, рассчитанные прибором, отображались в реальном времени и дополнительно записывались в текстовый протокол.

В ИКИ РАН за многолетний период работы с помощью ПО прошли проверку уже множество датчиков звёздной ориентации, относящихся к разным поколениям. Достоверность моделирования параметров небесной сферы подкреплена большим объёмом наземных испытаний, результатами съёмки реальных звёзд и данными лётных приборов, функционирующих в космосе.

В статье речь пойдёт о модификации ПО, моделирующей небесную сферу. Данное ПО сохранило преимущества прежних версий и получило расширенный функционал в части моделирования помеховых факторов внешних среды (включая имитацию повреждения МФП дефектными пикселями), а также другие новшества и дополнения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕБЕСНОЙ СФЕРЫ

В качестве исходных данных для моделирования небесной сферы служат орбитальные параметры (долгота восходящего узла, наклонение, аргумент перигея) и скорость углового движения (рис. 1). На основе этих данных определяется положение оптической оси звёздного датчика в виде трёх углов ориентации: прямое восхождение, склонение и азимут. Далее рассчитываются элементы матрицы ориентации и определяется сектор звёздного каталога, соответствующий полю зрения прибора. Все звёзды, входящие в найденный сектор, проектируются на плоскость экрана монитора с предварительным пересчётом их сферических координат в прямоугольные (рис. 2). Непрерывное повторение данной процедуры обеспечивает перемещение участка небесной сферы по экрану монитора, отражая имитацию орбитального полёта КА с прибором.

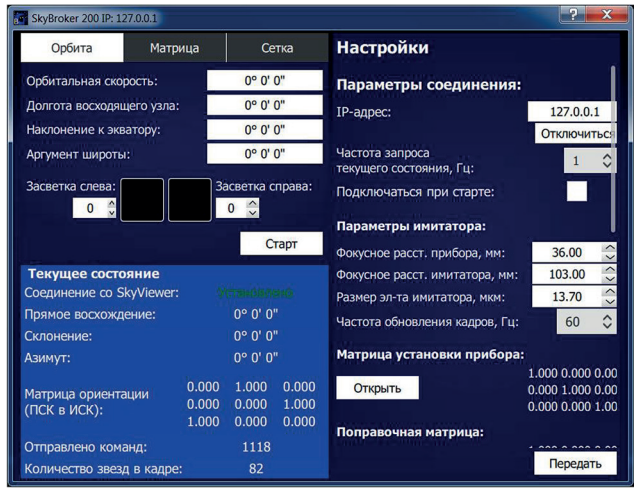


Рис. 1. Программа моделирования небесной сферы. Ввод орбитальных параметров и скорости углового движения



Рис. 2. Результат работы программы. Вывод участка звёздного неба с заданными координатами

Для задания новой траектории орбитального движения необходимо остановить текущий процесс моделирования, внести требуемые изменения и выполнить запуск повторно. В процессе полёта не допускается изменять параметры орбитального движения.

Информация о текущих параметрах ориентации поля зрения прибора всегда доступна в реальном времени. Она отображается значениями в виде угловых координат и матрицы ориентации в отдельном статусном поле (см. рис. 1). Параметры ориентации ПО удобно использовать для сравнения с показаниями, выданными звёздным датчиком во время его тестирования.

Растровая структура экрана монитора позволяет оперировать дискретным изменением координат звёзд. Для создания плавности движения небесной сферы необходимо пересчитывать координаты звёзд с заданной частотой. Для этого в опциях программы предусмотрена настройка, отвечающая за частоту обновления кадров. Изображение, выводимое на экран монитора, может обновляться с частотой до 100 кадров в секунду. Чем выше частота, тем более плавным будет представление изображений звёзд в динамике при их перемещении по экрану монитора.

Главной задачей при моделировании небесной сферы является корректность отображения звёзд на экране монитора. В настоящий момент в программе используется способ кодирования звезды одним пикселом. Это означает, что каждая звезда занимает на экране монитора ровно один пиксель, независимо от моделируемой скорости углового движения. Стоит отметить, что недостатком реализации такого варианта представления звёзд является округление их координат до целого значения, что приводит к некоторой погрешности моделирования угловых расстояний между ними. Повышение точности позиционирования можно достичь при кодировании звезды объектом 2×2 пикселя, что предполагается ввести в будущем.

Кодирование яркости звезды также имеет большое значение. Яркость изображений звёзд на экране монитора определяется кодировочной таблицей. В данной таблице каждому целочисленному значению звёздной величины ставится в соответствие значение яркости в градациях монитора. При этом яркость объектов, моделирующих звёзды с дробными значениями звёздных величин, будет определяться программой автоматически интерполяцией целочисленных табличных значений (рис. 3).

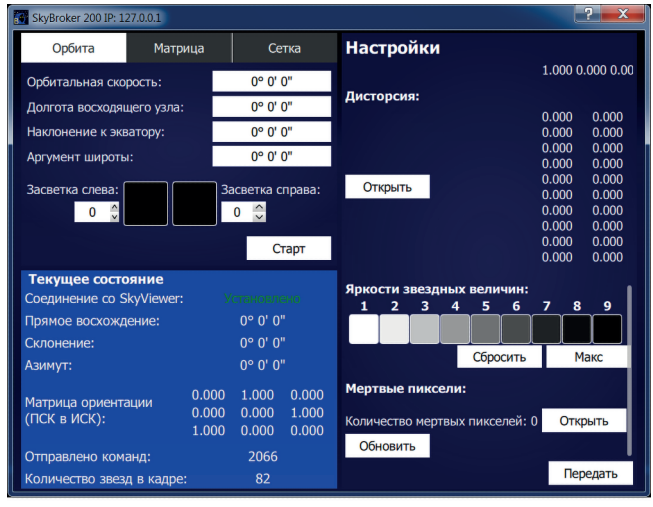


Рис. 3. Кодировочная таблица яркости звёзд, ранжированных по звездной величине

Для задания кодировочной таблицы необходимо заполнить поля её нижнего ряда значениями, полученными в ходе предварительной настройки стендового комплекса. Кодировочная таблица содержит звёзды от 1-й до 9-й звёздной величины. По умолчанию принимается, что звёзды ярче 1-й звёздной величины кодируются одинаково максимальным значением 255 градаций монитора. На основе данных о минимальной звёздной величине, регистрируемой прибором, можно упростить таблицу, приравняв часть её значений к нулю. После ввода всех значений каждое поле окрашивается, отображая цвет распределения яркости для каждой звёздной величины.

При моделировании звёздного неба используются различные версии звёздных каталогов, разделённые на сектора. Каждый звёздный каталог представляет собой набор файлов, содержащих сферические координаты звёзд (склонение и прямое восхождение) и их звёздные величины. Звёздные каталоги отличаются друг от друга количеством звёзд, а также способом разбивки на сектора. Часть из них дублирует бортовые каталоги, применяемые в различных датчиках звёздной ориентации ИКИ РАН. Другая часть включает расширенное число звёзд, скомплектованных на базе известных астрономических каталогов SAO (*англ*. Smithsonian Astrophysical Observatory) и Hipparcos.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОМЕХОВЫХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Космическая радиация относится к одним из самых неблагоприятных факторов, влияющих на КА и его бортовую аппаратуру. На околоземных орбитах, в которых функционирует большинство КА, наибольшую опасность представляют частицы радиационных поясов Земли (внутренний и внешний пояс Ван Аллена). Межпланетные КА подвержены воздействию солнечных и галактических космических лучей, которые из-за особенностей магнитного поля Земли проникают также и в приполярные области (Безродных и др., 2014).

Опыт эксплуатации приборов ИКИ РАН в космосе показывает, что высокоэнергетические заряженные частицы могут приводить к кратковременному, а в некоторых случаях и к продолжительному ослеплению датчиков звёздной ориентации. На изображениях звёздного неба, получаемых с приборов в результате такого контакта, регистрируется большое число помеховых объектов. Такие объекты практически неотличимы от изображений настоящих звёзд, что является причиной сбоев и невозможности определения ориентации.

Для создания подобной ситуации в ПО встроена функция моделирования помеховых объектов. Координаты помеховых объектов определяются случайным образом на каждом такте обновления изображения. При выводе таких объектов на экран монитора они будут принимать как форму точки, так и форму трека различной длины (рис. 4). Выбор такой конфигурации обусловлен разнообразными углами падения заряженных частиц относительно плоскости МФП, оставляющих за собой различный энергетический след (Воронков, 2002б). В ПО результат имитации воздействия заряженных частиц на прибор полностью коррелируется с результатами, полученными в ходе наземных экспериментов на источниках заряженных частиц, а также с КА серии «Ямал» (неоднократно подвергшемуся воздействию потоку заряженных частиц от солнечных вспышек).

В то же время накапливаемая доза радиации ведёт к более серьёзным и долговременным последствиям на МФП. Высокоэнергетические заряженные частицы, воздействуя на МФП, вызывают его постепенную деградацию и как следствие ухудшают его эксплуатационные характеристики. Воздействие радиации сопровождается необратимыми изменениями в структуре кремния, применяемого при изготовлении светочувствительных ячеек-пикселей МФП. Вследствие радиации

возникает разрушение кристаллической решётки кремния и перераспределение атомов в его структуре, что приводит к образованию дефектных пикселей на МФП (Чумаков, 2024).

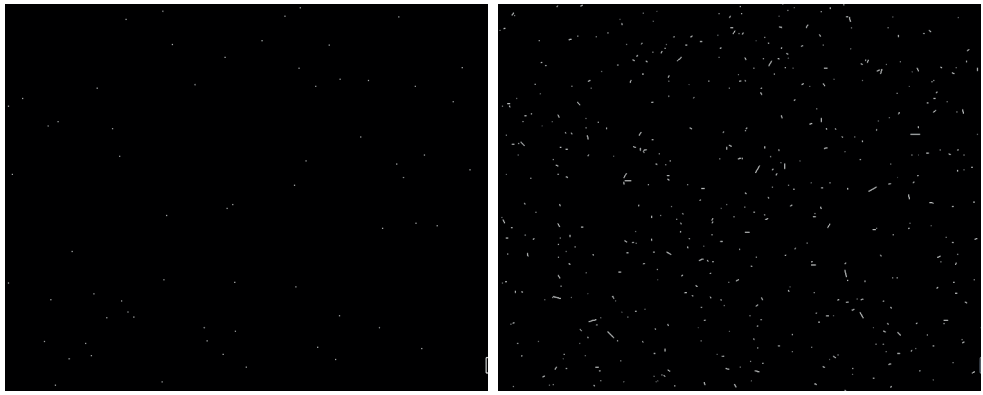


Рис. 4. Моделирование имитации потока заряженных частиц (*справа*) и их отсутствие на фоне небесной сферы (*слева*)

Дефектные пиксели перестают реагировать на световой поток от звёзд, сокращая полезную площадь МФП. Особенность таких пикселей — это повышенное значение сигнала с координатами МФП, не меняющимися от экспонирования к экспонированию. Единичное число дефектных пикселей фактически не сказывается на работе звёздных приборов и допускается по технологии производства современных МФП. Однако рост их числа вследствие радиации со временем приводит к снижению эффективности работы звёздных приборов, провоцируя низкоточные измерения и неустойчивость в их работе.

С целью воссоздания имитации повреждения МФП в ПО встроена отдельная самостоятельная функция. Добавлена опция имитации дефектных пикселей, когда на фоне вывода небесной сферы фиксированное число пикселей на экране монитора целенаправленно остаётся подсвеченным. При таком программном исполнении на МФП звёздного прибора регистрируется тождественное число объектов, концентрирующихся точечно в одном месте в виде совокупности пикселей. Это создаёт иллюзию покрытия МФП дефектными пикселями. Благодаря такой программной реализации стала доступной отработка специальных режимов датчика звёздной ориентации. К их числу относится режим автокоррекции дефектных пикселей, осуществляющий их автоматический поиск и компенсацию.

Перед моделированием дефектных пикселей необходимо заранее подготовить и загрузить в программу текстовый файл. В таком файле на каждой строке записываются параметры дефектных пикселей: координаты и их яркость. В дальнейшем планируется использовать набор готовых стандартных шаблонов (дефектных карт), без ручного ввода значений и открытия через файл. Также в качестве шаблона предполагается использовать зарезервированную модель небесной сферы. При прохождении небесной сферы через свою копию, совпадающую одновременно с картой дефектов будет наблюдаться максимум эффекта компенсации. При этом для оценки адаптивных качеств режима автокоррекции планируется ввести возможность включения, отключения и смены карты дефектов непосредственно в процессе орбитального полёта.

Другим нежелательным фактором, затрудняющим работу звёздного прибора, становится наличие засветки. Повышенный или неравномерный уровень фона на

снимке звёздного неба может наблюдаться при попадании в поле зрение прибора ярких излучателей наподобие Солнца, Земли, планет и др. Другой возможной причиной увеличения уровня фона может быть рост темнового сигнала, сигнализирующий о радиационном повреждении МФП.

Ситуация частичного или полного ослепления звёздного датчика осуществляется в опциях ПО регулированием фоновой компоненты на экране монитора. Существует возможность создания различного фона изображения как равномерного, так и равномерно изменяющегося (рис. 5).



Рис. 5. Моделирование засветки поля зрения различного типа и её отсутствие на фоне небесной сферы (*слева вверху*)

Для моделирования равномерного фона изображения в соответствующие поля ПО (см. рис. 1), отвечающих за левую и правую границы изображения, вводятся одинаковые значения в градациях монитора из диапазона [0...255]. Полная засветка (белый фон) моделируется, когда все значения заданы своим максимумом 255. Отсутствие засветки (чёрный фон) моделируется, когда все значения заданы 0. Для моделирования равномерно изменяющейся засветки значения полей для левой и правой границы не должны совпадать, но должны принадлежать тому же диапазону [0...255]. В этом случае яркость фона моделируемого изображения будет представлять собой градиентную заливку (см. рис. 5).

Программное обеспечение допускает моделирование помеховых факторов среды (дефектов, помех, засветки) как по отдельности, так и совместно. Таким образом, имеет место составление комбинации нескольких факторов одновременно.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ

Моделирование небесной сферы осуществляется с помощью программного обеспечения, разделённого на два приложения. Одно из приложений управляет процессом моделирования, а второе отвечает за отображение сформированного графического изображения, транслируемое в поле зрения прибора. Оба приложения могут храниться совместно в памяти компьютера стенда или быть разнесёнными на разные машины. В последнем случае взаимодействие с ПО имеет комплексный характер, когда начальная информация об орбитальных параметрах и параметрах внешней среды может быть передана по локальной сети с внешнего компьютера. При обмене информацией компьютер стенда является сервером (исполнителем команд), а внешний компьютер — клиентом (задатчиком команд). Инициатором обмена служит ПО внешнего компьютера. Получив начальные параметры моделирования запускается режим расчёта орбитального движения и формирование с заданной частотой графического изображения на экране монитора стенда. Такое управление позволяет осуществлять дистанционный способ связи со стендовым комплексом и проводить тестирование звёздного прибора, даже находясь вдали от него.

В процессе наземных испытаний требуется регулярно уточнять оптические параметры стендового комплекса: фокусное расстояние коллиматора и его дисторсию. Эта обязательная операция необходима также после любой юстировки и иных вмешательств в стендовый комплекс. Для определения указанных оптических параметров выводится сетка точек, которая заполняет весь экран монитора. Шаг сетки подбирается таким образом, чтобы на полученном с прибора изображении регистрировалось достаточное число объектов. Сохранённое изображение дополнительно обрабатывается. Результат обработки в виде фокусного расстояния коллиматора и дисторсии, заносится в опции ПО.

Для проведения калибровочных работ в разработанное ПО уже включена возможность вывода регулярной сетки точек и её настройки. При этом не требуется запуск дополнительных программ. Данная функция реализована в рамках единого ПО и позволяет осуществлять калибровочные мероприятия, моделирование небесной сферы, а также свободное переключение между ними.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено разработанное программное обеспечение визуализации изображений звёзд, предназначенное для наземной отработки датчика звёздной ориентации. Преимущество использования данного ПО заключается в возможности всесторонней проверки программно-математического обеспечения звёздного прибора, включая отработку как штатных, так и специальных режимов функционирования. К последним относится режим автокоррекции дефектных пикселей, реализованный в приборах ИКИ РАН для работы в условиях повышенной радиационной нагрузки.

Рассмотрены принципы моделирования небесной сферы и факторов внешней среды, заложенные в основу работы ПО. Описаны внешний интерфейс программы и способ взаимодействия с ней, который имеет комплексный характер с возможностью удалённого управления по локальной сети. Приведены дополнительные функции, необходимые для калибровки и юстировки стендового комплекса в процессе наземных испытаний, объединённые в рамках единого ПО.

ЛИТЕРАТУРА

Аванесов Г. А., *Воронков С. В.*, *Дунаев Б. С. и др.* (2009а) Имитаторы звездного неба для наземной отработки датчиков звездной ориентации // Всероссийская научно-техн. конф. «Современ. проблемы определения ориентации и навигации косм. аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 372–386.

Аванесов Г. А., *Акимов В. В.*, *Воронков С. В.* (2009б) Результаты испытаний ПЗС-матриц российского и зарубежного производства на источниках заряженных частиц // Всероссийская научно-техн. конф. «Современ. проблемы определения ориентации и навигации косм. аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 447–457.

Безродных И. П., *Шафер Ю. Г.*, *Семенов В. Т.* Радиационные эффекты в космосе. Часть 1. Радиация в околоземном космическом пространстве. М.: ОАО «Корпорация ВНИИЭМ», 2014. 106 с.

Белинская Е. В., *Кобелева А. А.*, *Сметанин П. С. и др.* Сравнение эффектов структурных повреждений в матрицах КМОП и ПЗС, применяемых в звёздных датчиках, на примере CMV4000 и ФППЗ «Лев-4» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 119–130. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-119-130.

Вицентий А. В. Мультимедиа технологии: Аппаратные средства и методы отображения визуальной информации: учеб. пособие. Мурманск: Лань, 2019.

Воронков С. В. (2002а) Применение стенда динамических испытаний в задачах отработки астронавигационных приборов: препринт. М.: ИКИ РАН, 2002. Пр-2068. 22 с.

Воронков С. В. (2002б) Исследование природы длинных треков, возникающих на ПЗС-матрице блока определения координат звезд под воздействием протонов солнечных вспышек: препринт. М.: ИКИ РАН, 2002. Пр-2071. 14 с.

Кондратьева Т. В. Моделирование параметров движения космических аппаратов и внешних условий космического пространства в процессе наземных испытаний звездных координаторов: препринт. М.: ИКИ РАН, 2005. Пр-2120. 21 с.

Чумаков А. И. Радиационные эффекты в интегральных схемах. М.: Техносфера, 2024. 384 с.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR VISUALIZING STAR IMAGES FOR GROUND-BASED TESTING OF NOMINAL AND SPECIAL MODES OF A STAR TRACKER

V. Yu. Dementyev

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

Star image visualization is essential in various stages of star tracker ground testing, especially for debugging its software. Digital celestial sphere modeling offers significant advantages over real sky observation, enabling continuous instrument development, operational mode verification, and software correction. At IKI RAS, specialized software within a testbed complex is used for this purpose. This paper discusses a software modification that retains previous advantages while adding new capabilities, particularly expanded modeling of external interference factors. Added a defective pixel simulation option, where a fixed number of pixels remain illuminated against the celestial sphere background. This simulates matrix photodetector (MPD) damage characteristic of high-radiation space environments, enabling the development of special star tracker modes, including the Space Research Institute's (IKI) MPD defective pixel auto-correction mode. The software's principles of operation are discussed. The program's external interface and network-controllable interaction method are described. Calibration and alignment functions for ground testing are integrated within the software.

Keywords: IKI RAS, star tracker, ground testing, defective pixels

Dementyev Vladimir Yurievich — junior research, dementyev@cosmos.ru

УДК 523.9-1/-8 DOI: 10.21046/KMU-2025-133-135

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛН СЖАТИЯ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕАДИАБАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

С. Б. Дертеев, В. Н. Горяева, Б. Б. Михаляев

Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова
Элиста, Россия

Для изучения наблюдаемых в солнечной короне волн сжатия предложен подход, основанный на теории неадиабатических акустических волн, поведение которых определяется свойствами теплопроводности, постоянного удельного нагрева и радиационного охлаждения корональной плазмы. Периоды, которые наблюдаются в спектрах волн сжатия, имеют характерные значения 20–30 мин, которые обычно несколько раз меняются в течение 2–3 ч. Это ставит под сомнение общепринятую интерпретацию явления, называемого волнами сжатия. Мы показали, что появление короткого и длинного периода в акустическом возмущении можно объяснить, рассматривая суперпозицию акустических волн с упомянутыми свойствами в виде локализованного импульса. Наблюдаемые волны сжатия можно представить в виде последовательности отдельных акустических возмущений, генерируемых в основании короны. Они несут информацию о мелкомасштабных нестационарных процессах в нижней атмосфере и могут быть использованы для её изучения.

Ключевые слова: волны сжатия, солнечная корона, коротковолновое ультрафиолетовое излучение

В солнечной короне в коротковолновом ультрафиолетовом диапазоне с помощью космических аппаратов, например AIA/SDO (*англ*. Atmospheric Imaging Assembly/ Solar Dynamics Observatory), наблюдаются распространяющиеся возмущения интенсивности излучения, которые интерпретируются как волны сжатия (рис. 1). Их регистрируют как в активных областях, так и в корональных дырах, для их описания используют теорию неадиабатических медленных магнитоакустических или акустических волн (Banerjee et al., 2011; Meadowcroft, Nakariakov, 2025; Sharma et al. 2020). Также волны сжатия могут использоваться для решения задач корональной сейсмологии (Stepanov et al., 2012). При наблюдении волн сжатия возникает ряд проблем: наличие нескольких периодов в вейвлете и их нерегулярность, широкий спектр сигнала и скорость меньше звуковой. Несколько периодов в вейвлете объясняется наличием квазипериодических колебаний (Gupta, 2014; O'Shea et al., 2006; Pant et al., 2015); то, что скорость меньше звуковой — в некоторых случаях является действием эффекта проекции (De Moortel et al., 2002), но широкий спектр сигнала и нерегулярность наблюдения периодов всё ещё остаются загадками.

Основываясь на вейвлет-анализе наблюдаемых колебаний и смоделированных узколокализованных сигналов, можно предположить, что наблюдаемые распространяющиеся возмущения являются последовательностью отдельных акустических импульсов, что может дать ответ на все представленные проблемы при наблюдении волн сжатия. Для подтверждения данных выводов рассматривалось поведение распространяющихся возмущений, проводился автокорреляционный анализ получаемого временного сигнала (рис. 2), коэффициент автокорреляции при этом равен 0,25, что согласно критериям показывает очень слабую взаимо-

Дертеев Сергей Бадмаевич — старший преподаватель, derteevsergei@mail.ru
Горяева Виктория Николаевна — старший преподаватель
Михаляев Бадма Борисович — заведующий кафедрой теоретической физики, доктор физико-математических наук

связь между событиями. В дальнейшем планируется увеличение подобных наблюдений, для расширения статистического анализа.

Предполагаем, что квазипериодические колебания имеют место только в заданном импульсе, продолжительность которого порядка длинного периода, часто 20–30 мин. В следующем импульсе они могут измениться, поскольку зависят от длины начального импульса, формируемого на границе короны и нижней атмосферы (Derteev et al., 2024).

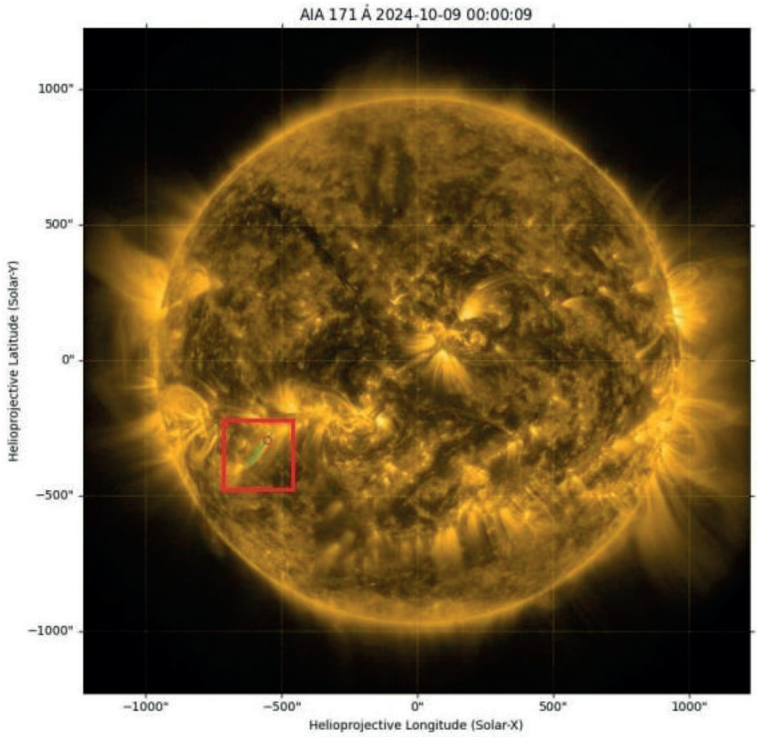


Рис. 1. Изображение с SDO/AIA, красный квадрат — наблюдаемая область, зелёного цвета — линия вдоль которой регистрируются возмущения, красный кружок — точка наблюдения, учтено вращение. Программное обеспечение — Sunpy

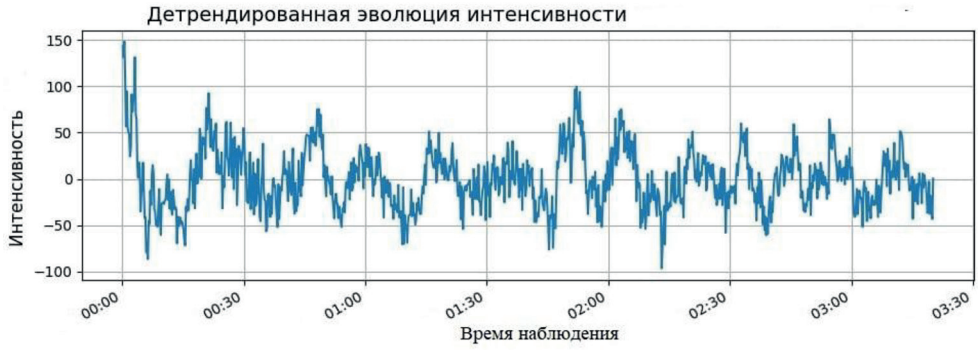


Рис. 2. Временной сигнал

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ №075-03-2025-420/4.

ЛИТЕРАТУРА

Banerjee D., *Gupta G. R.*, *Teriaca L.* Propagating MHD waves in coronal holes // Space Science Reviews. 2011. V. 158. Iss. 2–4. P. 267–288. DOI: 10.1007/s11214-010-9698-z.

De Moorte I., *Ireland J.*, *Walsh R. W.*, *Hood A. W.* Longitudinal intensity oscillations in coronal loops observed with TRACE. I. Overview of measured parameters // Solar Physics. 2002. V. 209. P. 61–88. DOI: 10.1023/A:1020960505133.

Derteev S. B., *Saparliev M. E.*, *Shividov N. K.*, *Mikhalyaev B. B.* Acoustic Waves in a High-Temperature Plasma III. Two-Periodic Disturbances // Solar Physics. 2024. V. 299. Iss. 10. Article 141. DOI:10.1007/s11207-024-02381-0.

Gupta G. R. Observations of dissipation of slow magneto-acoustic waves in a polar coronal hole // Astronomy and Astrophysics. 2014. V. 568. Article A96. 11 p. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201323200.

Meadowcroft R. L., *Nakariakov V. M.* Fine structuring of slow magnetoacoustic wave periods in a solar coronal fan // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. 2025. V. 536. Iss. 4. P. 3192–3199. https://doi.org/10.1093/mnras/stae2739.

O'Shea E., *Banerjee D.*, *Doyle J. G.* Magnetoacoustic wave propagation in off-limb polar regions // Astronomy and Astrophysics. 2006. V. 452. No. 3. P. 1059–168. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053687.

Pant V., *Dolla L.*, *Mazumder R. et al.* Dynamics of on-disk plumes as observed with the interface region imaging spectrograph, the atmospheric imaging assembly, and the helioseismic and magnetic image // Astrophysical J. 2015. V. 807. No. 1. Article 71. DOI 10.1088/0004-637X/807/1/71.

Sharma A., *Tripathi D.*, *Erdelyi R. et al.* Wave amplitude modulation in fan loops as observed by AIA/SDO // Astronomy and Astrophysics. 2020. V. 638. Article A6. 11 p. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936667.

Stepanov A. V., *Zaitsev V. V.*, *Nakariakov V. M.* Coronal Seismology: Waves and Oscillations in Stellar Coronae. 1st ed. WILEY-VCH Verlag, 2012. 8 p.

FORMATION OF COMPRESSIVE WAVES IN THE SOLAR CORONA UNDER THE INFLUENCE OF ADIABATIC PROCESSES

S. B. Derteev, V. N. Goryaeva, B. B. Mikhalyaev

Kalmyk State University named after B. B. Gorodovikov, Elista, Russia

To study the compressive waves observed in the solar corona, an approach is proposed based on the theory of nonadiabatic acoustic waves whose behavior is determined by the properties of thermal conductivity, constant specific heating, and radiative cooling of the coronal plasma. The periods observed in the spectra of compressive waves have characteristic values of 20–30 min, which usually change several times over 2–3 hours. This challenges the generally accepted interpretation of the phenomenon called compressive waves. We have shown that the appearance of a short and a long period in an acoustic disturbance can be explained by considering a superposition of acoustic waves with the above-mentioned properties in the form of a localized pulse. The observed compressive waves can be represented as a sequence of individual acoustic disturbances generated at the base of the corona. They carry information about small-scale non-stationary processes in the lower atmosphere and can be used to study it.

Keywords: compressive waves, solar corona, extreme ultraviolet radiation

Derteev Sergei Badmaevich — senior lecturer, derteevsergei@mail.ru
Goryaeva Viktoria Nikolaevna — senior lecturer
Mikhalyaev Badma Borisovich — head of department, doctor of physical and mathematical sciences

УДК 520.662: 551.583 DOI: 10.21046/KMU-2025-136-140

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ВЫБРОСОВ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ: ПЕРСПЕКТИВЫ И РИСКИ

А. А. Жихарева

**Исследовательский центр «Космическая экономика и политика»
Москва, Россия**

Спутниковый мониторинг парниковых газов в последние годы стал одним из наиболее перспективных сегментов рынка дистанционного зондирования Земли, обеспечивая глобальное покрытие, высокую точность и оперативность наблюдений. Однако современная международная климатическая политика переживает период значительных трансформаций, которые могут кардинально изменить направление глобальных усилий по декарбонизации. После периода активного декларирования обязательств по достижению углеродной нейтральности в 2019–2021 гг., когда более 100 стран взяли на себя соответствующие обязательства, международное сообщество сталкивается с новыми вызовами. Ключевым событием стал выход США из Парижского соглашения по климату, что создало прецедент для пересмотра национальных климатических стратегий. В данном контексте особую актуальность приобретает анализ перспектив развития рынка спутникового мониторинга парниковых газов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, парниковые газы, спутниковый мониторинг, климатическая политика, углеродная нейтральность, национальные системы мониторинга, международное сотрудничество, технологический суверенитет

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РЫНКА СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Мировой рынок спутникового наблюдения за Землёй оценивается в 7,7 млрд дол. в 2021 г. с прогнозируемым ростом до 14,2 млрд дол. к 2030 г. при среднегодовом темпе роста 7 %. Сегмент мониторинга парниковых газов представляет одну из наиболее быстрорастущих ниш этого рынка. В России развивается собственная экосистема климатического мониторинга (Севостьянов и др., 2023). Российская компания SR CMS в 2024 г. запустила первую платформу для мониторинга парниковых газов на основе данных ДЗЗ, интегрирующую информацию от более чем 70 тыс. российских предприятий. Роскосмос также реализует проекты по созданию специализированных спутниковых группировок для оценки углеродного следа. Тем не менее, в связи с выходом США из климатических соглашений, возникает ряд рисков для операторов дистанционного зондирования Земли.

В первую очередь, такая ситуация может привести к дестабилизации международной системы отчётности. Согласно Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК), страны-участницы обязаны ежегодно представлять национальные кадастры парниковых газов (ПГ). В 2022 г. национальные академии наук, инженерии и медицины опубликовали отчёт, в котором признали сложность координации различных систем мониторинга и отчётности по выбросам парниковых газов, а также проблемы с точностью некоторых из них. Отчёт США считается одним из самых надёжных в мире. Однако выход из РКИК ООН технически освобождает США от обязательств по расчёту и представлению национального кадастра, что создаёт сложности в получении достоверной информации о глобальном уровне выбросов.

Жихарева Анастасия Аркадьевна — студентка-практикантка
anastasiia.zhikharev@gmail.com

Кроме того, выход США из Парижского соглашения сопровождается указанием прекратить финансовые обязательства в рамках международного климатического сотрудничества. Это может привести к сокращению финансирования программ спутникового мониторинга, реализуемых международными организациями.

Технологический риск заключается в возможном замедлении развития новых технологий наблюдения за парниковыми газами в связи с ослаблением американского участия в климатическом мониторинге. Исторически США являются одним из лидеров в области космических технологий и ДЗЗ (Salama et al., 2022). Однако на фоне активного роста доли китайских компаний такой поворот событий маловероятен. Новые китайские игроки уже обладают рядом технологических преимуществ, опережая американские фирмы в отдельных нишах.

Китай — крупнейший эмитент ПГ в мире (27 % глобальных выбросов в 2019 г.) (Meng et al., 2022). Для контроля и верификации данных о выбросах, а также для повышения прозрачности и доверия к климатическим инициативам КНР активно развивает технологии спутникового мониторинга. Страна придерживается комплексной политики по контролю и сокращению выбросов парниковых газов, ориентированной на достижение пика выбросов к 2030 г. и углеродной нейтральности к 2060 г. В рамках 14-й и 15-й пятилеток (2021–2025 и 2026–2030 гг.) КНР внедряет систему «двойного контроля» — регулирование как абсолютных выбросов, так и их интенсивности на единицу ВВП с поэтапным усилением мер и переходом к централизованному управлению выбросами. Одновременно страна укрепляет позиции на мировом рынке.

Рост и укрепление позиций Китая на рынке спутникового мониторинга оказывают комплексное влияние на российский сегмент, формируя как новые возможности, так и дополнительные вызовы. С одной стороны, сотрудничество с Китаем в рамках таких форматов, как АТЭС, а также через двусторонние инициативы создаёт предпосылки для технологического обмена, реализации совместных проектов и выхода российских услуг ДЗЗ на новые рынки. Это особенно актуально в контексте усиления регионального спроса на точные климатические данные, что стимулирует развитие отечественных платформ мониторинга и их интеграцию с международными системами. Кроме того, конкуренция с китайскими игроками выступает катализатором инноваций, способствуя повышению качества российских технологий спутникового мониторинга и их соответствию современным требованиям.

С другой стороны, активная экспансия Китая на мировом рынке ДЗЗ может ограничить экспортный потенциал российских операторов, особенно в странах Азии и Африки, где китайские решения предлагаются на конкурентных условиях. Ещё одним вызовом является необходимость адаптации российских технологий к быстро эволюционирующим международным стандартам, которые Китай не только активно внедряет, но и во многом формирует, усиливая своё влияние в глобальных регулирующих рамках. Политико-экономические факторы, включая санкционное давление и геополитическую конкуренцию, также вносят дополнительные ограничения, усложняя полноценное технологическое партнёрство между двумя странами. Таким образом, динамичное развитие китайского сегмента спутникового мониторинга требует от России гибкой стратегии, сочетающей углубление сотрудничества в ключевых областях с усилением конкурентоспособности национальных решений на фоне растущей глобальной конкуренции.

ПУТИ МИНИМИЗАЦИИ РИСКОВ

В контексте вышеописанных тенденций одним из ключевых направлений снижения рисков является диверсификация клиентской базы российских операторов ДЗЗ. Особую значимость приобретает развитие сотрудничества с региональными объединениями, такими как АТЭС, где Россия уже занимает активную позицию в области климатического мониторинга. Согласно данным Департамента многостороннего экономического сотрудничества и специальных проектов Минэкономразвития России, российские наработки в рамках инновационных проектов вызывают значительный интерес среди стран АТЭС, особенно в части комплексного подхода к борьбе с изменением климата. Это открывает перспективы для расширения экспорта российских технологий ДЗЗ и укрепления позиций на азиатско-тихоокеанском рынке.

Другим важным аспектом минимизации рисков является развитие национальных и региональных систем мониторинга, что позволяет снизить зависимость от международных программ, подверженных геополитическим колебаниям. В этом направлении Россия уже предпринимает значительные шаги, реализуя «Единую национальную систему мониторинга климатически активных веществ» — стратегический проект, направленный на создание независимой инфраструктуры для климатических исследований. Подобные инициативы не только укрепляют суверенитет в области экологического мониторинга, но и формируют основу для будущего экспорта соответствующих технологий и методологий.

Технологическая кооперация с международными партнёрами, включая азиатские компании, также способна компенсировать сокращение взаимодействия с американскими операторами ДЗЗ. Совместные проекты, предполагающие интеграцию данных с различных спутниковых систем, позволяют повысить точность и надёжность мониторинга, а также обеспечить взаимодополняемость ресурсов. Это особенно актуально в условиях, когда ни одна страна не обладает абсолютной самодостаточностью в области космического наблюдения.

Наконец, значительный потенциал в снижении операционных рисков и повышении конкурентоспособности российских систем ДЗЗ связан с внедрением передовых технологий искусственного интеллекта (ИИ) и автоматизации. Использование ИИ для обработки спутниковых данных позволяет не только ускорить анализ больших массивов информации, но и минимизировать влияние человеческого фактора, снижая затраты и повышая точность прогнозов. Это направление становится критически важным в условиях растущей конкуренции, где ключевыми факторами успеха являются скорость и качество предоставляемых данных.

Таким образом, комплексный подход, сочетающий диверсификацию партнёрства, развитие национальных систем, международную кооперацию и внедрение инновационных технологий, способен обеспечить устойчивость российского сегмента спутникового мониторинга в условиях динамично меняющейся глобальной конъюнктуры.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КЛИМАТИЧЕСКОГО СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА В РОССИИ

Россия обладает значительным потенциалом для укрепления своих позиций в сфере климатического спутникового мониторинга, что обусловлено рядом стратегических факторов (Тимофеев и др., 2022). Одним из ключевых драйверов развития этого направления является принятие Климатической доктрины РФ, которая ставит амбициозную цель достижения углеродной нейтральности к 2060 г. Данный

курс формирует устойчивый внутренний спрос на высокоточные системы мониторинга парниковых газов и других климатически активных веществ, создавая долгосрочную основу для инвестиций в соответствующие технологии (Беликова и др., 2022).

Важным конкурентным преимуществом России выступает наличие развитой космической инфраструктуры и многолетних компетенций в области ДЗЗ. Отечественные спутниковые группировки, такие как «Метеор-М» и «Арктика-М», уже сегодня обеспечивают мониторинг ключевых климатических параметров, а перспективные разработки в области гиперспектральной съёмки и малых спутников открывают новые возможности для повышения детализации и оперативности наблюдений.

Геополитическая динамика также создаёт благоприятные условия для усиления роли России на глобальном рынке климатического мониторинга (Севостьянов, Макаев, 2023). В условиях ослабления традиционного лидерства США в этой сфере и роста скепсиса развивающихся стран в отношении западных данных, российские системы ДЗЗ могут позиционироваться как надёжная альтернатива. Особый интерес к сотрудничеству с Россией могут проявить страны БРИКС, ШОС и АТЭС, заинтересованные в диверсификации источников климатической информации.

Экономические перспективы сектора подкрепляются устойчивым ростом глобального рынка спутниковых услуг наблюдения за Землёй. Развитие российских систем климатического мониторинга открывает доступ к таким перспективным сегментам, как верификация углеродных единиц, ESG-отчётность (*англ.* Environmental, Social and corporate Governance) корпораций и адаптационное планирование для уязвимых регионов.

Особого внимания заслуживает вопрос технологического суверенитета. Создание национальных систем мониторинга парниковых газов не только обеспечивает независимость от зарубежных данных, но и минимизирует риски, связанные с политизацией климатической повестки в международных отношениях. Реализация проектов, подобных «Единой национальной системе мониторинга климатически активных веществ», закладывает основу для формирования полноценного технологического цикла — от сбора спутниковых данных до их верификации и использования в климатическом регулировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выход США из климатических соглашений создаёт серьёзные вызовы для глобальной системы мониторинга парниковых газов, включая риски дестабилизации международной отчётности, сокращения финансирования и технологической фрагментации. Однако эти вызовы одновременно открывают возможности для российских операторов ДЗЗ по укреплению позиций на мировом рынке.

Развитие климатического спутникового мониторинга в России является стратегически обоснованным решением, обеспечивающим технологическую независимость, соответствие национальным климатическим обязательствам и доступ к растущим международным рынкам. Успех этого направления требует активной диверсификации партнёрских отношений, технологических инноваций и тесной интеграции с региональными инициативами в рамках АТЭС и других международных объединений.

ЛИТЕРАТУРА

Беликова С. С., *Беликов А. В.* Восток и запад: глобальные вызовы на пути достижения углеродной нейтральности // Управление. 2022. Т. 10. № 2. С. 5–13.

Севостьянов П. И., *Макаев А. Р.* Политические условия декарбонизации в рамках энергетического перехода: международные риски и возможности для России // Среднерусский вестн. общественных наук. 2023. Т. 18. № 1. С. 72–86.

Севостьянов П. И., *Шунков В. Е.*, *Макаев А. Р.* Оценка выбросов парниковых газов с помощью спутниковых систем: возможности и перспективы // ЦИТИСЭ. 2023. № 4. С. 136–146.

Тимофеев Г. П., *Подколзин П. Л.*, *Гладилин Д. Е.* Глобальные тренды и проблемы достижения углеродной нейтральности // Отходы и ресурсы. 2022. Т. 9. № 4.

Meng G., *Wen Y.*, *Zhang M. et al.* The status and development proposal of carbon sources and sinks monitoring satellite system // Carb Neutrality. 2022. V.1. Article 32.

Salama D. S., *Yousif M.*, *Gedamy Y. et al.* Satellite observations for monitoring atmospheric NO_2 in correlation with the existing pollution sources under arid environment // Modeling Earth Systems and Environment. 2022. V. 8. P. 4103–4121.

SATELLITE MONITORING OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS: PROSPECTS AND RISKS

A. A. Zhikhareva

Research Center "Space Economy and Policy", Moscow, Russia

In recent years, satellite monitoring of greenhouse gases has emerged as one of the most promising segments of the Earth remote sensing market, providing global coverage, high precision, and operational observation capabilities. However, contemporary international climate policy is undergoing a period of significant transformation, which may fundamentally alter the trajectory of global decarbonization efforts. Following a period of active declarations of commitment towards achieving carbon neutrality in 2019–2021, when over 100 countries undertook corresponding obligations, the international community now faces new challenges. A pivotal event has been the withdrawal of the United States from the Paris Agreement on Climate Change, setting a precedent for the re-evaluation of national climate strategies. Within this context, the analysis of the developmental prospects of the satellite greenhouse gas monitoring market assumes particular salience.

Keywords: Earth observation, remote sensing, greenhouse gases, satellite monitoring, climate policy, carbon neutrality, national monitoring systems, international cooperation, technological sovereignty

Zhikhareva Anastasiia Arkadevna — student intern, anastasiia.zhikharev@gmail.com

УДК:341.1/8 DOI: 10.21046/KMU-2025-141-145

РЕГИСТРАЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС КАК ОСНОВА ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Д. Д. Зарюгин

Исследовательский центр «Космическая экономика и политика»
Москва, Россия

Человеческое стремление к звёздам на протяжении всего пути существования сталкивалось с множеством преград. Эти преграды носили различный характер. В данной работе рассматривается проблема космического мусора и путь её предотвращения посредством регистрации космических объектов. Важность рассматриваемой тематики обусловлена разрушительными свойствами космического мусора. Данные свойства выражаются в том, что уровень технического оснащения космических объектов не приспособлен к противодействию столкновениям с объектами, квалифицируемыми как космический мусор. Именно поэтому так важен поиск научно-технических и международно-правовых решений, идущих в неразрывной взаимосвязи, по предотвращению образования космического мусора. Когда речь идёт о регистрационном процессе космических объектов в контексте проблемы космического мусора, подразумевается регистрация не только космических аппаратов, но и объектов космического мусора. Предлагаемый к регистрации космических объектов двусторонний подход, позволяет применить наиболее оптимальные методы предупреждения образования и утилизации космического мусора. Среди предлагаемых мер — введение обязательного координационного механизма на регистрационном уровне для снижения риска столкновений и внедрение технологий утилизации спутников после завершения эксплуатации. Также выдвигается инициатива создания единого международного каталога объектов мусора для эффективного мониторинга и управления ситуацией в космосе, что потребует преодоления барьеров, связанных с двойным назначением используемых технологий.

Ключевые слова: международное публичное право, международное космическое право, регистрационный режим космических объектов, космический мусор

ВВЕДЕНИЕ

Прошло уже 67 лет с момента запуска первого космического объекта с поверхности Земли. За эти годы деятельность человека в космосе значительно расширилась. Увеличилось количество выдвигаемых целей. Космические объекты стали служить не только для научных целей, но и выступают составной частью множества обыденных процессов современного человека. Путь человечества в космосе всегда сопровождался образованием новых вызовов. Одним из таких вызовов стала проблема космического мусора, которая начала масштабирование с момента образования мега-группировок спутников. В отдельных научных трудах выделяют разные периоды возникновения мега-группировок спутников (Pozza, Dennerley, 2022). Однако в рамках документов Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях КОПУОС (*англ*. Committee on the Peaceful Uses of Outer Space — COPUOS) отправной точкой выделяют 2015 г. Данная дата нашла отражение в п. 5 повестки дня шестьдесят первой сессии (Повестка дня 61-й сессии комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях, проведённой в Вене 28.03.2024. /AC.105/C.2/L.322. П.5). В чём же взаимосвязь между процессами формирования мега-группировок спутников и образованием космического мусора? Данная связь выражается в том, что количество космических объектов на орбите увеличивается, тем самым образуя потенциальные риски кратного увеличения объёмов космического мусора

Зарюгин Данила Денисович — студент магистратуры, dzaruy@mail.ru

(Международное..., 2022). На текущий момент времени растёт количество спутников не только ретрансляционного назначения, но и спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). По данным Европейского космического агентства ESA (*англ.* European Space Agency), на низкой околоземной орбите LEO (*англ.* Low Earth Orbit) — от 160 до 2000 км над поверхностью Земли — сейчас находится более 6600 т космического мусора (Ghoshal, 2025). С увеличением количества объектов на орбите растёт вероятность столкновения с объектами, квалифицируемыми как космический мусор. Тем самым это порождает образование нового космического мусора. Технологический уровень действующих космических объектов не приспособлен для противодействия столкновениям даже с малыми частицами космического мусора. Учитывая всё вышесказанное, можно сделать вывод об актуальности рассматриваемой проблемы. Основной целью данного исследования стал поиск решений на уровне международного публичного права. Сформулированный подход рассматривает регистрационный режим как предполагаемую основу, в рамках которой можно выстроить систему предупреждения образования космического мусора. Для реализации поставленной цели были проанализированы международно-правовые нормы, регулирующие действующий регистрационный порядок и его целевую направленность, а также были выработаны подходы, модернизирующие регистрационный прядок.

ДЕЙСТВУЮЩИЙ РЕГИСТРАЦИОННЫЙ РЕЖИМ

Действующий регистрационный режим в большей степени носит информационные функции. Основой данного режима служит Конвенция о регистрации объектов, запускаемых в космическое пространство 1975 г. (https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/objects_registration.shtml). Данный документ включает в себя обязательства по регистрации объектов, запускаемых в космическое пространство, передачей советующих данных генеральному секретарю ООН. Перечень данных, необходимых для регистрации, включён в ст. IV: «Каждое государство регистрации представляет Генеральному секретарю Организации Объединённых Наций в ближайший практически осуществимый срок следующую информацию о каждом космическом объекте, занесённом в его регистр:

a) название запускающего государства или запускающих государств;
b) соответствующее обозначение космического объекта или его регистрационный номер;
c) дату и территорию или место запуска;
d) основные параметры орбиты, включая:
   I. Период обращения.
   II. Наклонение.
   III. Апогей.
   IV. Перигей.
e) общее назначение космического объекта» (https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/objects_registration.shtml).

Данные, рассматриваемые в этой статье документа, в перспективе могли бы служить предупреждению образованию космического мусора в контексте противодействия столкновению космических объектов. На данный момент времени отсутствует механизм обеспечения передачи соответствующей информации на универсальном уровне. Текущий регистрационный режим не служит для рассматриваемой цели. Также, анализируя данный перечень, можно сделать вывод о том, что в нём отсутствуют данные, напрямую способствующие предупреждению и ликвидации космического мусора.

Однако перечисленные данные могут служить для установления юрисдикции запускающего государства на космический объект. В рамках международного космического права ответственность за запускаемые космические объекты несёт «запускающее государство» (https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/damage.shtml). Под данным термином понимается: «государство, которое осуществляет или организует запуск космического объекта, государство, с территории или установок которого осуществляется запуск космического объекта» (https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/damage.shtml). Вопрос установления ответственности крайне важен в рамках предупреждения образования космического мусора. Реализация разных форм ответственности может выступать как механизм, обязывающий запускающее государство ликвидировать ущерб, нанесённый по космическим объектам. Космический мусор в должной степени является продуктом столкновения космических объектов, а также ряда чрезвычайных ситуаций, сопутствующих данному роду деятельности. Ввиду данной специфики необходимо установление государства, ответственного за ликвидацию последствий, в частности образовавшегося объёма космического мусора. На данный момент времени в рамках международного космического права отсутствуют обязательства универсального характера по ликвидации объектов космического мусора. Учитывая данный факт, механизм не может быть реализован без выработки сопутствующих норм.

МОДЕРНИЗАЦИЯ РЕГИСТРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

Регистрация и предоставление ряда технических характеристик запускаемого объекта при создании соответствующей системы космической навигации может помочь снизить возможность возникновения ряда ситуаций, влекущих за собой частичное или полное уничтожение космического объекта, соответственно, предупреждая образование космического мусора. Данные, предоставляемые во время процесса регистрации, могут существенно снижать вероятность столкновения двух объектов в рамках международной координации космического движения. Обеспечив снижение вероятности столкновения двух объектов, значительно уменьшается вероятность образования космического мусора из этих объектов. Для обеспечения данного механизма необходимо формирование международной площадки, действующей на универсальном уровне. Например, это могло бы быть реализовано на базе КОПУОС. Для этого необходимо наделение данной площадки соответствующими полномочиями и ресурсами. Это можно было бы реализовать посредством универсального международного договора, который включил бы в себя не только описанные ранее полномочия, но и саму процедуру сбора информации и дальнейшего уведомления государств. Для контроля осуществляемой деятельности необходимо также закрепление механизма мониторинга, выражающегося в форме ежегодного доклада. Таким образом можно было бы снизить количество чрезвычайных ситуаций, а также обеспечить стабильность космического движения в условиях увеличения количественного показателя объектов, находящихся на орбите Земли и других небесных тел.

Внедрение новых переменных в перечень данных, необходимых для регистрации космического объекта, является основным направлением предполагаемой модернизации. Под внедрением новых переменных подразумевается закрепление информации о научно-техническом эквиваленте, необходимом для предупреждения образования и ликвидации объектов, квалифицируемых как космический мусор (Вениаминов, 2013). Для ранее рассматриваемых целей необходима регистрация вторичного космического объекта, основной целевой направленностью которого является ликвидация объектов космического мусора, если система

последующей ликвидации космического мусора является составной частью космического аппарата. Она регулируется в том же установленном порядке. Для целей нового регистрационного режима необходима выработка соответствующего понятийного аппарата в контексте образующего его универсального международного договора. В соответствии со спецификой рассматриваемой проблемы, необходимо введение терминов: «космический мусор», «составная часть космического объекта», «система ликвидации и система предупреждения образования космического мусора» (Hobe, 2019). Данные изменения позволят обеспечить постоянство применения технологий, снижающих количественные и качественные показатели космического мусора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог хочется отметить, что будущее человечества в рамках космического пространства зависит от преодоления данной проблемы. Преодоление проблемы космического мусора является неотъемлемой частью для построения устойчивого использования космического пространства вне зависимости от формы деятельности. Актуальность данной проблемы подчёркивает высокий уровень освещаемости на международном уровне. Так, например, проблема космического мусора стала неотъемлемой частью повестки дня сессий КОПУОС и его подкомитетов. Также данная проблема имеет высокую степень научной разработанности. Изучая текущее международно-правовое регулирование, можно прийти к выводу о фрагментарном характере регулирования. На универсальном уровне регулирования существуют нормы, лишь косвенно регулирующие данный вопрос (Mirmina, Schenewerk, 2022). Прямое регулирование вопросов космического мусора существует исключительно на уровне актов «мягкого права». Таким образом, можно сделать вывод о необходимости разработки новых норм или модернизации уже существующих норм универсального характера с учётом проблемы космического мусора. Данная работа рассматривает модернизацию регистрационного процесса как предполагаемую форму для противодействия множеству проблем, связанных с освоением космического пространства. В контексте предполагаемого регулирования проблема космического мусора выступает как первичный шаг для становления подобного подхода к регулированию.

ЛИТЕРАТУРА

Вениаминов С. С. Космический мусор — угроза человечеству / под ред. Р. Р. Назирова, О. Ю. Аксенова. 2-е изд., испр. и доп. М.: ИКИ РАН, 2013. 208 с.

Международное космическое право: учеб. для бакалавриата и магистратуры / под ред. Г. П. Жукова, А. Х. Абашидзе. 2-е изд., стер. М.: Юрайт, 2022. 527 с.

Hobe S. Space law. Baden-Baden: Nomos, 2019. 266 p.

Ghoshal A. Over 6600 tons of space junk are floating around in Earth's orbit // New Atlas. 2025. https://newatlas.com/space/6-600-tons-space-junk-earth-orbit/.

Mirmina S., *Schenewerk C.* International space law and space laws of the United States. Northampton: Elgar. 2022. 321 p.

Pozza M. A., *Dennerley J. A.* Risk Management in Outer Space Activities: An Australian and New Zealand Perspective. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. 239 p.

THE REGISTRATION PROCESS AS A BASIS FOR PREVENTING AND ELIMINATING SPACE DEBRIS

D. D. Zaryugin

Research Center "Space Economy and Policy", Moscow, Russia

The human aspiration to the stars throughout the path of existence has encountered many obstacles. These barriers were of different nature. This paper examines the problem of space debris and the way to prevent it through the registration of space objects. The importance of this topic is due to the destructive properties of space debris. These properties are expressed in the fact that the level of technical equipment of space objects is not adapted to resist collisions with objects classified as space debris. That is why it is so important to find scientific, technical and international legal solutions for the prevention of the creation of space debris. When we talk about the registration process of space objects in the context of space debris, it is understood that not only spacecraft but also space debris are registered. The proposed two-sided approach to registration of space objects allows the application of the best methods for preventing and disposing of space debris. Among the proposed measures are the introduction of a mandatory coordination mechanism at the registration level to reduce the risk of collisions and the implementation of technologies for the disposal of satellites after completion of operations. There is also an initiative to establish a single international catalogue of debris for effective monitoring and management of the space situation, which will require overcoming the barriers associated with the dual purpose of the technologies used.

Keywords: international public law, international space law, registration regime of space objects, space debris.

Zaryugyn Danil Denisovich — master's degree student, dzaruy@mail.ru

УДК 524.7, 524.882 DOI: 10.21046/KMU-2025-146-155

СЛОЖНАЯ МОРФОЛОГИЯ ИСТОЧНИКА TXS 0506+056 — ГРАВИТАЦИОННО ЛИНЗИРОВАННЫЙ ДЖЕТ?

С. С. Исламов [1], *Н. С. Лыскова* [2]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия
[2] Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Источник TXS 0506+056 является блазаром, т. е. активным галактическим ядром, джет которого направлен почти точно на нас. На частотах 8 и 15 ГГц в период с 2016 по 2023 г. объект демонстрирует сложную морфологию, не типичную для блазаров — наблюдается чётко выраженная дугообразная структура. Одним из возможных объяснений появления такой структуры является гравитационное линзирование. Предполагая, что в качестве линзы выступает неактивная чёрная дыра, было проведено численное моделирование гравитационного линзирования протяжённого джета, который направлен на наблюдателя. При этом было учтено, что по мере распространения джет оказывается ближе к линзе и может даже пересекать плоскость линзы. Были получены ограничения на параметры гравитационно-линзированной системы (масса линзы, расстояние до неё, положение относительно источника и угол, под которым направлен джет относительно оси наблюдения), при которых достигается наилучшее согласие с наблюдательными данными.

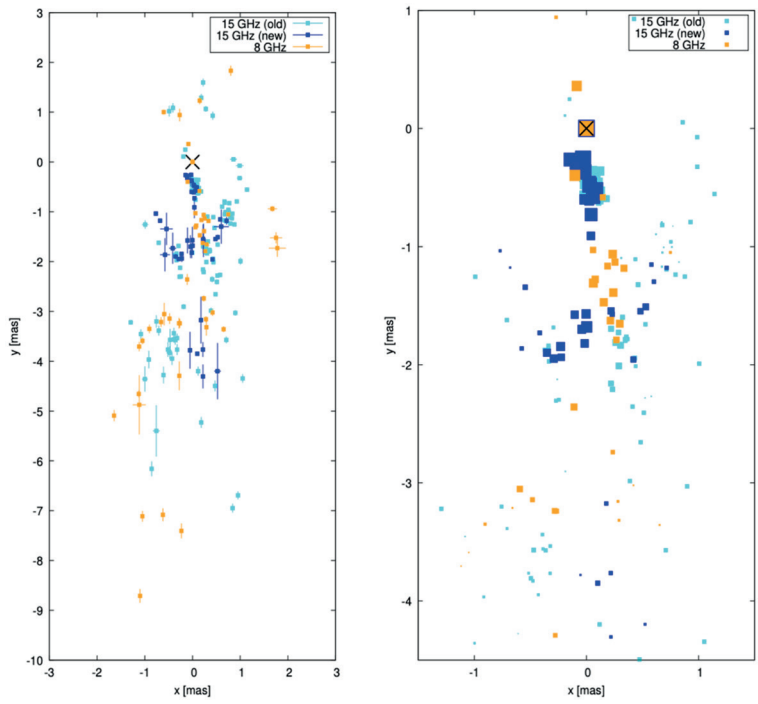
Ключевые слова: блазары, радиоквазары, джеты, активные ядра галактик, чёрные дыры, сильное гравитационное линзирование, численное моделирование, VLBA, TXS 0506+056

ВВЕДЕНИЕ

Блазары представляют огромный интерес на протяжении уже многих лет. Они являются мощными источниками электромагнитного излучения (Санько, 2001). Несмотря на то, что точная структура блазаров полностью неизвестна, они являются довольно важными объектами — вследствие высокой светимости они наблюдаются на больших красных смещениях, что позволяет изучать эволюцию галактик и Вселенной (Штерн, 2021). Сложность изучения таких объектов кроется в их размерах: они являются настолько малыми, что разрешающей способности телескопов не хватает, чтобы различить отдельные зоны и детали (Засов, Постнов, 2011). Гравитационное линзирование (ГЛ) блазаров позволит более детально изучить их структуру, происхождение и другие важные свойства и процессы, происходящие в активных ядрах галактик (Barnacka, 2018).

В 2018 г. обсерватория IceCube обнаружила мощный всплеск в области нейтрино экстремально высоких энергий (IceCube Collaboration et al., 2018), который был проассоциирован с блазаром TXS 0506+056; TXS 0506+056 стал первым активным галактическим ядром (АЯГ), ассоциированным с излучением нейтрино экстремально высоких энергий. Джет рассматриваемого источника направлен под малым, но неизвестным, углом к оси наблюдения. Согласно наблюдениям на частотах 8 и 15 ГГц радиоинтерферометра VLBA (*англ.* Very Long Baseline Array) в период 2016–2023 гг. компоненты джета (Britzen et al., 2019, 2025) образуют дугу, удалённую от ядра источника на расстояние ~1 угл. мс (рис. 1). Также в работе (Britzen et al., 2025) обсуждается возможность гравитационного линзирования источника TXS 0506+056 на чёрной дыре (ЧД), однако детальное моделирование не проводилось.

Исламов Сардор Санжарович — студент бакалавриата, islamov.ss@phystech.edu
Лыскова Наталья Сергеевна — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, lyskova@cosmos.ru



а *б*

Рис. 1. Все радиокомпоненты, отображённые в плоскости xy. Голубым цветом показаны компоненты на частоте 15 ГГц, полученные при анализе данных до 2016 г., синим — новые данные, полученные в 2016–2023 гг. Оранжевым цветом также показаны новые данные, но на частоте 8 ГГц: *а* — все данные с крестами ошибок; *б* — увеличенный участок изображения а. Размер квадратов описывает величину плотности потока (в логарифмическом масштабе), минимальное отображённое значение — 1 Ян (Гц). Поток от самого источника на изображениях не показан, его местоположение обозначено чёрным крестом. Изображение взято из работы (Britzen et al., 2025)

Источник TXS 0506+056 находится на красном смещении $z = 0{,}3365$ (Paiano et al., 2018). В работе рассматривается плоская Вселенная с параметрами: постоянная Хаббла $H_0 = 67{,}8$ км·с$^{-1}$·Мпк$^{-1}$; плотность материи $\Omega_m = 0{,}308$; плотность тёмной энергии $\Omega_\Lambda = 0{,}692$ (Planck Collaboration et al., 2016).

ОГРАНИЧЕНИЕ НА ПАРАМЕТРЫ ГРАВИТАЦИОННО-ЛИНЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Оптические изображения (например, DESI Legacy Imaging Surveys DR10) и спектроскопические наблюдения источника TXS 0506+056 (Paiano et al., 2018) свидетельствуют об отсутствии массивных звёздных систем на луче зрения. Поэтому в качестве гравитационной линзы может выступать неактивная чёрная дыра.

При гравитационном линзировании на ЧД радиус кольца Эйнштейна–Хвольсона задаётся выражением:

$$\theta_E^2 = \frac{4GM}{c^2} \cdot \frac{D_{ls}}{D_s D_l},$$

где M — масса линзы; c — скорость света; D_s, D_l, D_{ls} — угловое расстояние по диаметру (*англ.* angular diameter distance) линзы, источника и между линзой и источником соответственно (рис. 2). Если источник находится на оси, проходящей через линзу и наблюдателя, изображение источника представляет собой кольцо Эйнштейна – Хвольсона. Предполагая, что наблюдаемая в источнике TXS 0506+056 дуга является частью этого кольца (т. е. $\theta_E \simeq 1\,\text{mas}$) и что линза удалена от источника на сравнительно небольшое расстояние (т. е. $D_{ls} \ll D_l, D_s$), мы можем получить соотношение между массой линзы и расстоянием от источника до линзы (Britzen et al., 2025):

$$M[M_\odot] \sim 10^{11} \big/ D_{ls}, \text{кпк}. \tag{1}$$

В данном выражении учтено, что красное смещение источника $z = 0{,}3365 \pm 0{,}0010$ соответствует угловому расстоянию по диаметру $D_s \simeq 1023 \pm 2$ Мпк.

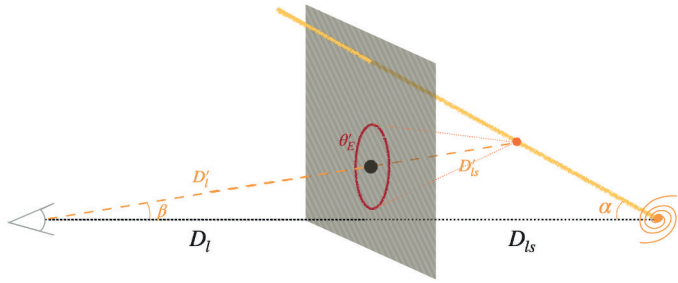


Рис. 2. Схема ГЛ джета. Источник помечен спиралью справа, джет начинается в этой точке и направлен в сторону линзы. Точка, помеченная оранжевым цветом, лежит на оси наблюдатель – линза и вытягивается в кольцо Эйнштейна – Хвольсона

Учитывая, что самая массивная из обнаруженных на данный момент ЧД имеет массу $M \sim 10^{11} M_\odot$ (Brockamp et al., 2016), можно, исходя из выражения (1), ограничить снизу расстояние между ядром TXS 0506+056 и ЧД-линзой значениями порядка 1–10 кпк. Полученная оценка расстояния не противоречит имеющимся наблюдательным данным. Согласно каталогу (De Rosa et al., 2022), расстояние в двойных системах ЧД варьируется от <1 до 100 кпк. Более того, известны системы, в которых одна ЧД активная, а другая — нет (Comerford et al., 2014; Stemo et al., 2021).

Приведём ещё одно ограничение на параметры исследуемой системы, вытекающее из работы (Britzen et al., 2019). В этой статье выделены компоненты струи, видимая скорость которых составляет 1,044 mas/year, что соответствует скорости 22,59c (Britzen et al., 2025). Данный эффект кажущегося сверхсветового движения объясняется из простейших геометрических соображений (Засов, Постнов, 2011) и достигается при движении объекта с околосветовой скоростью под малым углом к наблюдателю. Наблюдаемая скорость при этом определяется выражением

$$v^{app} = \frac{v \sin\alpha}{1 - (v/c)\cos\alpha},$$

где α — угол направления источника к оси наблюдения; v — его реальная скорость. Очевидно, что v не может превышать значение скорости света, тогда угол ограничивается величиной

$$\alpha < 2 \arccos \frac{v_{app}}{\sqrt{\left(v_{app}^2 / c^2\right) + 1}} \sim 5^\circ.$$

Таким образом, получены ограничения на минимальное расстояние между источником и линзой и на максимальное значение угла джета к оси наблюдения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТЯЖЁННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Решение уравнения линзы для точечного источника и точечной линзы задаётся выражением (Schneider et al., 1992):

$$\theta_{\pm} = \frac{\beta \pm \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2}}{2}, \tag{2}$$

где β — угол смещения источника от оси, проходящей через наблюдателя и линзу; θ — угол, под которым видно смещение изображений от той же оси; θ_E — угол Эйнштейна. С помощью выражения (2) положение изображений в векторном виде относительно центра линзы задаётся так:

$$\mathbf{I}_{\pm} = \mathbf{r}\theta_{\pm} / \beta, \tag{3}$$

где $\mathbf{r}$ – радиус-вектор источника; $\mathbf{I}_{\pm}$ – положение самих изображений.

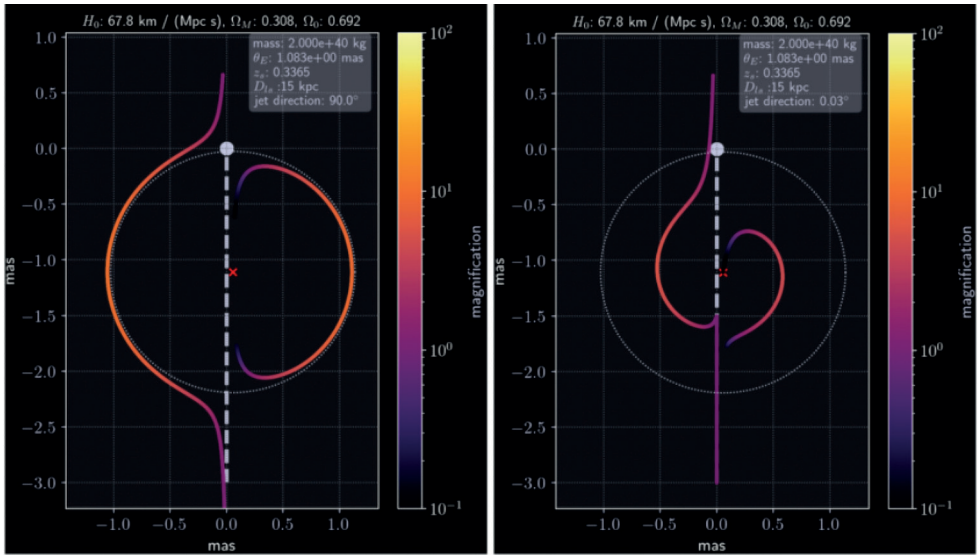
Для обобщения решения уравнения линзы на случай протяжённого источника предлагается разбить его на множество точечных, невзаимодействующих между собой источников. При дискретизации источника изображения двух соседних точек могут оказаться далеко друг от друга, во избежание подобных разрывов в разработанной модели используется нерегулярная сетка.

Источником в рассматриваемом случае является джет, проекция которого простирается от $y = 0$ до $y = -4$ мс в относительных координатах (см. рис. 1*а*), что соответствует длине джета в проекции $l \simeq 20$ пк. Струя направлена к лучу зрения под малым углом, следовательно, когда расстояние между источником и линзой сопоставимо с длиной джета, источник нельзя считать плоским. Более того, при углах менее значения

$$\alpha_0 = \arctan \frac{20}{D_{ls}, \text{пк}}$$

этот джет будет пересекать плоскость линзы. При пересечении плоскости линзы (см. рис. 2) возникает несколько особенностей, о которых пойдёт речь далее.

На рис. 3 в качестве источника рассматривается тонкий «вертикальный» (в проекции) отрезок, отмеченный серой пунктирной линией, положение АЯГ обозначено серым кружком. На рис. 3*а* приведён случай «классического» гравитационного линзирования, когда джет расположен в одной плоскости на фиксированном расстоянии от линзы. На рис. 3*б* джет распространяется в сторону линзы, при этом, как и в случае «классического» линзирования, наблюдаются дугообразные изображения, однако радиус этих дуг оказывается меньше, что связано с уменьшением расстояния между линзой и джетом. Вторым важным отличием является наличие «излома» ($x = 0$, $y = -1{,}5$ угл. мс на рис. 3*б*), который появляется вследствие пересечения джетом плоскости линзы. В момент пересечения гравитационное линзирование пропадает, и мы видим нелинзированный джет ($y < -1{,}5$), распространяющийся прямолинейно. Для аналитического обоснования достаточно рассмотреть выражение (3) в предельном случае $\theta_E \to 0$ при малых β.



а *б*

Рис. 3. Гравитационное линзирование тонкого протяжённого джета в случае, когда джет лежит в плоскости, параллельной плоскости линзы (*а*), и в случае, когда джет распространяется в сторону плоскости линзы и пересекает её (*б*). Цвет изображений характеризует значение усиления в данной точке, красным крестом отмечено положение линзы. Параметры системы подобраны так, чтобы описать наблюдения источника TXS 0506+056, т. е. красное смещение источника зафиксировано на значении $z = 0{,}3365$, линза удалена на расстояние 15 кпк от источника, масса ЧД предполагается равной 10^{10} масс Солнца

РЕЗУЛЬТАТЫ

Построенная модель использовалась для воспроизведения морфологии источника (см. рис. 1). Всего было исследовано четыре взаимных расположения линзы и источника:

1) линза удалена от источника на малое расстояние (D_{ls} сравнимо с длиной джета);
2) линза находится в пределах нашей Галактики;
3) линза внегалактическая и $D_l < D_s$;
4) линза находится позади источника ($D_l > D_s$), при этом линзируется контрджет.

Стоит отметить, что второй и третий случаи визуально не отличаются, поэтому качественно их исследование можно объединить. Поиск наилучшего набора параметров проводился в каждом случае отдельно минимизацией отклонения модели от данных. Предполагается, что джет имеет однородную яркость и представляет собой отрезок прямой.

Исследование среднеквадратичного отклонения проводилось отдельно по небольшим диапазонам угла поворота джета. Это позволяет избежать ошибочного определения минимума при использовании методов поиска экстремума целевой функции.

1. В случае, когда расстояние D_{ls} сравнимо с длиной джета, был получен следующий набор параметров: радиус Эйнштейна – Хвольсона для ядра

$\theta_E^{core} = 2{,}14$ mas; точка пересечения джетом плоскости линзы $\theta_0 = 0{,}72$ mas; положение линзы $x = 0{,}022$ mas, $y = -0{,}579$ mas; горизонтальная проекция джета $x_1 = 0{,}75$ mas. Сам коэффициент отклонения σ при этом равен 5,67. Следует отметить, что данному решению соответствует множество параметров гравитационно-линзированной системы (M, D_{ls}, α) в силу наличия вырождения между этими параметрами. Учесть вырождение при переходе от величин θ_E^{core}, θ_0 к значениям M, D_{ls}, α можно из геометрических соображений:

$$\left(\theta_E^{core}\right)^2 = \frac{4GM}{c^2}\cdot\frac{D_{ls}}{D_s D_l}, \quad \theta_0 D_l = \alpha D_{ls},$$

где α — есть угол направления джета к оси наблюдения. Тогда, возвращаясь к исходному набору параметров, получаем, что наилучшее согласие модели с наблюдательными данными достигается при следующих соотношениях между массой линзы, расстоянием от линзы до ядра источника TXS 0506+056 и угла, под которым направлен джет относительно оси наблюдения:

$$M[M_\odot] = \frac{4{,}90\cdot 10^{11}}{D_{ls}, \text{кпк}}, \quad \alpha, \text{град} = \frac{0{,}21}{D_{ls}, \text{кпк}},$$

При этом угол поворота джета β (угол между проекцией джета и осью y на рис. 4) равен 10,6°.

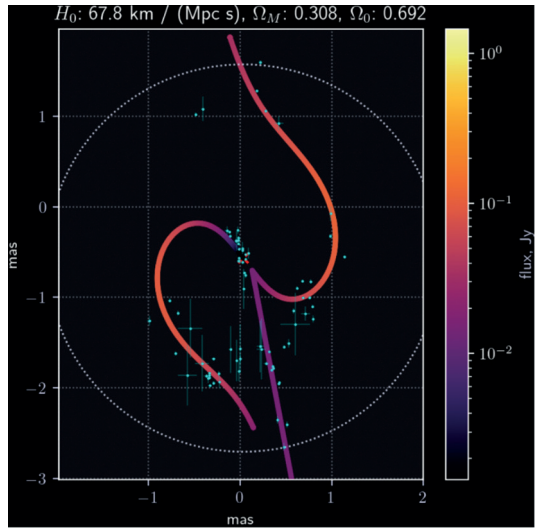


Рис. 4. Изображение модели, соответствующей лучшему набору параметров для двойной системы ЧД. Голубыми точками показано положение радиокомпонент за 2016–2023 гг. на 15 частоте ГГц из работы (Britzen et al., 2025)

Изображение модели, соответствующей данному набору параметров, представлено на рис. 4. Временная задержка между наблюдаемыми изображениями ядра может быть оценена как $\Delta\tau, \text{ч} = 1{,}9\cdot 10^2\, D_{ls}^{-1}, \text{кпк}$. Источник TXS 0506+056 демонстрирует высокую переменность во всём диапазоне длин волн, поэтому переменность должна наблюдаться и в изображениях, но с некоторой задержкой между ними. Так, измерение временной задержки может быть использовано, во-первых, как дополнительное доказательство наличия гравитационного линзирования

в данной системе, и, во-вторых, как дополнительное условие, которое позволит снять вырождение гравитационно-линзированной системы.

Как упоминалось ранее, дугообразная структура появилась в 2016 г. Это означает, что система динамична, при этом дуга сохраняется уже на протяжении 10 лет. Для того чтобы оценить скорость ЧД, при которой достигаются подобные эффекты, был проведён ряд экспериментов. Мы промоделировали движение ЧД в плоскости, перпендикулярной лучу зрения, для поиска необходимого значения скорости. Результаты показывают, что для наблюдения подобной картины поперечная компонента скорости линзы должна составлять ~15 % от скорости света. Отметим, что в симуляциях слияния двойной системы достигалась максимальная скорость порядка 10 % от скорости света (Healy et al., 2023), по этой причине данный вариант предполагается крайне маловероятным.

2–3. В случае когда линза удалена от АЯГ на космологическое расстояние, источник можно считать плоским (другими словами, длина джета намного меньше любого расстояния в гравитационно-линзированной системе, и можно считать, что расстояние между разными участками джета и линзой не меняется). Если линза находится в пределах нашей галактики (расстояние до ЧД менее 20 кпк), необходимая масса снижается до звёздной (порядка $0{,}1-10\,M_\odot$). При этом минимальное достигнутое отклонение превышает прошлое значение вдвое: $\sigma = 11{,}3$. Параметры, полученные при моделировании, равны: $\theta_E = 1{,}0$ mas; $\beta = -5{,}7°$; $x = -0{,}07$ mas; $y = -0{,}89$ mas.

Изображение, соответствующее этим значениям, представлено на рис. 5. Временная задержка в этом случае составляет $\Delta\tau,\ \text{нс} = 48{,}3M[M_\odot]$.

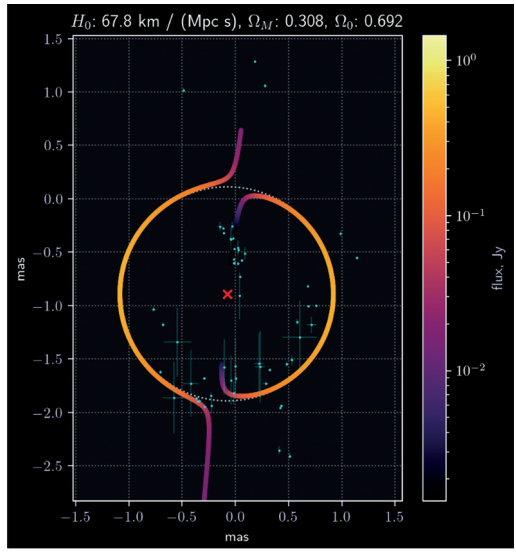


Рис. 5. Изображение модели, соответствующей лучшему набору параметров для линзы, удалённой от АЯГ. Голубыми точками показаны положения радиокомпонент за 2016–2023 гг. на частоте 15 ГГц из работы (Britzen et al., 2025)

Также отметим, что при удалении ЧД-линзы от наблюдателя на 20 кпк и массе линзы $2{,}7\,M_\odot$, поперечная компонента скорости ЧД, удовлетворяющая условиям, рассмотренным в предыдущем случае, составляет 0,1–1 км/с.

4. Случай линзирования контрджета показывает неплохое согласие с наблюдаемой морфологией ($\sigma = 6{,}3$), при этом допущено, что начало джета смещено от-

носительно начала координат. Данный сценарий предсказывает огромные усиления (рис. 6), что входит в противоречие с наблюдательными данными (см. рис. 1*б*). Вследствие этого данный сценарий также представляется маловероятным.

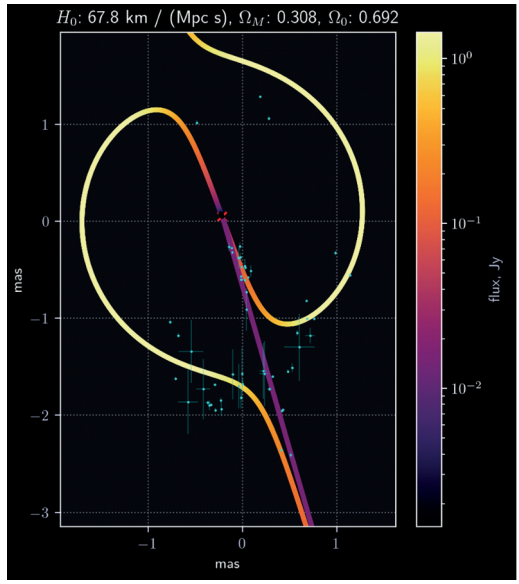


Рис. 6. Изображение модели, соответствующей лучшему набору параметров для линзирования контрджета. Голубыми точками показано положение радиокомпонент за 2016–2023 гг. на частоте 15 ГГц из работы (Britzen et al., 2025)

Параметры, найденные в этом случае составляют: $M[M_\odot] = \frac{1{,}1 \cdot 10^{10}}{D_{ls}, \text{кпк}}$, $\alpha, \text{град} = \frac{0{,}1}{D_{ls}, \text{кпк}}$, $x = -0{,}22$ mas; $y = 0{,}048$ mas; $\beta = 16{,}4°$; $\Delta x = -0{,}2$ mas.

ВЫВОДЫ

В данной работе проведено моделирование гравитационного линзирования блазара TXS 0506+056 в предположении, что линзой выступает неактивная чёрная дыра. Были рассмотрены различные случаи взаимного расположения источника и линзы: случай, когда расстояние D_{ls} сравнимо с длиной джета; случай $D_{ls} \sim D_l$; случай $D_l > D_s$, при котором линзируется контрджет. Показано, что в каждом сценарии можно качественно воспроизвести морфологию источника TXS 0506+056. Однако полученные значения усиления изображений не согласуются с наблюдениями, что может свидетельствовать о том, что предположение об однородной яркости джета неприменимо к источнику TXS 0506+056. Получена оценка на временную задержку между изображениями АЯГ для всех рассмотренных случаев взаимного расположения линзы и источника. Измерение временной задержки может быть использовано, во-первых, как дополнительное доказательство наличия гравитационного линзирования в данной системе и, во-вторых, как дополнительное условие, которое позволит уточнить параметры гравитационно-линзированной системы. Показано, что в случае, когда линза удалена на малое расстояние (сравнимое с длиной джета), может наблюдаться излом, который является

отличительной особенностью данной конфигурации. Также в случае $D_{ls} \ll D_l$ параметры гравитационно-линзированной системы (M, D_{ls}, α), наилучшим образом описывающие наблюдения, оказываются вырожденными: масса ЧД-линзы $M[M_\odot] = \frac{4{,}90 \cdot 10^{11}}{D_{ls}, \text{кпк}}$, угол между джетом и лучом зрения $\alpha, \text{град} = \frac{0{,}21}{D_{ls}, \text{кпк}}$; $\beta = 10{,}6°$; $x = 0{,}022$ mas; $y = -0{,}579$ mas; $\Delta\tau, \text{ч} = 1{,}9 \cdot 10^2 \, D_{ls}^{-1}, \text{кпк}$. Когда D_{ls} больше длины джета: $\theta_E = 1{,}0$ mas; $\beta = -5{,}7°$; $x = -0{,}07$ mas; $y = -0{,}89$ mas. Если при этом $D_{ls} \gg D_l$ масса линзы и расстояние от наблюдателя до линзы связаны соотношением $M[M_\odot] = 0{,}12 D_l, \text{кпк}$. В случае $D_l > D_s$: $M[M_\odot] = \frac{1{,}1 \cdot 10^{10}}{D_{ls}, \text{кпк}}$, $\alpha, \text{град} = \frac{0{,}1}{D_{ls}, \text{кпк}}$, $x = -0{,}22$ mas; $y = 0{,}048$ mas; $\beta = 16{,}4°$; $\Delta x = -0{,}2$ mas.

ЛИТЕРАТУРА

Засов А. В., *Постнов К. А.* Общая астрофизика. 2-е изд. испр. и доп. Фрязино: Век 2. 2011. 576 с.

Санько Н. Ф. Вселенная и человек: словарь. М.: ИКИ РАН. 2001. 218 с.

Штерн Б. Откуда взялись мощные ранние квазары? // Троицкий вариант — наука. 2021. № 4(323). С. 2–3.

Barnacka A. Gravitational lenses as high-resolution telescopes // Physics Reports. 2018. V. 778. P. 1–46. DOI: 10.1016/j.physrep.2018.10.001.

Britzen S., *Fendt C.*, *Böttcher M. et al.* A cosmic collider: Was the IceCube neutrino generated in a precessing jet-jet interaction in TXS 0506+056? // Astronomy and Astrophysics. 2019. V. 630. Article A103. DOI: 10.1051/0004-6361/201935422.

Britzen S., *Böttcher M.*, *Kunet E. et al.* The nuclear jet and core of TXS 0506+056 could be gravitationally lensed // Astronomy and Astrophysics. 2025. V. 695. Article A103. DOI: 10.1051/0004-6361/202452530.

Brockamp M., *Baumgardt H.*, *Britzen S.*, *Zensus A.* Unveiling Gargantua: A new search strategy for the most massive central cluster black holes // Astronomy and Astrophysics. 2016. V. 585. Article A153. DOI: 10.1051/0004-6361/201526873.

Comerford J. M., *Greene J. E.* Offset Active Galactic Nuclei as Tracers of Galaxy Mergers and Supermassive Black Hole Growth // The Astrophysical J. 2014. V. 789. Iss. 2. Article 112. DOI: 10.1088/0004-637X/789/2/112.

De Rosa A., *Vignali C.*, *Bogdanović T. et al.* The quest for dual and binary supermassive black holes: A multi-messenger view // New Astronomy Reviews. 2019. V. 86. Article 101525. DOI: 10.1016/j.newar.2020.101525.

De Rosa A., *Vignali C.*, *Severgnini P.* The X-ray view of optically selected dual AGN // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. 2022. V. 519. Iss. 4. P. 5149–5160. DOI: 10.1093/mnras/stac3664.

IceCube Collaboration et al. Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert // Science. 2018. V. 361. Iss. 6398. P. 147–151. DOI: 10.1126/science.aat2890.

Healy J., *Lousto C. L.* Ultimate Black Hole Recoil: What is the Maximum High-Energy Collision Kick? // Physical Review Letters. 2023. V. 131. Article 071401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.071401.

Paiano S., *Falomo R.*, *Treves A.*, *Scarpa R.* The Redshift of the BL Lac Object TXS 0506+056 // The Astrophysical J. Letters. 2018. V. 854. Iss. 2. Article L32. DOI: 10.3847/2041-8213/aaad5e.

Planck Collaboration et al. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters // Astronomy and Astrophysics. 2016. V. 594. Article A13. 63 p. DOI: 10.1051/0004-6361/201525830.

Schneider P., *Ehlers J.*, *Falco E. E.* Gravitational Lenses. 1st ed. // Astronomy and Astrophysics Library. 1992. 560 p. DOI: 10.1007/978-3-662-03758-4.

Stemo A., *Comerford J. M.*, *Barrows R. S. et al.* A Catalog of 204 Offset and Dual Active Galactic Nuclei (AGNs): Increased AGN Activation in Major Mergers and Separations under 4 kpc // The Astrophysical J. 2021. V. 923. Iss. 1. Article 36. 17 p. DOI: 10.3847/1538-4357/ac0bbf.

COULD THE BLAZAR TXS 0506+056 BE GRAVITATIONALLY LENSED?

S. S. Islamov [1], ***N. S. Lyskova*** [2]

[1] **Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia**
[2] **Space Research Institute RAS, Moscow, Russia**

The object TXS 0506+056 is a radio quasar, the jet of which is directed with small angle to the line of sigh. The data recorded by VLBA (Very Long Baseline Array) between 2016 and 2022 is atypical for such sources. The object exhibits a very complex morphology in the radio: a clearly defined arc-shaped structure is observed in the data. One of the hypotheses of such a behavior is the strong gravitational lensing of jet on a supermassive black hole. To verify this assumption, a numerical simulation of gravitational lensing was performed for a source extended along the observation axis and intersecting the lens plane. As a result, we found a set of parameters that allows us to achieve the best agreement with the observational data. This work shows that the gravitational lensing effect can be used for qualitatively explanation of the observed morphology of the TXS 0506+056.

Keywords: blazars, radio quasars, jets, active galactic nuclei, black holes, gravitational lensing, strong, numerical modeling, VLBA, TXS 0506+056

Islamov Sardor Sanjarovich — undergraduate student, islamov.ss@phystech.edu
Lyskova Natalya Sergeevna — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences, lyskova@cosmos.ru

УДК 523.985 DOI: 10.21046/KMU-2025-156-159

СРАВНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ PIVLAB И CACTUS В КОНТЕКСТЕ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ КОРОНАЛЬНОМ ВЫБРОСЕ МАССЫ

В. Г. Каламанов

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Проведено сравнение результатов анализа динамики солнечной плазмы при корональном выбросе массы при помощи программы PIVLab с данными каталога CACTus. Также были изучены достоинства и недостатки обоих программ. На основе результатов сравнения сделан вывод о возможности использования метода трассерной визуализации в качестве альтернативы общепринятым методам анализа динамики солнечной плазмы.

Ключевые слова: корональный выброс массы, Солнце, КВМ, солнечная плазма, метод трассерной визуализации, PIV-метод, PIVLab, CACTus

Анализ динамики коронального выброса массы (КВМ) с помощью новейших компьютерных методов представляет значительный интерес. В данный момент ряд компьютерных программ, к примеру CACTus (*англ*. Particle Image Velocimetry Lab), для вычисления параметров коронального выброса массы используют различные компьютерные методы. Одним из подобных методов, который нашёл применение в различных областях науки и техники, является метод трассерной визуализации (PIV-метод, *англ.* Particle Image Velocimetry). Цель исследования — сравнить работу программы PIVLab, которая функционирует на основе метода трассерной визуализации, и CACTus в контексте анализа динамики коронального выброса массы.

PIV-метод — это один из методов анализа потока жидкости с целью определения гидродинамических параметров. Он позволяет определить гидродинамические параметры потока жидкости, фокусируясь на конкретных светящихся точках, фиксируя их положение на последовательных кадрах медиафайла (Theilicke, Sonntag, 2021). В результате формируется вектор изменения положения для последующего анализа методом цифровой обработки. После калибровки по известной величине (радиусу Солнца), программа вычисляет серию гидродинамических параметров (Theilicke, Sonntag, 2021).

CACTus — это пакет программного обеспечения и база данных, призванная каталогизировать КВМ относительно их динамических характеристик (Robbrecht, Berghmans, 2004). Программа действует в автоматическом режиме и работает на методе преобразований Хафа (Robbrecht, Berghmans, 2004). В качестве исходных данных программа берёт видеоматериалы со спутника SOHO (*англ*. Solar and Heliospheric Observatory). Результатом работы программы является нахождение динамических характеристик КВМ.

Была подобрана серия видеоматериалов (со спутника SOHO) корональных выбросов массы различной интенсивности в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне для последующего анализа в PIVLab. На основе анализа было получено скоростное поле для каждого из корональных выбросов массы. Затем было проведено сравнение с данными каталога CACTus (данные взяты с сайта каталога https://www.sidc.be/cactus/catalog.php). Также в таблицах приведены данные каталога SOHO LASCO (*англ.* Large Angle and Spectrometric Coronagraph) по соответствующим событиям (данные взяты с сайта каталога https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

Каламанов Владимир Георгиевич — аспирант, VGKalamanov@cosmos.ru

События были разделены на узкие и широкие, быстрые и медленные (Chen, 2011):

1. Быстрые КВМ со скоростью более 750 км/с.
2. Медленные КВМ со скоростью менее 300 км/с.
3. Узкие КВМ с угловой шириной менее 20°.
4. Широкие КВМ с угловой шириной более 120°.
5. «Ложнобыстрыми» названы события, скорость которых по данным CACTus выше скорости по данным SOHO-LASCO.

Результаты анализа широких КВМ отражены в табл. 1 (время UT, *англ.* Universal Time).

Таблица 1. Сравнение данных PIVLab и CACTus для широких КВМ

Скорость, км/с	**Медленный 08.05.2014, 22:12**	**Быстрый 02.09.2015, 23:36**	**Ложнобыстрый 11.04.2014, 10:48**
Диапазон скорости CACTus (Robbrecht, Berghmans, 2004)	144–363	233–1201	456–1894
Диапазон скорости PIVLab	40–300	50–900	50–500
Линейная скорость LASCO (Gopalswamy et al., 2009)	316	1106	627

Как следует из табл. 1, диапазон скорости PIVLab сопоставим с диапазоном скорости CACTus. Это ожидаемо, так как CACTus фокусируется на регионах с повышенной яркостью, как и PIVLab. При анализе ложнобыстрых событий, данные PIVLab приближены к данным SOHO LASCO.

Результаты анализа узких КВМ отражены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение данных PIVLab и CACTus для узких КВМ

Скорость, км/с	**Медленный 02.12.2015, 01:36**	**Быстрый 07.24.2015, 14:36**	**Ложнобыстрый 05.01.2014, 17:00**
Диапазон скорости CACTus (Robbrecht et al., 2004)	132–400	762–1838	440–1388
Диапазон скорости PIVLab	40–120	40–250	40–120
Линейная скорость LASCO (Gopalswamy et al., 2009)	153	824	516

Как следует из табл. 2, диапазон скорости PIVLab хотя и попадает в порядок скоростей плазмы при КВМ (Chen, 2011), не сопоставим с диапазоном скоростей CACTus. В случае с подобными событиями кучность плазмы препятствует послойному анализу.

В ходе исследования были также изучены недостатки программ PIVLab и CACTus. Анализ поведения программ в сложных экспериментальных случаях приведён в табл. 3.

В свою очередь, для PIVLab характерны ошибки при анализе узких КВМ и сложности при анализе комбинированных событий. В то же время CACTus завышает скорость узких КВМ (результаты выше линейной скорости SOHO-LASCO), а при анализе комбинированных событий также не дифференцирует их.

В ходе исследования было установлено, что программа PIVLab попадает в порядок скорости, характерный для солнечной плазмы при корональном выбросе массы. При этом PIVLab наиболее успешен при анализе широких КВМ любой средней скорости, когда в сравнении с данными CACTus программа показывает сопоставимые результаты. В случае с узкими КВМ, PIVLab испытывает трудности при анализе динамики события. В то же время использование PIVLab позволяет нивелировать недостатки, выявленные при использовании программы CACTus, в то время как CACTus не может нивелировать недостатки PIVLab.

Таблица 3. Поведение PIVLab и CACTus в сложных для анализа ситуациях

Проблемы CACTus	Решение PIVLab
Дробление широких КВМ на несколько отдельных событий (Yashiro et al., 2008)	Анализ широких КВМ как единого события
Ложное автоматическое определение угловой ширины КВМ	Ручное определение угловой ширины КВМ
Ложные результаты при определении скорости КВМ (в сторону её увеличения)	Данные более приближены к линейной скорости SOHO-LASCO
Ложноположительное определение КВМ (Yashiro et al., 2008)	Определение КВМ в ручном режиме

В результате исследования был сделан вывод, что метод трассерной визуализации является достойной альтернативой существующим методам анализа динамики солнечной плазмы при корональном выбросе массы и может быть использован в дальнейших исследованиях, которые следует сфокусировать на устранении выявленных недостатков и адаптации программ на основе PIV-метода под нужды исследователей солнечной плазмы при корональных выбросах массы.

ЛИТЕРАТУРА

Chen P. F. Coronal mass ejections: models and their observational basis // Living Reviews in Solar Physics. 2011. V. 8. DOI: 10.12942/lrsp-2011-1.

Gopalswamy N., *Yashiro S.*, *Michalek G. et al.* The SOHO/LASCO CME Catalog // Earth, Moon, and Planets. 2009. V. 104(1–4). P. 295–313. DOI: 10.1007/s11038-008-9282-7.

Robbrecht E., *Berghmans D.* Automated recognition of coronal mass ejections (CMEs) in near-real-time data // Astronomy and Astrophysics. 2004. V. 425(3). P. 1097–1106. DOI: 10.1051/0004-6361:20041302.

Thielicke W., *Sonntag R.* Particle Image Velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab // J. Open Research Software. 2021. V. 9(1). DOI: 10.5334/jors.334.

Yashiro S., *Michalek G.*, *Gopalswamy N.* A comparison of coronal mass ejections identified by manual and automatic methods // Annales Geophysicae. 2008. V. 26(10). P. 3103–3112. DOI: 10.5194/angeo-26-3103-2008.

COMPARISON OF PIVLAB AND CACTUS ANALYSIS OF SOLAR PLASMA DYNAMICS DURING CORONAL MASS EJECTION

V. G. Kalamanov

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

Solar plasma dynamics during coronal mass ejection was studied using the PIVlab computer program and the results were compared with data from the CACTus catalogue. Also, the positive and negative features of both PIVLab and CACTus were discussed. Based on the results of the experiment, it was concluded that the PIV method is a valid alternative to the existing methods of studying solar plasma dynamics during coronal mass ejection.

Keywords: coronal mass ejection, Sun, CME, solar plasma, particle image velocimetry, PIV method, PIVLab, CACTus

Vladimir Kalamanov — postgraduate, VGKalamanov@cosmos.ru

УДК 551.326.7:528.88:004.8 DOI: 10.21046/KMU-2025-160-179

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ РАДИОМЕТРА MIRAS СПУТНИКА SMOS ДЛЯ АНАЛИЗА СПЛОЧЁННОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА МОРЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Д. Р. Катамадзе [1], *В. В. Тихонов* [2,3,4], *Т. А. Алексеева* [4,2], *Е. В. Афанасьева* [4,2], *Ю. В. Соколова* [2], *И. В. Хвостов* [3], *А. Н. Романов* [3]

[1] **Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Москва, Россия**
[2] **Институт космических исследований РАН, Москва, Россия**
[3] **Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия**
[4] **Арктический и антарктический научно-исследовательский институт Санкт-Петербург, Россия**

Рассматривается возможность использования данных низкочастотного радиометра MIRAS спутника SMOS для корректировки современных алгоритмов, используемых для определения сплочённости морского льда Арктики. Проведённые исследования показали перспективность использования машинного обучения и использования данных низкочастотных спутниковых радиометров для оценки состояния морского ледяного покрова Арктики.

Ключевые слова: сплочённость морского льда, SMOS, MIRAS, радияркостная температура, модели машинного обучения

ВВЕДЕНИЕ

Каждый год на поверхности арктических морей образуется устойчивый ледяной покров в экстремальных климатических условиях, характерных для полярных регионов. Морской ледяной покров Арктики оказывает значительное влияние на народнохозяйственную деятельность. Сплочённый лёд затрудняет движение судов и представляет серьёзную опасность для судоходства. Прогнозирование ледовой обстановки крайне важно для обеспечения безопасного и эффективного судоходства (Алексеева и др., 2021б; Афанасьева и др., 2022; Миронов и др., 2021).

Уменьшение площади и толщины морского льда в Северном Ледовитом океане является главным индикатором изменения климата на Земле. Поэтому исследование характеристик морского ледяного покрова необходимо для углублённого понимания происходящих климатических процессов, прогнозирования метеорологических условий, обеспечения судоходства и многого другого. Отсюда вытекает необходимость непрерывного мониторинга площади, толщины, возраста и сплочённости морского льда Северного Ледовитого океана и прилегающих арктических морей (Мохов, 2020; Семенов и др., 2017). Сплочённость морского льда (СМЛ) — это важнейшая характеристика, показывающая отношение площади льда в зоне, где он распределён сравнительно равномерно, к общей площади

Катамадзе Диана Руслановна — магистр, DianaKatamadze@mail.ru
Тихонов Василий Владимирович — заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, vtikhonov@asp.iki.rssi.ru
Алексеева Татьяна Алексеевна —заведующая лабораторией, кандидат географических наук, taa@aari.ru
Афанасьева Екатерина Васильевна — научный сотрудник, afanasieva@aari.ru
Соколова Юлия Вадимовна — младший научный сотрудник, JuuuliiieeeS@yandex.ru
Хвостов Илья Владимирович — старший научный сотрудник, кандидат технических наук, nii82@mail.ru
Романов Андрей Николаевич — заведующий лабораторией, доктор технических наук, доцент, romanov_alt@mail.ru

этой зоны. СМЛ измеряется в процентах, где 100 % — сплошной лёд, а 0 % — водная поверхность, или в баллах: 10 баллов — сплошной лёд, 0 — баллов сплошная вода (Наблюдения..., 2009; Производство..., 2025).

Регулярное наблюдение и исследование морского ледяного покрова осуществляется по данным дистанционного зондирования Земли. Спутниковые микроволновые радиометры позволяют осуществлять мониторинг морского льда Арктики несколько раз в сутки при любых погодных и световых условиях (Ермаков и др., 2024; Тихонов и др., 2024). В настоящее время на орбите Земли работают следующие микроволновые радиометры:

- SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder), установленный на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) серии DMSP (*англ.* Defense Meteorological Satellite Program), США;
- AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2, установленный на спутнике GCOM-W1 (*англ.* Global Change Observation Mission — Water 1), Япония;
- радиометр, работающий в L-диапазоне (1,41 ГГц) с полной поляризацией, установленный на спутнике NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) SMAP (*англ.* Soil Moisture Active Passive), США;
- MIRAS (*англ.* Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis), установленный на спутнике SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity), Европа;
- МТВЗА-ГЯ (Микроволновый сканер температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове), установленный на спутниках серии «Метеор-М» № 2, Россия.

Сплочённость морского льда определяется, как правило, по данным первых двух радиометрических систем (SSMIS и AMSR2). Для этого используются специализированные алгоритмы, которых, на данный момент, насчитывается около двух десятков. Наиболее используемые из них это: NasaTeam, Bootstrap, Bristol, ASI, TUD (Тихонов и др., 2016). В последнее время часто находят применение так называемые «гибридные алгоритмы», которые используют методику нескольких алгоритмов. Среди них необходимо назвать SIC CDR, OSI SAF Hybrid, OSI SAF TUD (Алексеева и др., 2022). Все эти алгоритмы основаны на данных каналов от 18,7 ГГц и выше. Излучение на этих частотах в период таяния льда и снежного покрова исходит практически с поверхности среды. Излучательная способность льда и снега сильно зависит от содержания жидкой воды в них и находится между значениями излучательной способности сухой снежно-ледовой толщи и открытой воды. В результате этого алгоритмы недооценивают СМЛ (Тихонов и др., 2016; Ivanova et al., 2015). Для решения данной проблемы необходимо совершенствование существующих алгоритмов и использование радиометров с более низкой частотой, которая позволит проникать в более глубокие слои снежно-ледяного покрова. Одним из таких датчиков представляется радиометр MIRAS спутника SMOS. Он работает на частоте 1,4 ГГц. Глубина формирования излучения (толщина эффективно-излучающего слоя) на этой частоте значительно больше, чем на частотах от 18,7 ГГц и выше (Тихонов и др., 2020; Tikhonov et al., 2014, 2018). Основываясь на результатах работы (Тихонов и др., 2023) было предложено использовать данные радиометра MIRAS для корректировки работы современных алгоритмов.

РЕГИОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения данной задачи был выбран регион исследования — часть Северного морского пути — Карское море и море Лаптевых. Северный морской путь является самым коротким морским путём между Европой и Азией и его использование может существенно сократить время и расходы на перевозку грузов. Однако из-за сложной ледовой обстановки в зимне-весенний период и непредсказуемости арктических условий этот маршрут представляет большие трудности и требует специальной подготовки судов и обеспечения безопасности их плавания (Алексеева и др., 2021б; Афанасьева и др., 2022).

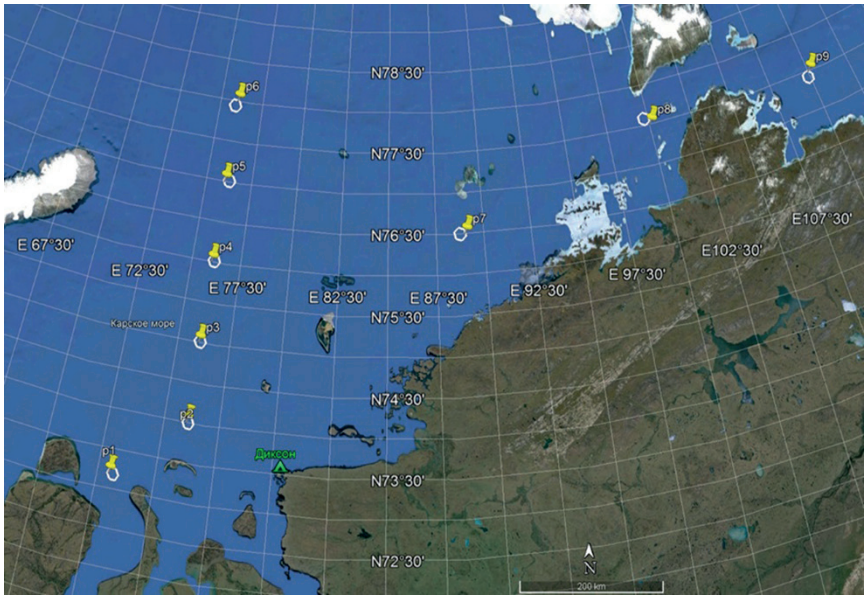


Рис. 1. Регион исследования. Белые шестиугольники — выбранные области для исследования, соответствующие ячейкам дискретной геодезической сетки DGG ISEA 4H9 (см. разд. «Данные»). Жёлтые кнопки указывают номер выбранной области

Таблица 1. Выбранные области исследования (см. рис. 1) и координаты их центра

Номер области	Координаты, град	
	Северная широта	Восточная долгота
P1	73,205	73,193
P2	74,007	76,092
P3	75,017	76,081
P4	76,021	76,144
P5	77,016	76,269
P6	77,948	75,902
P7	76,502	88,757
P8	77,583	99,751
P9	77,434	109,861

В Карском море было выбрано девять областей (рис. 1), по которым были получены данные яркостной температуры ($T_я$) радиометра MIRAS спутника SMOS за 2022–2023 гг. В табл. 1 приведены координаты центра выбранных областей, а на рис. 1 они отображены на карте.

ДАННЫЕ

Сплочённость морского льда в выбранных областях была предоставлена сотрудниками Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). Она определялась в результате комплексного дешифрирования спутниковых изображений видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов, а также снимков, полученных с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Поскольку до шести месяцев в году в Арктике длится полярная ночь, данные видимого диапазона в прибрежных районах морей доступны лишь с февраля по октябрь. С ноября по январь для определения СМЛ применялся ИК-диапазон электромагнитного спектра. Помимо оптических радиометров для дешифрирования использовались данные РСА, которые позволяют получать информацию о ледяном покрове вне зависимости от погодных условий и условий естественной освещённости (Спутниковые..., 2011).

По известным дешифровочным признакам (Спутниковые..., 2011) на спутниковых изображениях различных диапазонов определялись следующие характеристики льда: общая сплочённость, возрастной состав, размер ледяных полей, а также граница припая (Афанасьева и др., 2019). Эти характеристики фиксировались с учётом стандарта Всемирной метеорологической организации (ВМО) (WMO..., 2017). При этом в летние месяцы (с июня по сентябрь), когда на поверхности льда формируется слой талой воды, определение возраста было невозможным.

В настоящей работе для определения СМЛ использовался архив ААНИИ спутниковых данных оптической и радиолокационной съёмки за 2022 и 2023 гг. Анализ ледовых условий выполнялся визуально с использованием изображений радиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) спутников Terra и Aqua (https://worldview.earthdata.nasa.gov/), радиометра VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) спутника Suomi-NPP (*англ.* Suomi National Polar-orbiting Partnership), а также РСА спутника Sentinel-1A (https://search.asf.alaska.edu/#/). В выбранных девяти областях, соответствующих пикселям радиометра MIRAS, были получены временные ряды общей сплочённости льда за 2022 и 2023 гг. Дискретность измерений определялась наличием безоблачных снимков в оптическом диапазоне, а также частотой радиолокационной съёмки анализируемых участков, но не чаще одного измерения в сутки.

Радиометр MIRAS спутника SMOS регистрирует вертикально и горизонтально поляризованное восходящее излучение при углах визирования от 0 до 60° (Kerr et al., 2010). Максимальный пространственный охват достигается при угле 42,5°. В этом случае пространственное разрешение составляет 35×65 км (Gutierrez et al., 2017). В работе были использованы данные продукта первого уровня SMOS L1C. Эти данные привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9 (см. рис. 1). Линейный размер ячейки сетки составляет величину порядка 16 км, а площадь — около 195 км^2 (Sahr et al., 2003). Значение $T_я$ для любой ячейки сетки формируется участком подстилающей поверхности площадью около 1780 км^2 (по уровню 3 дБ). Получается, что один пиксель радиометра MIRAS содержит в среднем порядка девяти ячеек геодезической сетки DGG ISEA 4H9. Сама же ячейка расположена в центре этого участка.

Таким образом, был подготовлен массив данных, состоящий из сплочённости морского льда, полученной из архива ААНИИ, и яркостной температуры, определённой радиометром MIRAS за 2022 и 2023 гг.

Для анализа метеопараметров в исследуемом регионе за выбранный период использовался набор данных реанализа ERA5. ERA5 — это климатическая реанализ-модель, разработанная Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)). В основе реанализа лежит метод слияния данных, при котором физико-математическая модель атмосферы объединяет разнородные метеорологические наблюдения со всего мира в единый, согласованный и полный набор данных. Каждые 12 ч предыдущий прогноз оптимально корректируется с учётом новых поступивших наблюдений, формируя наилучшую на данный момент оценку состояния атмосферы, которая затем используется для расчёта нового прогноза. Благодаря использованию современной численной модели и ассимиляции данных, ERA5 обеспечивает более полные и однородные климатические ряды, чем исходные разрозненные и не всегда сопоставимые наблюдения, на основе которых она формирует согласованную реконструкцию состояния атмосферы (https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-timeseries?tab=overview). Кроме того был использован погодный сервис Ventusky, отображающий в режиме реального времени анимированную карту различных метеорологических явлений. Основным поставщиком метеорологических данных для приложения Ventusky является Метеорологическая служба Германии DWD (*англ.* Deutscher Wetterdienst) и Национальное управление океанических и атмосферных исследований NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration), а также ряд других организаций. Они используют для отображения метеоусловий полярных областей данные спутников NOAA-20, MetOp-B, MetOp-C и др. (https://www.ventusky.com/ru/about).

В работе была проанализирована точность пяти современных алгоритмов определения СМЛ по данным СМР по выбранным областям за 2023 г. Это два алгоритма, использующие данные SSMIS (SIC CDR, OSI SAF Hybrid), и три алгоритма, использующие данные AMSR2 (ASI, OSI SAF Hybrid, OSI SAF TUD). Источники данных и документация по этим алгоритмам представлена в табл. 2.

Таблица 2. Анализируемые алгоритмы, источники данных и документация

Алгоритм	Радиометр; каналы	Источник данных	Документация
SIC CDR	SSMIS; 19, 22, 37 ГГц	https://noaadata.apps.nsidc.org/NOAA/G02202_V4/north/daily/ https://noaadata.apps.nsidc.org/NOAA/G10016_V2/north/daily/	https://nsidc.org/sites/default/files/g02202-v004-user-guide_1_1.pdf
OSI SAF Hybrid	SSMIS; 19, 37 ГГц	ftp://osisaf.met.no/archive/ice/conc/	https://osisaf-hl.met.no/sites/osisaf-hl/files/user_manuals/osisaf_pum_ice-conc_l2-3_v1p2.pdf https://osisaf-hl.met.no/sites/osisaf-hl/files/baseline_document/osisaf_atbd_ice-conc_l2-3_v1p3.pd
OSI SAF Hybrid	AMSR-2; 18, 36 ГГц	ftp://osisaf.met.no/archive/ice/conc_amsr/	
OSI SAF TUD	AMSR-2; 18, 36, 89 ГГц	ftp://osisaf.met.no/archive/ice/conc_amsr/	
ASI	AMSR-2; 18, 23, 37, 89 ГГц	https://data.seaice.uni-bremen.de/amsr2/asi_daygrid_swath/n6250/	https://seaice.uni-bremen.de/fileadmin/user_upload/ASIuserguide.pdf

МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В ходе исследования использовалось восемь моделей машинного обучения (МО): Linear Regression (Linear), Ridge Regression (Ridge), Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO), ElasticNet (ElaNet), DecisionTreeRegressor (DTR), RandomForestRegressor (RFR), EXtreme Gradient Boosting (XGBoost), KNeighborsRegressor (KNR). Основная задача регрессионных моделей — найти зависимость между атрибутами и целевой переменной, минимизируя ошибку прогнозирования. Целевой переменной была СМЛ. Атрибутами стали четыре переменные: яркостная температура на горизонтальной (T_h) и вертикальной поляризации (T_v), их соотношение (T_h/T_v) и поляризационное соотношение (Pr(1,4)), которое определяется, как $(T_v - T_h)/(T_v + T_h)$. Каждая из моделей имеет свои методы регуляризации, настройки параметров и подходы к выбору наиболее релевантных признаков (Флах, 2015).

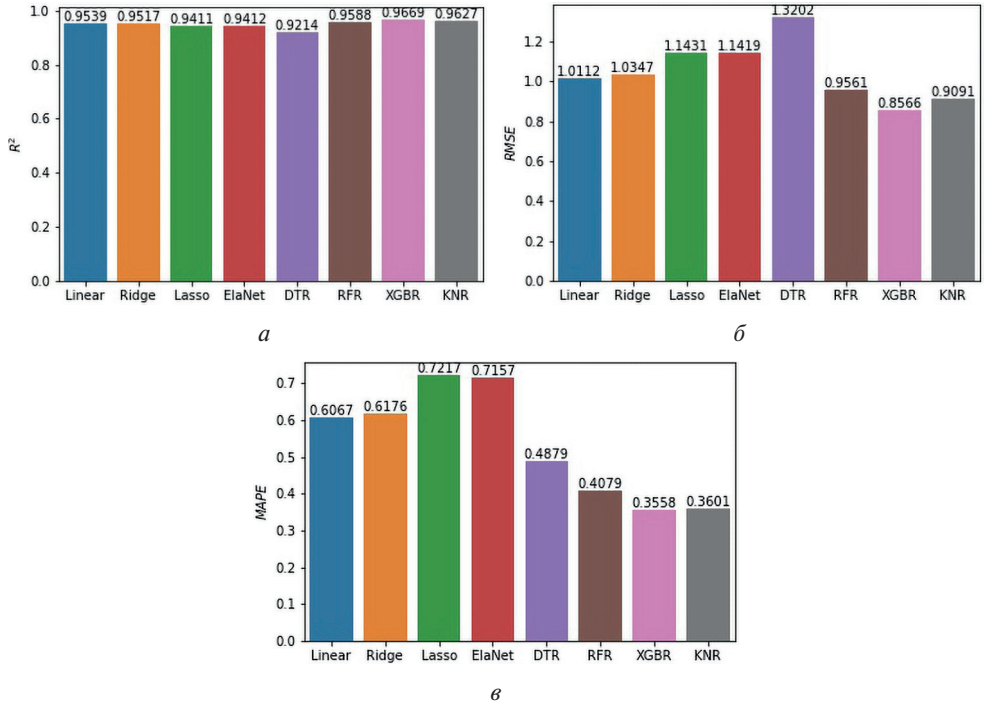


Рис. 2. Результаты метрик эффективности по данным за 2023 г.:
а — R^2; *б* — RMSE; *в* — MAPE

Эффективность моделей оценивалась с помощью трёх метрик качества: коэффициента детерминации (R^2), RMSE (*англ.* Root Mean Squared Error) и MAPE (*англ.* Mean Absolute Percentage Error). Применение нескольких метрик качества позволяет получить более полное представление о работе модели. Такой подход необходим в выборе наилучшей модели для конкретной задачи. Модели обучались на данных за 2022 г., а их качество оценивалось на наборе данных за 2023 г. Такое разделение необходимо для точной оценки качества модели и предотвращения переобучения. Подробнее о характеристиках моделей и их применении при анализе СМЛ изложено в работе (Тихонов и др., 2024).

На рис. 2*а* видно, что все обученные модели демонстрируют высокие значения R^2. Это указывает на то, что модели успешно реагируют на изменения в атрибутах и, в свою очередь, эффективно корректируют прогнозируемые значения. Метрики RMSE и MAPE показали, что модель XGBoost даёт наиболее точные результаты (см. рис. 2*б*, *в*). Следует отметить, что XGBoost не только показала лучшие значения метрик эффективности, но и имеет широкий набор гиперпараметров, грамотная настройка которых позволяет существенно повысить точность прогнозирования. Будучи одной из самых передовых и динамично развивающихся моделей машинного обучения, XGBoost является особенно перспективной для использования. (Ali et al., 2023).

Для визуализации результатов определения СМЛ моделью XGBoost по данным радиометра MIRAS были построены графики по всем исследуемым областям в сравнении с данными, определёнными методом визуального дешифрирования по спутниковым данным оптического диапазона и изображениям РСА (ААНИИ). На рис. 3 показано такое сравнение для четырёх областей (Р2, Р5, Р7, Р9).

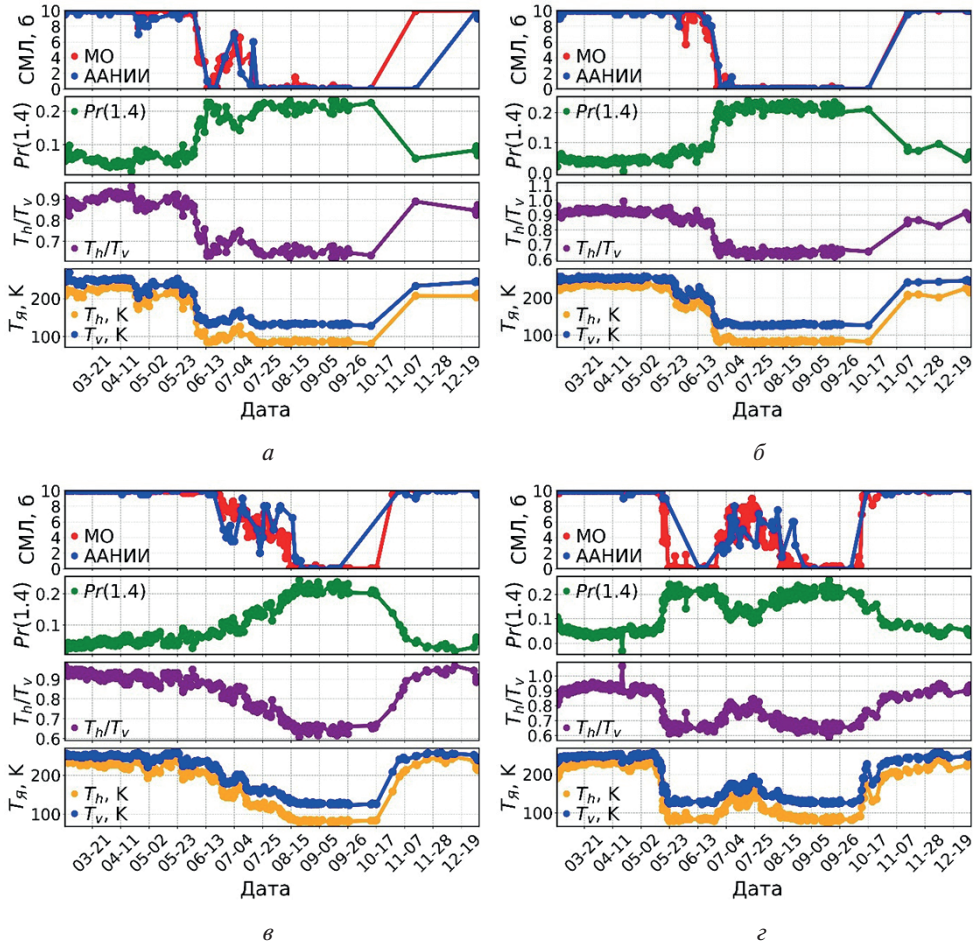


Рис. 3. Динамика за 2023 г.: T_h, T_v, T_h/T_v, Pr(1.4) и СМЛ в баллах, полученная методом МО и методом визуального дешифрирования спутниковых данных (ААНИИ) для областей: *а* — Р2; *б* — Р5; *в* — Р7; *г* — Р9 (см. рис. 1 и табл. 1)

Для оценки полученных результатов был построен график разброса предсказанной сплочённости льда, определённой методом МО, и фактической, полученной в ААНИИ в результате комплексного дешифрирования спутниковых изображений видимого и ИК-диапазона, а также снимков, полученных с помощью РСА (рис. 4). На графике по оси *X* отображены значения сплочённости льда, определённой в ААНИИ, а по оси Y — предсказанной моделью МО XGBoost.

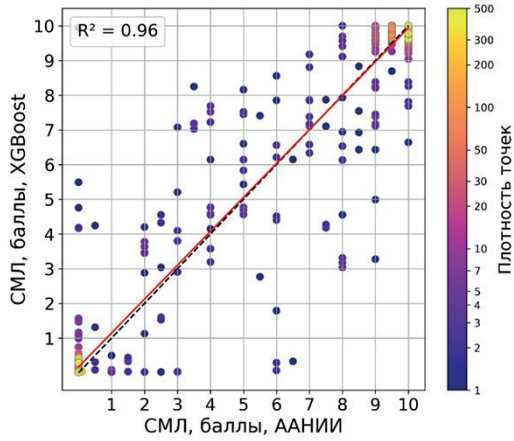


Рис. 4. Диаграмма рассеяния СМЛ в баллах, полученная методом МО и по данным ААНИИ. Цветом отмечена плотность точек (см. шкалу справа)

Из рис. 3, 4 видно, что СМЛ, прогнозируемая с помощью модели XGBoost, вполне соответствует сплочённости морского льда, определённой по данным архива спутниковых снимков ААНИИ. Полученные результаты показывают перспективность использования модели МО XGBoost, обученной на данных радиометра MIRAS для корректировки алгоритмов, определяющих сплочённость морского покрова Арктики.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ

Для детального анализа было выбрано пять алгоритмов определения СМЛ по данным СМР: три алгоритма для данных AMSR2 (ASI, OSI SAF Hybrid, OSI SAF TUD) и два алгоритма для SSMIS (SIC CDR, OSI SAF Hybrid). Эти алгоритмы выбирались на основании их широкого применения для определения СМЛ (Алексеева и др., 2022; Kern et al., 2019; 2020; 2022).

На рис. 5–7 показаны результаты сравнения по трём исследуемым областям (P5, P7, P9) СМЛ, полученной по выбранным пяти алгоритмам, с данными ААНИИ. Проведённый анализ показал, что все алгоритмы достаточно хорошо определяют СМЛ в сравнении с результатами, полученными по спутниковым снимкам видимого и ИК-диапазона, а также изображениям РСА (данные ААНИИ). Однако алгоритмы допускают серьёзные ошибки, иногда на несколько баллов, особенно в моменты увеличения температуры воздуха выше нуля градусов Цельсия, т. е. при таянии снежно-ледяного покрова, особенно в весенне-летний период.

На рис. 8 представлены диаграммы рассеяния значений СМЛ, полученные по данным ААНИИ и по пяти алгоритмам.

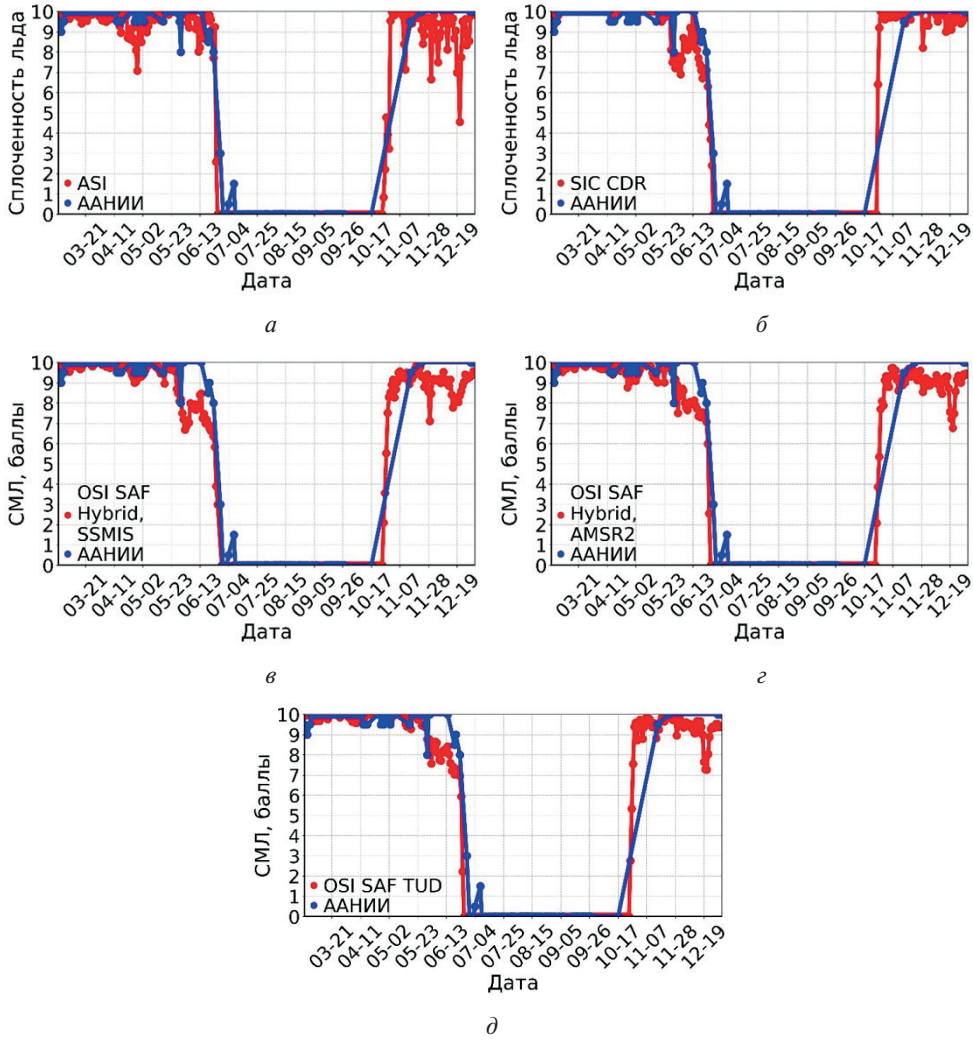


Рис. 5. Динамика СМЛ за 2023 г., полученная алгоритмами и по данным ААНИИ для области Р5: *а* — для ASI по данным AMSR2; *б* — для SIC CDR по данным SSMIS; *в* — для OSI SAF Hybrid по данным SSMIS; *г* — для OSI SAF Hybrid по данным AMSR2; *д* — для OSI SAF TUD по данным AMSR2

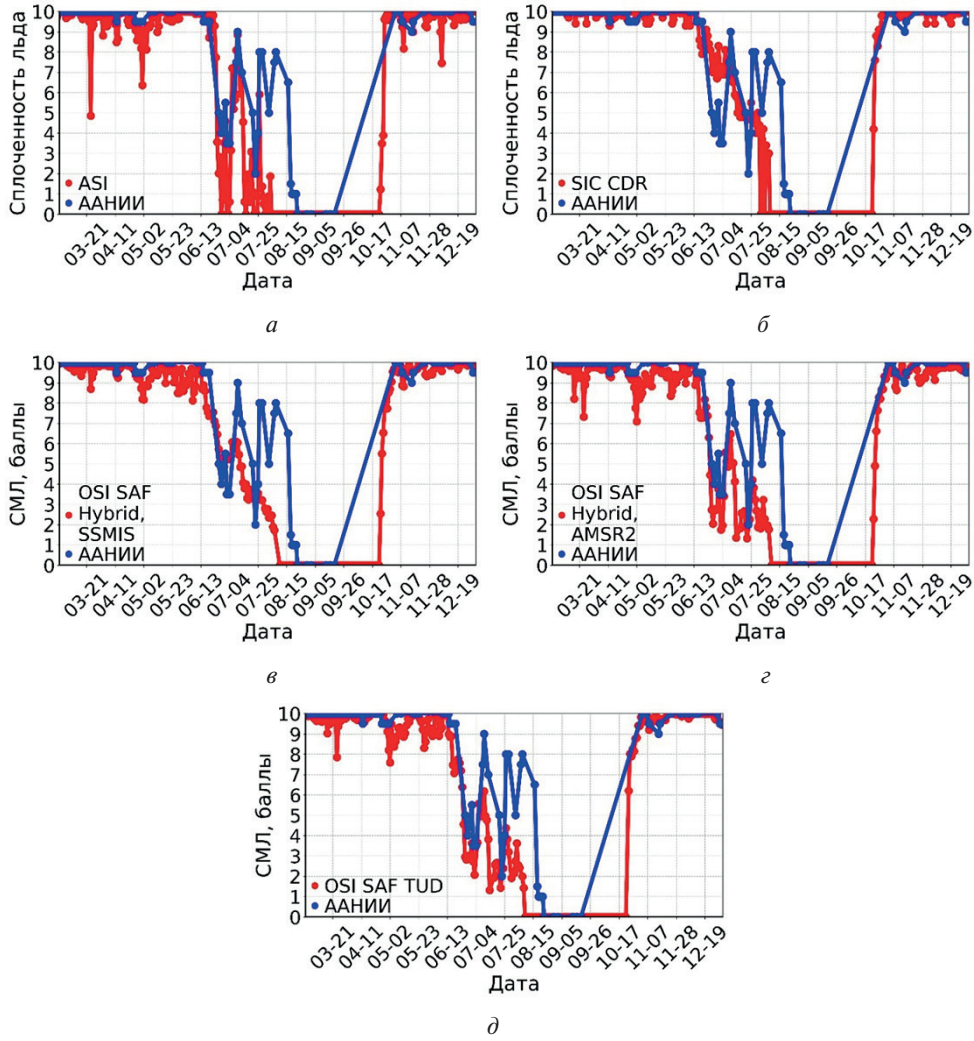


Рис. 6. Динамика СМЛ за 2023 г, полученная алгоритмами и по данным ААНИИ для области Р7: *а* — для ASI по данным AMSR2; *б* — для SIC CDR по данным SSMIS; *в* — для OSI SAF Hybrid по данным SSMIS; *г* — для OSI SAF Hybrid по данным AMSR2; *д* — для OSI SAF TUD по данным AMSR2

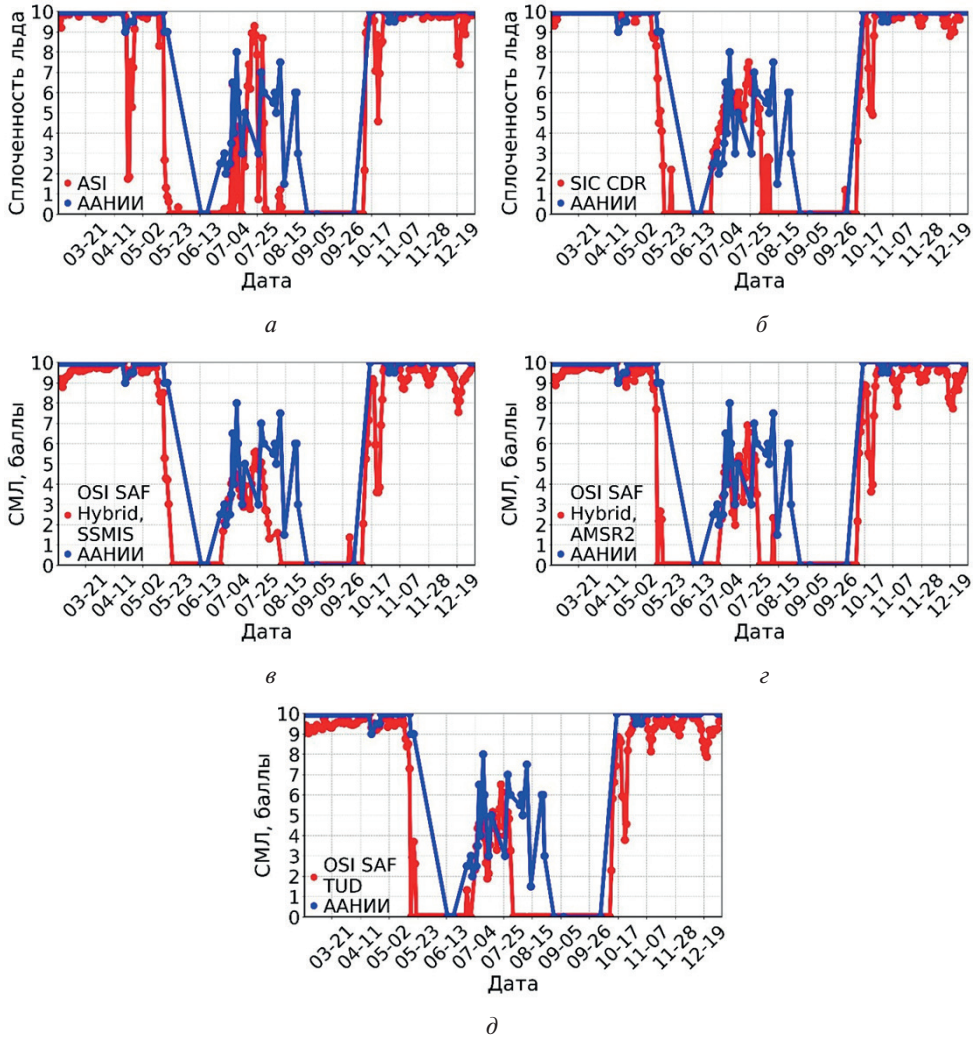


Рис. 7. Динамика СМЛ за 2023 г., полученная алгоритмами и по данным ААНИИ для области Р9: *а* — для ASI по данным AMSR2; *б* — для SIC CDR по данным SSMIS; *в* — для OSI SAF Hybrid по данным SSMIS; *г* — для OSI SAF Hybrid по данным AMSR2; *д* — для OSI SAF TUD по данным AMSR2

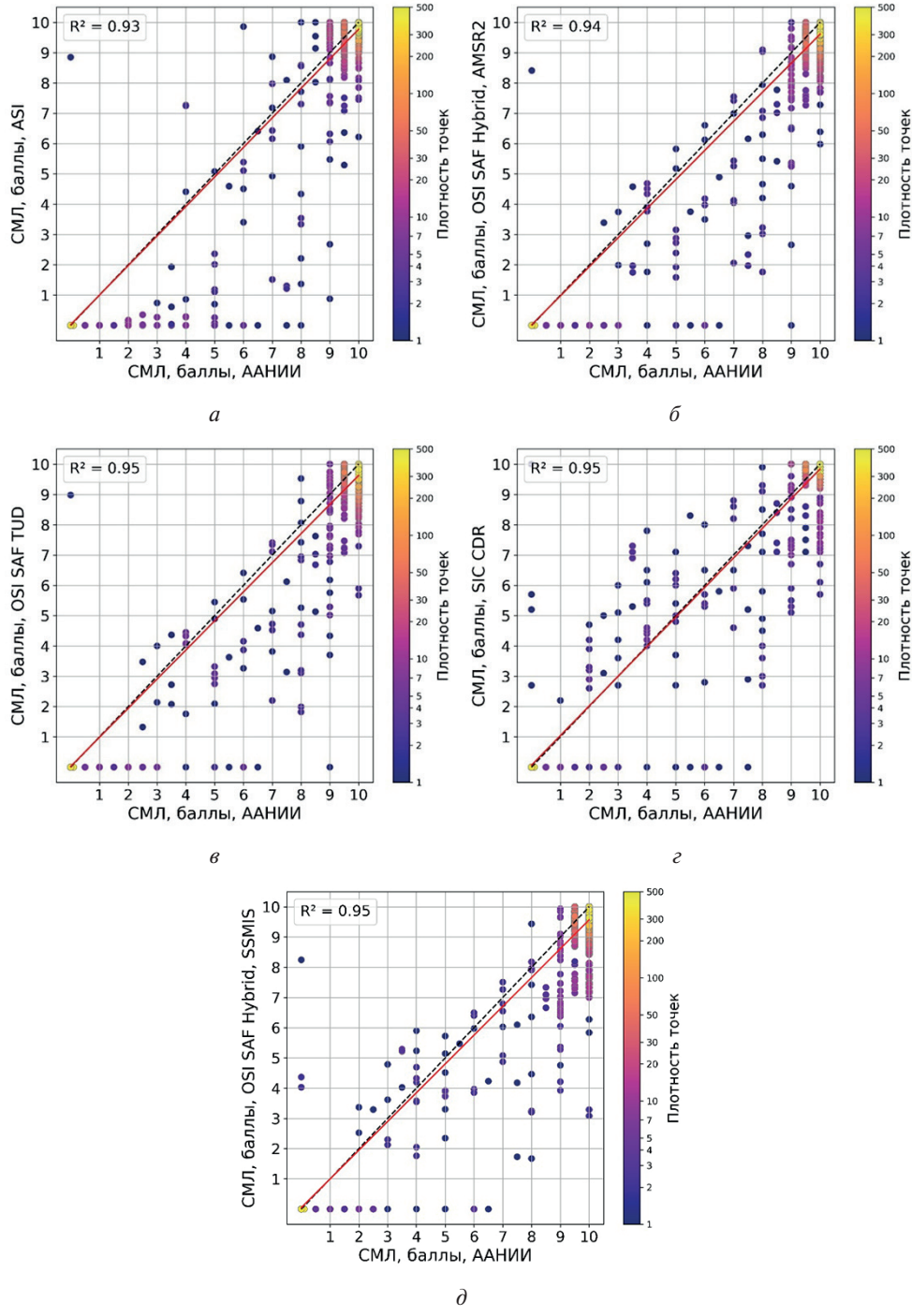


Рис. 8. Диаграмма рассеяния СМЛ, полученная алгоритмами и по данным ААНИИ, цветом отмечена плотность точек (см. шкалу справа): *а* — для алгоритма ASI по данным AMSR2; *б* — для алгоритма OSI SAF Hybrid по данным AMSR2; *в* — для алгоритма OSI SAF TUD по данным AMSR2; *г* — для алгоритма SIC CDR по данным SSMIS; *д* — для алгоритм OSI SAF Hybrid по данным SSMIS

Из рис. 5–8 можно сделать вывод, что все алгоритмы достаточно хорошо коррелируют с данными ААНИИ и имеют высокий R^2. При детальном рассмотрении видно, что алгоритм ASI (см. рис. 8*а*) занижает СМЛ и обладает самым низким коэффициентом детерминации; OSI SAF Hybrid (см. рис. 8*б*) также занижает СМЛ, но меньше чем ASI, и обладает более высоким R^2. Наилучшим результатом среди алгоритмов, обрабатывающих данные AMSR2, обладает OSI SAF TUD (см. рис. 8*в*). Он также занижает СМЛ, но имеет наивысший коэффициент детерминации. Два алгоритма SIC CDR (см. рис. 8*г*) и OSI SAF Hybrid (см. рис. 8*д*), использующие данные SSMIS, также показали высокий R^2. Однако после анализа данных и графиков рассеяния выявлено, что алгоритм SIC CDR меньше занижает СМЛ по сравнению с алгоритмом OSI SAF Hybrid. Таким образом, для дальнейших исследований было выбрано два алгоритма определения СМЛ по данным СМР: OSI SAF TUD и SIC CDR. Первый из них определяет СМЛ по данным спутникового радиометра AMSR2, а второй — по данным спутникового радиометра SSMIS.

Для улучшения определения СМЛ выбранными алгоритмами с использованием данных радиометра MIRAS, необходимо было проанализировать результаты СМЛ, полученные методом МО (см. рис. 3) и алгоритмами (см. рис. 5–7) и сравнить и их с данными, представленными ААНИИ. В результате такого анализа были выделены основные даты, когда алгоритмы допускали наибольшие ошибки, определены их причины и предложены пути исправления ошибок используя модель МО.

Рисунки 3 и 5–7 показывают, что и алгоритмы, и модель машинного обучения имеют хорошую корреляцию с данными ААНИИ, следуя общему годовому тренду изменений СМЛ. У алгоритмов OSI SAF TUD и SIC CDR (см. рис. 5–7) обнаружено значительное занижение сплочённости льда в июле – августе. Кроме того, в период с февраля по июнь выбранные алгоритмы иногда также занижают СМЛ по сравнению с данными оптического диапазона и РСА-изображениями. В свою очередь модель МО XGBoost показывает более близкую СМЛ к данным ААНИИ в этот период (см. рис. 3). Для выявления причин занижения СМЛ выбранными алгоритмами был выполнен анализ метеоданных за 2023 г. в исследуемом регионе (см. рис. 1).

Анализ метеоданных летнего периода показал, что на даты заниженной алгоритмами СМЛ температура воздуха была положительной, а за несколько дней до этого в регионе дул сильный ветер (>10 м/с) северного направления. Этот ветер принёс из центральных областей Арктики лёд, который под воздействием положительной температуры стал таять и разрушаться. Такой разрушенный и мокрый лёд имеет излучательную способность значительно меньшую, чем морской лёд при отрицательной температуре. В связи с этим алгоритмы (в нашем случае SIC CDR и OSI SAF TUD) занижают реальную СМЛ, или вообще показывают отсутствие ледяного покрова (Алексеева и др., 2021а). Модель МО XGBoost, обученная на данных MIRAS, в большинстве случаев, позволяет идентифицировать такой мокрый и разрушенный лёд (см. рис. 3). Объясняется это большей глубиной формирования излучения на частоте 1,4 ГГц (MIRAS) по сравнению с глубиной формирования излучения на частотах радиометров SSMIS и AMSR2, по данным которых построена работа алгоритмов SIC CDR и OSI SAF TUD.

Занижение СМЛ алгоритмами SIC CDR и OSI SAF TUD в более холодный период года (февраль – июнь) объясняется, согласно анализу метеоданных, двумя факторами. В первую очередь, это локальное повышение температуры воздуха до 0 °С и выше. Оно приводит к таянию верхнего слоя снежно-ледяного покрова и появлению на поверхности жидкой воды. Это вызывает уменьшение излучательной способности поверхности на высоких частотах (SSMIS и AMSR2), что приводит к занижению СМЛ алгоритмами SIC CDR и OSI SAF TUD. Вторым фактором является выпадение осадков в виде снега и замерзающего дождя. Алгоритмы,

работающие по данным SSMIS и AMSR2 (в том числе SIC CDR и OSI SAF TUD) занижают СМЛ при различных атмосферных изменениях, таких как осадки, туман, повышение влажности (см., напр., Тихонов и др., 2016; Ivanova et al., 2015). В свою очередь, на данные радиометра MIRAS атмосферные эффекты практически не оказывают влияния (Кутуза и др., 2016), что позволяет модели МО XGBoost показывать более реальную сплочённость льда.

Модель машинного обучения XGBoost, разработанная на основе данных радиометра MIRAS спутника SMOS, хорошо определяет сплочённость льда и менее подвержена влиянию атмосферы. Однако, несмотря на это преимущество, использование только данных MIRAS для определения сплочённости льда невозможно. Главная проблема заключается в низком пространственном разрешении радиометра, что не позволяет детально анализировать мелкомасштабные изменения в ледяном покрове. Поэтому для получения более точной картины о СМЛ необходимо комбинировать эти данные с другими радиометрами, такими как SSMIS и AMSR2, которые, невзирая на определённые ограничения, обладают более высоким разрешением.

НОВАЯ МЕТОДИКА

Для корректировки алгоритмов была использована модель МО XGBoost, обученная на данных MIRAS. Для этого необходимо было определить критерии, при которых использование данных MIRAS будет наиболее эффективным, чтобы повысить точность определения сплочённости морского льда.

Анализ метеоданных в даты наибольших ошибок алгоритмов SIC CDR и OSI SAF TUD показал целесообразность использования СМЛ определённой XGBoost на основе данных MIRAS в августе и сентябре при температуре выше −1,8 °C (температура замерзания морской воды), в остальное время года — при температуре выше 0 °C (температура таяния поверхности снега и льда), в других случаях необходимо использовать данные алгоритмов SIC CDR и OSI SAF TUD.

Разработанную методику применили ко всем девяти областям исследуемой территории (см. рис. 1). Полученные данные СМЛ усовершенствованным методом и по данным ААНИИ отражены на рис. 9 и 10.

Рисунок 9 показывает, что алгоритм SIC CDR стал лучше определять СМЛ при положительной температуре. На рис. 5*б* видно, что изначально алгоритм SIC CDR не смог зарегистрировать повышение сплочённости льда на 1,5 балла в июле и занижал СМЛ около 1 балла в июне. После интеграции с данными модели МО XGBoost алгоритм стал лучше определять СМЛ в летнее время (ср. рис. 5*б* и 9*д*). На рис. 6*б* показано, что алгоритм SIC CDR периодически занижает сплочённость льда на величину около 1 балла в конце мая – начале июня, а в конце июля регистрирует СМЛ, равную 0, в то время как она, по данным ААНИИ, составляет величину порядка 8 баллов. На рис. 9*ж* видно, что обновлённый алгоритм не занижает сплочённость в мае – июне, а в конце июля определяет СМЛ в 4 балла, что значительно ближе к реальным значениям. Рисунок 7*б* демонстрирует, что изначально алгоритм SIC CDR в конце июля – начале августа показывал сплочённость льда ниже реальной на 3–4 балла, после применения нового метода алгоритм повысил СМЛ и она стала ближе к данным ААНИИ (см. рис. 9*к*).

Комбинирование данных радиометра AMSR2 с радиометром MIRAS и алгоритмом OSI SAF TUD показало, что метод стал точнее отражать летнюю СМЛ. Рисунок 5*д* показывает похожую ситуацию с алгоритмом SIC CDR. Нулевые показатели СМЛ в начале июля и занижение СМЛ на два балла в начале июня. Рисунок 10д демонстрирует, что после применения нового метода, алгоритм стал точнее определять сплочённость льда в эти даты.

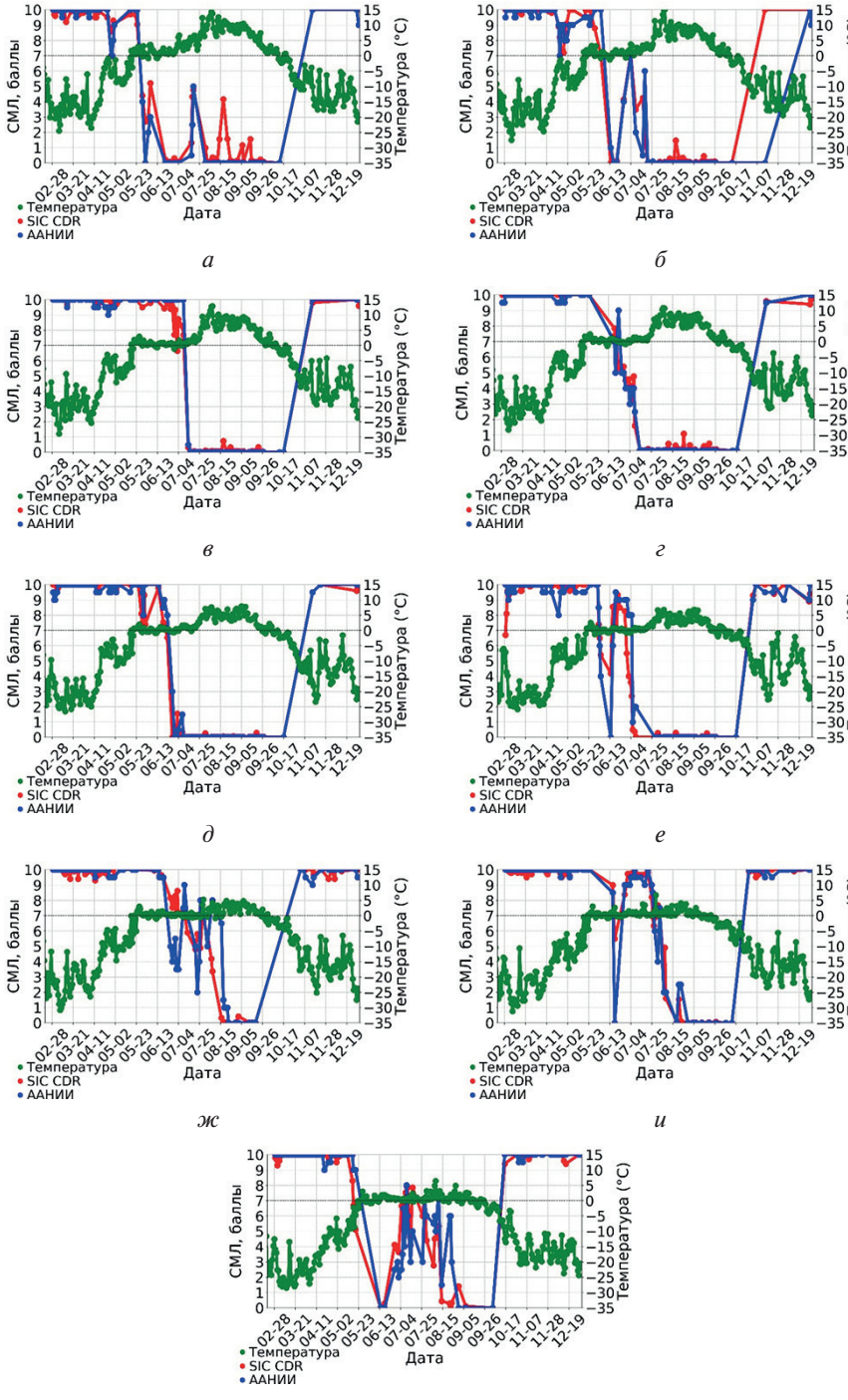


Рис. 9. Сравнение динамики температуры воздуха и СМЛ за 2023 г., полученной алгоритмом SIC CDR с применением метода МО по модели XGBoost на основе данных MIRAS и методом визуального дешифрирования спутниковых данных (ААНИИ) для областей: *а* — Р1; *б* — Р2; *в* — Р3; *г* — Р4; *д* — Р5; *е* — Р6; *ж* — Р7; *и* — Р8; *к* — Р9

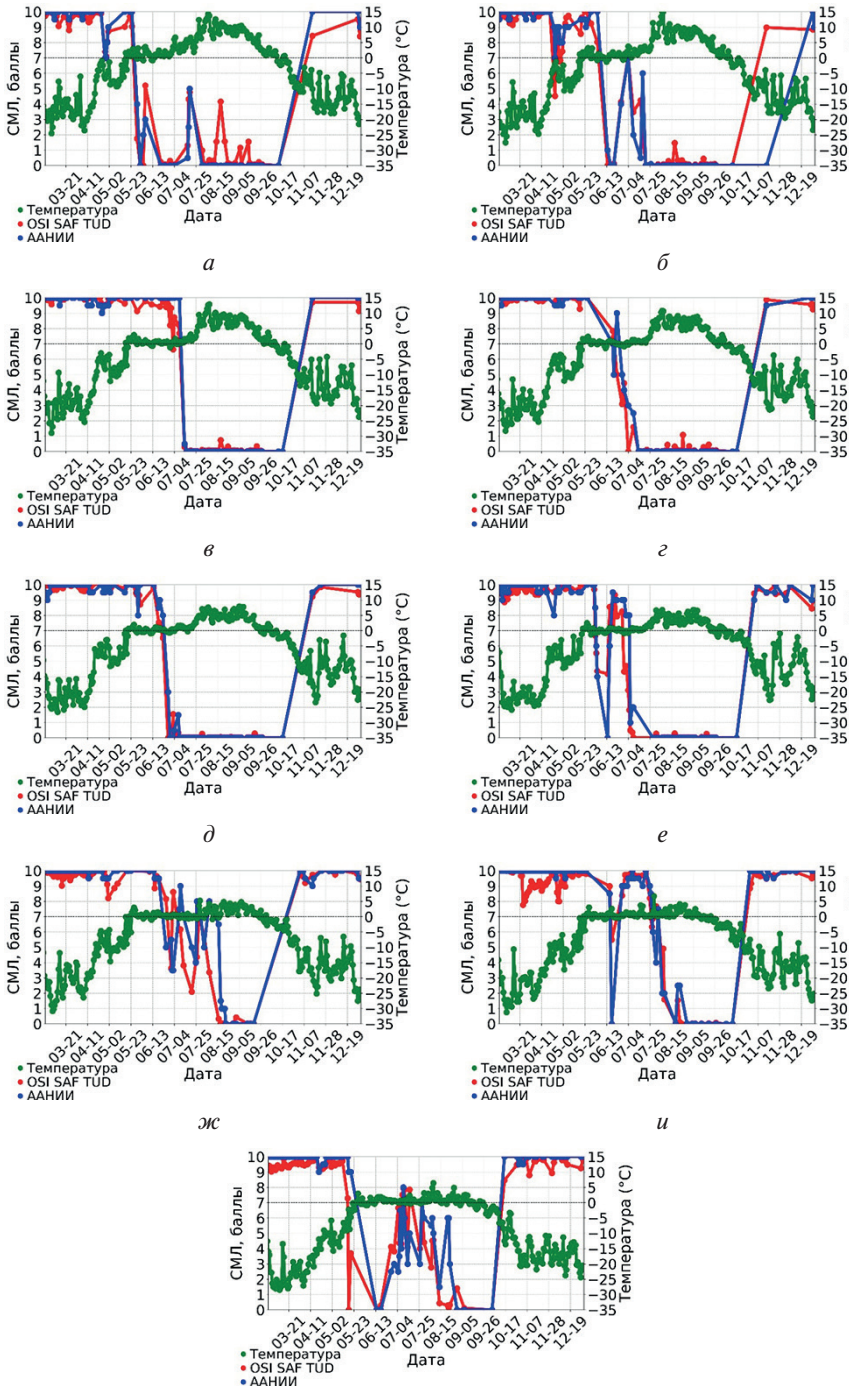
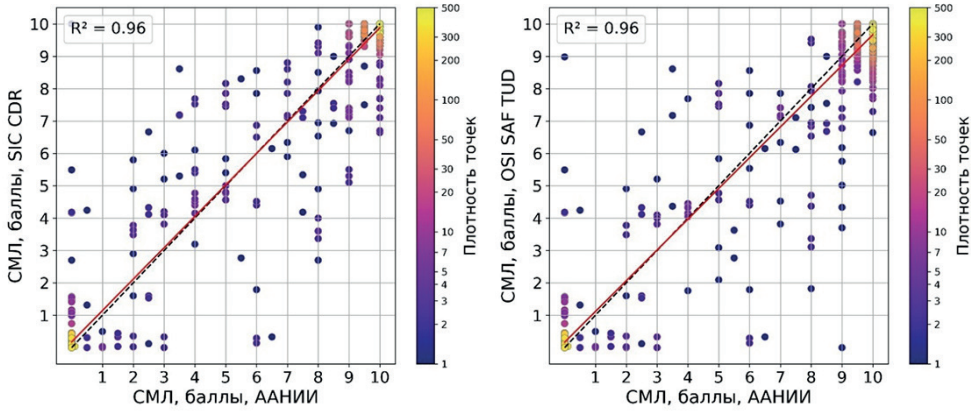


Рис. 10. Динамика температуры воздуха и СМЛ за 2023 г., полученная алгоритмом OSI SAF TUD с применением метода МО по модели XGBoost на основе данных MIRAS и методом визуального дешифрирования спутниковых данных (ААНИИ): *а* — Р1; *б* — Р2; *в* — Р3; *г* — Р4; *д* — Р5; *е* — Р6; *ж* — Р7; *и* — Р8; *к* — Р9

На рис. 6*д* показано занижение СМЛ в июле алгоритмом OSI SAF TUD на 3–4 балла. В свою очередь новый метод в этот период показывает СМЛ ниже на 1–2 балла от данных ААНИИ (рис. 10*ж*). На рис. 7*д* видно, что алгоритм в августе показывал СМЛ близкой к нулю, в то время как реальной она была в районе 5 баллов. Рисунок 10*к* показывает, что обновлённый алгоритм определил значения СМЛ, близкие к реальным.

На рис. 11 представлены графики разброса СМЛ, полученной по данным алгоритмов SIC CDR и OSI SAF TUD, которые были улучшены с помощью метода, использующего данные модели МО XGBoost и радиометра MIRAS, в сравнении с данными ААНИИ.



а *б*

Рис. 11. Диаграмма рассеяния СМЛ, полученная алгоритмами SIC CDR и OSI SAF TUD, которые были улучшены с помощью метода МО, и методом визуального дешифрирования спутниковых данных (ААНИИ), цветом отмечена плотность точек (см. шкалу справа): *а* — SIC CDR; *б* — OSI SAF TUD

Из рис. 11 видно, что коэффициент детерминации стал выше как для алгоритма SIC CDR, так и для алгоритма OSI SAF TUD. Также видно, что после применения метода МО по модели XGBoost алгоритм OSI SAF TUD меньше занижает СМЛ, чем OSI SAF TUD без использования нового метода (ср. рис. 11*б* и 8*в*).

Скорректированные алгоритмы показали более точные результаты определения сплочённости морского льда, а также подтвердили перспективность дальнейших исследований применения низкочастотных данных спутниковых микроволновых радиометров для нахождения характеристик морского ледяного покрова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования удалось добиться увеличения точности определения СМЛ двумя выбранными алгоритмами, используя новый метод, основанный на модели МО XGBoost, которая была обучена на данных радиометра MIRAS. Полученные результаты показывают перспективность дальнейших исследований комбинаций радиометров, работающих на низких частотах (1,4 ГГц) и радиометров с высоким разрешением (AMSR2) для определения СМЛ в полярных регионах. Таким образом, при определении сплочённости ледяного покрова показана возможность интеграции характеристик различных радиометров. Поскольку

в данном исследовании выполнялся анализ только для одного года, а распределение сплочённости льда меняется год от года, то в будущем необходимо рассмотреть другие временные промежутки и проверить эффективность нового метода на них. Также для проверки регионального влияния на распределение сплочённости льда важно протестировать новый метод в других акваториях.

Использование комбинированных данных позволит более эффективно определять ледовые условия, снижая риски для судов, оптимизируя маршруты и повышая безопасность навигации в сложных арктических условиях.

Работа выполнена при поддержке темы «Мониторинг» (гос. регистрация № 122042500031-8) (Тихонов В. В., Соколова Ю. В., Катамадзе Д.Р). Создание архива данных ААНИИ и получение по ним данных о сплочённости льда выполнялось в рамках НИТР 5.1 Росгидромета на 2025–2029 гг. «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты, процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики» (Алексеева Т. А. Афанасьева Е. В.) Получение и обработка данных радиометра MIRAS спутника SMOS выполнено при поддержке темы «Природные и природно-хозяйственные системы Сибири в условиях современных вызовов: диагностика состояний, адаптивные возможности, потенциал экосистемных услуг» (госзадание № FUFZ-2021-0007) (Хвостов И. В., Романов А. Н.).

ЛИТЕРАТУРА

Алексеева Т. А., *Соколова Ю. В.*, *Тихонов В. В. и др.* (2021а) Анализ областей морского льда в Северном Ледовитом океане, неопределяемых алгоритмом ASI по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 6. С. 22–38. DOI: 10.31857/S0205961421060026.

Алексеева Т. А., *Фролов С. В.*, *Федяков В. Е. и др.* (2021б) Анализ ледовых условий круглогодичного плавания судов ледового класса Arc7 в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 236–248. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-236-248.

Алексеева Т. А., *Соколова Ю. В.*, *Афанасьева Е. В. и др.* Влияние загрязненности морского льда на ошибки в определении сплоченности в период таяния по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 5. С. 30–46. https://doi.org/10.31857/S0205961422050037.

Афанасьева Е. В., *Алексеева Т. А.*, *Соколова Ю. В. и др.* Методика составления ледовых карт ААНИИ // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 5–20. DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10071.

Афанасьева Е. В., *Сероветников С. С.*, *Алексеева Т. А. и др.* Применение данных судового телевизионного комплекса в оперативном гидрометеорологическом обеспечении морской деятельности на примере картирования толщины ледяного покрова в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 96–117. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117.

Ермаков Д. М., *Кузьмин А. В.*, *Тихонов В. В. и др.* Данные микроволновых радиометрических измерений комплексных подспутниковых наблюдений морского льда с атомного ледокола «Ямал» в мае 2024 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 275–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-275-287.

Кутуза Б. Г., *Яковлев О. И.*, *Данилычев М. И.* Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД. 2016. 336 с.

Миронов Е. У., *Калячкин С. В.*, *Макаров Е. И. и др.* Особенности ледовых процессов в осенний период 2021 г. в морях Российской Арктики и оценка оправдываемости ледовых

прогнозов // Российская Арктика. 2021. № 15. С. 40–53. DOI: 10.24412/2658-4255-2021-4-40-53.

Мохов И. И. Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 4. С. 446–462. DOI : https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.

Наблюдения за ледовой обстановкой: учеб. пособие / под ред. Миронова Е. У. СПб.: ААНИИ, 2009. 360 с.

Производство специальных судовых ледовых наблюдений / под ред. Алексеевой Т. А. СПб.: ААНИИ, 2025. 47 с. https://data.aari.ru/publicat/publicat/monografii/Alexeeva_150525_LO.pdf.

Семенов В. А., *Мартин Т.*, *Беренс Л. К. и др.* Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей CMIP3 и CMIP5 // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 77–107. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107.

Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / под ред. В. Г. Смирнова. СПб.: ААНИИ, 2011. 240 с.

Тихонов В. В., *Раев М. Д.*, *Шарков Е. А. и др.* Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов: Обзор // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 4. С. 65–84. DOI: 10.7868/S0205961416040072.

Тихонов В. В., *Хвостов И. В.*, *Романов А. Н. и др.* Особенности собственного излучения Обской губы в L-диапазоне в период ледостава // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 3. С. 59–76. DOI: 10.31857/ S0205961420030070.

Тихонов В. В., *Алексеева Т. А.*, *Афанасьева Е. В. и др.* О возможности определения сплочённости ледяного покрова арктических морей по данным спутника SMOS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 329–335. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-329-335.

Тихонов В. В., *Катамадзе Д. Р.*, *Алексеева Т. А. и др.* Анализ сплочённости ледяного покрова в Карском море по данным радиометра MIRAS спутника SMOS с использованием методов машинного обучения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 344-355. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-344-355.

Флах П. Машинное обучение: Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2015. 400 с.

Ali Z. A., *Abduljabbar Z. H.*, *Tahir H. A. et al.* Exploring the power of eXtreme gradient boosting algorithm in machine learning: A review // Academic J. Nawroz University (AJNU). 2023. V. 12. No. 2. P. 320–334. DOI: 10.25007/ajnu.v12n2a1612.

Gutierrez A., *Castro R.*, *Vieira P.*, *Lopes G.*, *Barbosa J.* SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. DEIMOS Engenharia. Lisboa, Portugal, 2017. DOI: https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/SMOS-L1c-Data-Processing-Models.pdf.

Ivanova N. O., *Pedersen L. T.*, *Tonboe R. T. et al.* Satellite passive microwave measurements of sea ice concentration: an optimal algorithm and challenges // The Cryosphere Discussions. 2015. V. 9. P. 1296–1313. DOI: 10.5194/tcd-9-1269-2015.

Kerr Y. H., *Waldteufel P.*, *Wigneron J. P. et al.* The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // Proc. IEEE. 2010. V. 98. No. 5. P. 666–687. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043032.

Kern S., *Lavergne T.*, *Notz D. et al.* Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison: closed ice and ship-based observations // The Cryosphere. 2019. V. 13. No. 12. P. 3261–3307. https://doi.org/10.5194/tc-13-3261-2019.

Kern S., *Lavergne T.*, *Notz D.*, *Pedersen L. T.*, *Tonboe R.* Satellite passive microwave sea-ice concentration data set inter-comparison for Arctic summer conditions // The Cryosphere. 2020. V. 14. No. 7. P. 2469–2493. https://doi.org/10.5194/tc-14-2469-2020.

Kern S., *Lavergne T.*, *Pedersen L. T. et al.* Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison using Landsat data // The Cryosphere. 2022. V. 16. No. 1. P. 349–378. https://doi.org/10.5194/tc-16-349-2022.

Sahr K., *White D.*, *Kimerling A. J.* Geodesic Discrete Global Grid System // Cartography and Geographic Information Science. 2003. V. 30. No. 2. P. 121–134. DOI: 10.1559/152304003100011090.

Tikhonov V. V., *Boyarskii D. A.*, *Sharkov E. A. et al.* Microwave Model of Radiation from the Multilayer "Ocean atmosphere" System for Remote Sensing Studies of the Polar Regions // Progress in Electromagnetics Research B. 2014. V. 59. P. 123–133. DOI: 10.2528/PIERB14021706.

Tikhonov V., *Khvostov I.*, *Romanov A.*, *Sharkov E.* Theoretical study of ice cover phenology at large freshwater lakes based on SMOS MIRAS data // The Cryosphere. 2018. V. 12. No. 8. P. 2727–2740. https://doi.org/10.5194/tc-12-2727-2018.

WMO Sea-Ice Nomenclature. WMO-No. 259. V. 1: Terminology and codes. Geneva: WMO, 2017. 121 p.

USING MIRAS RADIOMETER DATA FROM THE SMOS SATELLITE TO ANALYZE OF SEA ICE CONCENTRATION IN THE RUSSIAN ARCTIC

***D. R. Katamadze*[1], *V. V. Tikhonov*[2,3,4], *T. A. Alekseeva*[4,2], *E. V. Afanasyeva*[4,2], *J. V. Sokolova*[2], *I. N. Khvostov*[3], *A. N. Romanov*[3]**

[1] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[2] Space Research Institute RAS, Moscow, Russia
[3] Institute for Water and Environmental SB RAS, Barnaul, Russia
[4] Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

The paper examines the possibility of using data from the SMOS satellite's low-frequency MIRAS radiometer to adjust data from current algorithms used to determine Arctic sea ice concentration. The studies show the potential of using machine learning and low-frequency satellite radiometer data to assess the state of the Arctic sea ice cover.

Keywords: sea ice concentration, SMOS, MIRAS, brightness temperature, machine learning models

Katamadze Diana Ruslanovna — magister, DianaKatamadze@mail.ru
Tikhonov Vasiliy Vladimirovich — head of laboratory, leading researcher, candidate of physical and mathematical sciences, vtikhonov@asp.iki.rssi.ru
Alekseeva Tatiana Alekseevna — head of laboratory, candidate of geographic sciences, taa@aari.ru
Afanasyeva Ekaterina Vasilievna — researcher, afanasieva@aari.ru
Sokolova Julia Vadimovna — junior research, JuuuliiieeeS@yandex.ru
Khvostov Ilya Vladimirovich — senior researcher, candidate of technical sciences, nii82@mail.ru
Romanov Andrey Nikolaevich — head of laboratory, doctor of technical sciences, associate professor, romanov_alt@mail.ru

УДК 528.8 DOI: 10.21046/KMU-2025-180-193

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ КОНСТАНТИНОВСКОГО РАЙОНА АМУРСКОЙ ОБЛАСТИ

Н. В. Кирьяков, Н. В. Бельмач

Дальневосточный государственный аграрный университет
Благовещенск, Россия

Исследование направлено на применение данных дистанционного зондирования Земли для выполнения задач по мониторингу сельскохозяйственных земель; для примера был взят муниципальный район Константиновской Амурской области. Проанализированы методы спутникового мониторинга с использованием космических аппаратов Sentinel-2A и Sentinel-2B с применением геоинформационного сервиса «Вега». Представленные в работе исследования являются результатом обработки спутниковых изображений за 2022 по 2024 г.; обнаружены нарушения научно-обоснованного севооборота, выявлено выращивание монокультуры соя. Исследование подтверждает эффективность применения данных дистанционного зондирования Земли для контроля землепользованием сельскохозяйственных угодий.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, спутниковый мониторинг, сельскохозяйственные земли, Sentinel-2, геоинформационный сервис «Вега», Амурская область

ВВЕДЕНИЕ

Применение технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет на расстоянии, без физического взаимодействия проанализировать объекты или область объектов. Для сельскохозяйственной отрасти применение спутниковых технологий даёт доступ к базе данных изображений дистанционного зондирования, получаемых в режиме, приближенном к реальному времени; такие данные возможно обрабатывать в специализированном программном продукте, предоставляющем возможность просмотра данных высокого пространственного разрешения от космических аппаратов (КА), применяемых в сельском хозяйстве. На сегодняшний день методы, используемые в дистанционном зондировании Земли, дают возможность для мониторинга и анализа использования земель сельскохозяйственного назначения, роста сельскохозяйственных культур, изменений в почве, картирования и контроля над состоянием водных ресурсов, прогнозирования погодных условий и многого другого.

Цель исследований — проанализировать современное использование сельскохозяйственных угодий по данным космических наблюдений в границах Константиновского муниципального района Амурской области.

Задачи исследований:

1) рассмотреть особенности использования методов космического мониторинга в сфере земельно-имущественных отношений;
2) изучить современное использование посевных площадей в границах Константиновского муниципального района Амурской области;
3) дать анализ эффективности использования методов дистанционного зондирования Земли.

Кирьяков Никита Владимирович — сотрудник центра искусственного интеллекта Дальневосточного ГАУ, бакалавр, platenumgeo@gmail.com
Бельмач Наталья Викторовна — доцент кафедры геодезии и землеустройства, кандидат сельскохозяйственных наук

Научная новизна: впервые на территории Амурской области изучено современное использование сельскохозяйственных угодий с применением ДЗЗ, представлены рекомендации применения дешифровочных признаков, необходимые для распознавания сельскохозяйственных культур.

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Значение спутниковых технологий

Для Дальневосточного федерального округа Амурская область является ключевым сельскохозяйственным регионом, включающим в себя более 1,3 млн га сельскохозяйственных угодий по данным ДЗЗ за 2024 г., что явно больше по сравнению со всеми остальными субъектами федерального округа. Развитие агропромышленной отрасли в области с использованием данных ДЗЗ позволит установить контроль над состоянием земель сельскохозяйственного назначения.

В сельском хозяйстве применение спутниковых технологий помимо развития агропромышленной отрасли предоставит и фундамент для изучения определённых научных тематик и их использования в практическом аспекте.

Дистанционное зондирование Земли в сравнении с полевыми обследованиями может отличаться лишь глобальностью, но существовать отдельно от полевой работы не сможет, так как достоверность получаемых спутниковых изображений требует грамотного подтверждения наличия той или иной характеристики по месту пребывания.

Согласно Указу Президента России «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 07.05.2018 г., ставится задача модернизации ряда отраслей производства, включая и сельское хозяйство, с помощью последовательного внедрения цифровых технологий.

Современные методы космической съёмки позволяют проводить охватывать большие площади, повышать качественные и количественные параметры результатов съёмки. В связи с этим возникает вопрос, как наилучшим образом использовать потенциал материалов многозональной космической съёмки. Результаты космической съёмки с искусственных спутников Земли даст возможность в отслеживании динамики растительности, оценки климатических изменений и ряда многих других показателей (Хабаров, 2022).

Спутники и их технические характеристики

Для решения ряда сельскохозяйственных задач при помощи спутниковых технологий используются определённые миссии космических агентств.

Самым распространённой является миссия Sentinel от Европейского космического агентства. Сама миссия разнообразна, но для решения сельскохозяйственных задач используют спутники Sentinel-2A и Sentinel-2B, они оснащаются оптико-электронными мультиспектральными сенсорами для съёмок в пространственном разрешении от 10 до 60 м в видимом, инфракрасном коротковолновом и ближнем NIR (*англ.* Near Infrared Range) спектрах; всего съёмочная аппаратура спутника включает в себя 13 спектральных каналов, что даёт возможность работы с растительностью и с текущими, и с архивными долговременными снимками. Текущая орбита космических аппаратов солнечно-синхронная, что позволяет проводить повторную съёмку два-три раза в день, а то и реже в зависимости нахождения объекта на поверхности Земли.

Спутники Sentinel-2A и Sentinel-2B предоставляют данные по земельным ресурсам, сельскому хозяйству и лесному хозяйству, но и позволяют проводить мониторинг погодных условий. Миссия в данный момент актуальна и популярна

в использовании спутниковых технологий для решения различных задач, так как космические аппараты Sentinel позволяют проводить съёмку больших территорий, поскольку съёмка местности повторяется раз в два-три дня, что обеспечивает полное покрытие всей Земли многоспектральными изображениями. Технические характеристики космических аппаратов и их съёмочной аппаратуры приведены в табл. 1 и 2 (Свиридова, 2022).

Таблица 1. Технические характеристики КА Sentinel-2A и Sentinel-2B

Наименование КА	Sentinel-2A и Sentinel-2B
Разработчики	EADS Astrium Satellites (Франция)
Оператор	Европейское космическое агентство
Ракета-носитель	Vega (Франция)
Дата запуска	23 июня 2015 г. — Sentinel-2A 7 марта 2017 г. — Sentinel-2B
Орбита: • высота • наклонение	Солнечно-синхронная • 786 км • 98,5°
Масса КА	1200 кг
Расчётный срок функционирования	7 лет

Таблица 2. Технические характеристики съёмочной аппаратуры Sentinel-2A и Sentinel-2B

Режим съёмки	Моно		
Спектральные диапазоны, мкм	0,490	0,705	0,443
	0,560	0,740	0,945
	0,665	0,783	1,375
	0,842	0,865	
		1,610	
		2,190	
Пространственное разрешение, м	10	20	60

Помимо миссии Sentinel используется и миссия Landsat, проводимая космическим агентством NASA, США уже порядка более 50 лет. Ещё берутся данные сенсора MODIS (*англ.* Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) и группы спутников PlanetScope (продукт DOVE), обладающие различными техническими характеристиками, а также другой съёмочной аппаратуры для применения в крупномасштабном мониторинге различных задач.

Применение сервиса «Вега» для сельскохозяйственного мониторинга

В современных условиях для выявления неиспользуемых и нерационально используемых земель сельскохозяйственного назначения в землеустроительной деятельности необходимо привлечение в качестве исходной информации данные ДЗЗ. Получение данных ДЗЗ из космоса регулируется Законом РФ от 20.08.1993 № 5663-1 «О космической деятельности» (с изменениями и дополнениями), в соответствии с которым государство обеспечивает создание и ведение федерально-

го фонда данных ДЗЗ, получаемых с государственных космических аппаратов, либо закупаемых за счёт средств федерального бюджета (https://docs.cntd.ru/document/9033683/).

Одним из сервисов мониторинга сельскохозяйственных угодий является «Вега» (http://pro-vega.ru/). Данный сервис служит основой профессиональной работы со спутниковыми данными, он создан для анализа растительности и оперативного мониторинга с возможностью работы с долговременными, оперативными и высококачественными спутниковыми изображениями на территории всей Российской Федерации и отдельных регионов мира (рис. 1). Сервис «Вега» разработан в Институте космических исследований РАН, в его основу заложены многолетние разработки института по автоматическому сбору, архивации, обработки и распространению данных.

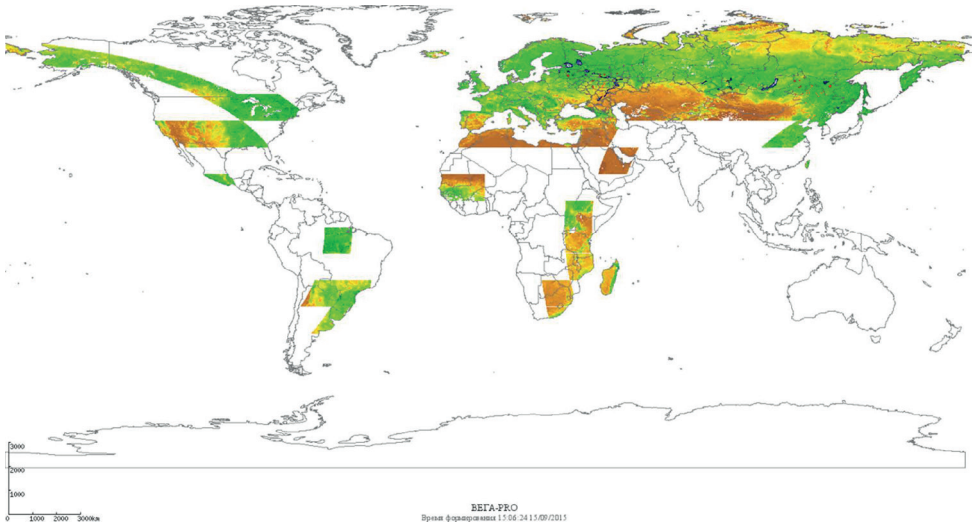


Рис. 1. Текущая зона интереса сервиса «Вега»

В рамках настоящего исследования сервис «Вега» использовался:

1) для получения архивных и актуальных данных со спутников Sentinel-2A и Sentinel-2B;
2) проведения корректировки векторного слоя сельскохозяйственных угодий на территории всей Амурской области;
3) просмотра композитных снимков нормализованного относительного индекса растительности NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и многовременных цветосинтезированных изображений;
4) определения по дешифровочным признакам сельскохозяйственных культур, применяемых только для Амурской области;
5) мониторинга изменений землепользования с 2022 по 2024 г.

После получения спутниковых изображений Sentinel-2A и Sentinel-2B в течение проведения сельскохозяйственных работ на пахотных участках Амурской области проводится актуализация или корректировка векторного слоя сельскохозяйственных угодий. Так, с начала 2024 г. в Дальневосточном ГАУ совместно с ИКИ РАН, в рамках выполнения работ для Министерства сельского хозяйства Амурской области, выполняется актуализация контуров сельскохозяйственных полей и дальнейшее распознавание на них сельскохозяйственных культур (рис. 2 и 3).

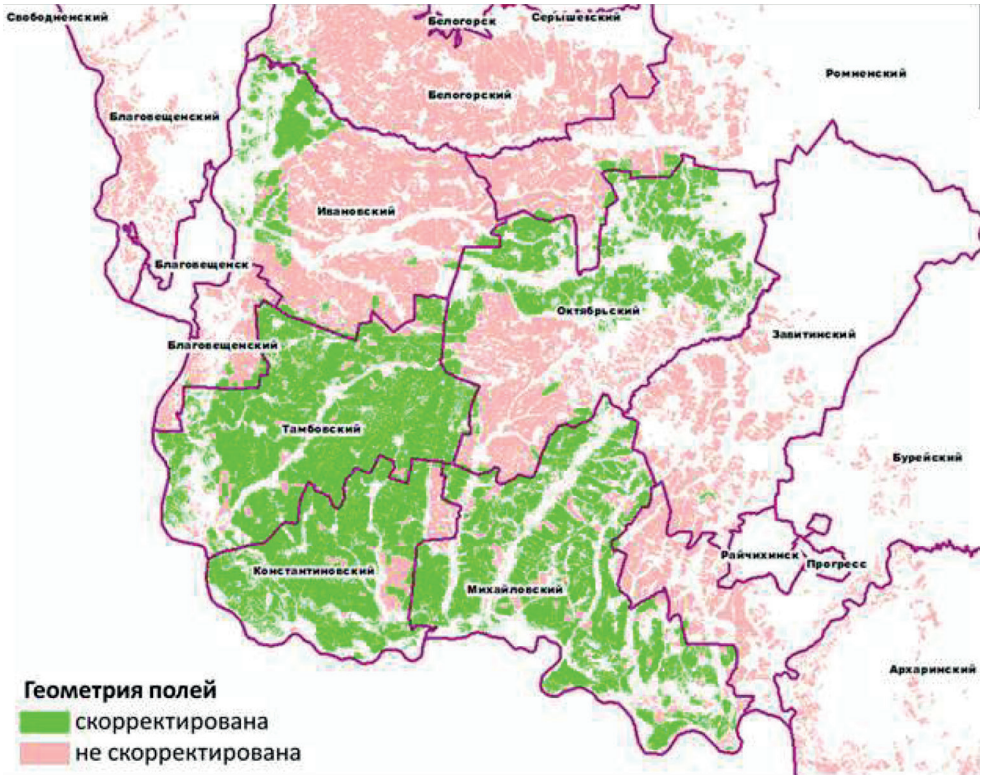


Рис. 2. Ход проведения актуализации векторного слоя за 2024 г.

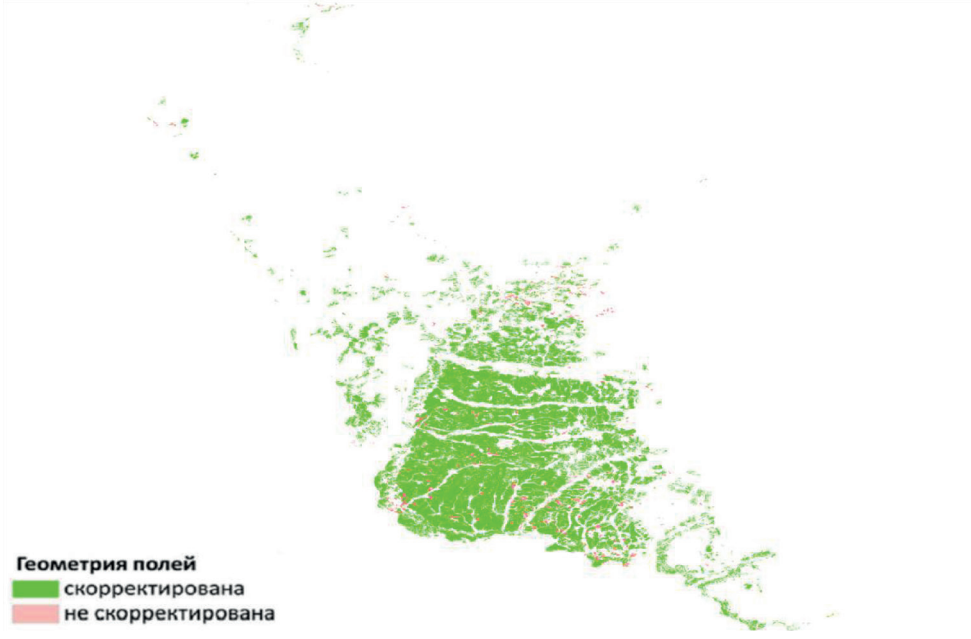


Рис. 3. Актуализированная карта земель сельскохозяйственного назначения в границах Амурской области за 2024 г.

В настоящее время актуализированы все пахотные земли в границах Амурской области. Началом исследований послужили земли южных районов области, относящиеся к одним из самых плодородных: Тамбовский муниципальный округ, Константиновский и Михайловский муниципальные районы.

По результатам проведённых работ, в соответствии с заданием Министерства сельского хозяйства Амурской области, с применением данных дистанционного зондирования Земли за 2024 г. площадь сельскохозяйственных угодий после актуализации составила 1 322 025,7 га. По результатам, полученным ИКИ РАН в 2023 г., площадь сельскохозяйственных угодий составляла 1 311 220,01 га, что на 0,8 % меньше, чем в 2024 г. В сравнении с данными Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Амурской области, всего на полях области под сельскохозяйственными культурами занято 1 142 736,9 га, по данным ДЗЗ за 2024 г. это составляет 1 160 134,0 га, что отличается на 17 397,1 га, или +1,5 % больше по данным ДЗЗ. Актуализация сельскохозяйственных угодий проводится каждый год, в 2025 г. такая работа продолжится.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Данные дистанционного зондирования Земли

Для проведения исследования на предмет рационального использования сельскохозяйственных угодий с 2022 по 2024 г. были отобраны спутниковые изображения с космических аппаратов Sentinel-2A и Sentinel-2B и экспортированные из сервиса «Вега».

Основные требования для отбора данных дистанционного зондирования Земли включают критерии:

1) доля облачности на спутниковых изображениях (в %);
2) летний период проведения спутниковой съёмки, преимущественно в периоды вегетации сельскохозяйственных культур;
3) смешивание в ходе работы композитных и многовременных цветосинтезированных изображений с пространственным разрешением 10 м и полосой захвата в 290 км.

Для обработки полученных спутниковых изображений используется специализированное программное обеспечение для геоинформационной обработки, доступное в бесплатном доступе всем желающим.

Геоинформационное программное обеспечение QGIS (*англ.* Quantum GIS) предназначено для управления данными, отображения, редактирования и анализа с целью решения различных задач и создания карт-планов. Геоинформационная система ГИС является свободным программным обеспечением и очень интуитивно понятна для рядового пользователя. Помимо самого программного обеспечения, на основе ГИС создаются различные модули для упрощения работы пользователей; сами модули разрабатывают такие же пользователи ГИС-платформы и загружают их в специализированный менеджер модулей для возможного распространения среди всех пользователей программы.

Обработка полученных изображений

Космические аппараты Sentinel-2A и Sentinel-2B имеют аппаратуру MSI (*англ.* Multispectral Instrument). Мультиспектральная аппаратура на борту этих спутников позволяет снимать поверхность Земли в широкополосном и высокоразрешенном (до 10 м) изображении. Огромный набор спектральных каналов позволяет применять эту аппаратуру в решении различных задач, включая мониторинг сельскохозяйственной деятельности, водных и лесных ресурсов, а также

наблюдения за прибрежными ресурсами (https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/sentinel-2-msi). Полученные изображения имеют различные характеристики, позволяющие произвести синтезирование спутниковых изображений для построения карты NDVI, RGB-изображений (Red — красный, Green —зелёный, Blue — синий) и многого другого. Так, к примеру, для синтезирования изображения в RGB-формат потребуются каналы 4, 3, 2 или 12, 8 и 4 (рис. 4). Само синтезирование изображения обеспечивает возможность разделять разные или одинаковые объекты с различными свойствами.

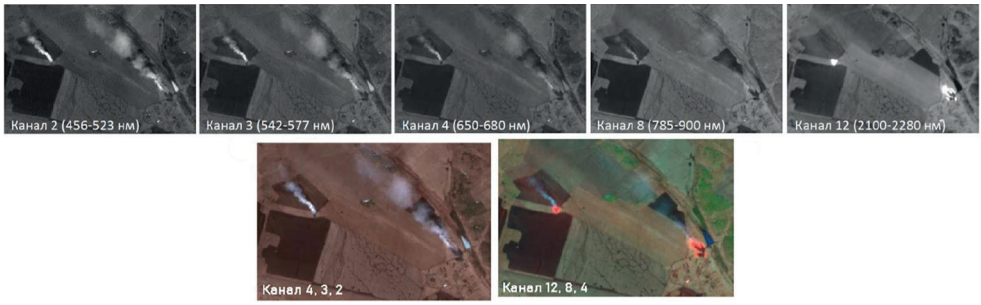


Рис. 4. RGB-изображения после синтеза

Для построения карты NDVI используется индекс вегетации, получаемый с помощью излучения растительности и результатов математических операций с данными дистанционного зондирования Земли. Индекс вегетации можно получить по формуле NDVI: NDVI = (NIR – Red)/(NIR + Red).

Для решения формулы NDVI используются спектральные каналы 4 и 8 космического аппарата Sentinel-2A и Sentinel-2B (рис. 5).

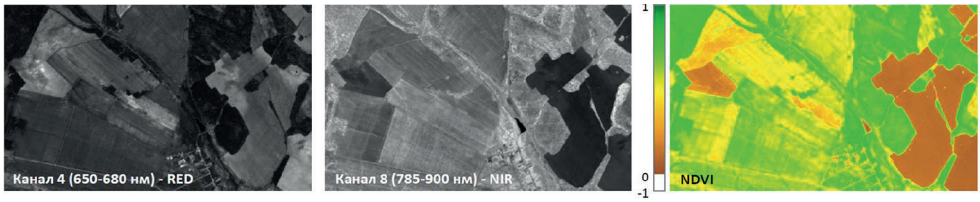


Рис. 5. Синтез каналов для вегетационного индекса NDVI

Вегетационный индекс определяется по принципу отражения. В зависимости от сельскохозяйственной культуры и её состояния изменяется отражательная способность. Сам индекс определяется в рамках от 0 до 1: значение индекса 0–0,15 означает вспаханную почву; индекс от 0,15 до 0,3 — начало вегетации культуры; от 0,3 до 0,5 — набор зелёной массы; индекс от 0,5 и выше (но не более 1,0) означает нормальное развитие растений (http://esamutimedia.esa.int/docs/EarthObservation/Sentinel-2_ESA_ Buletin16 1.pdf).

Дешифрирование сельскохозяйственных культур

В ходе работы для Министерства сельского хозяйства Амурской области по актуализации векторного слоя проведена работа по определению дешифровочных признаков основных сельскохозяйственных культур Амурской области, из них: соя (рис. 6), кукуруза (рис. 7), картофель (рис. 8).

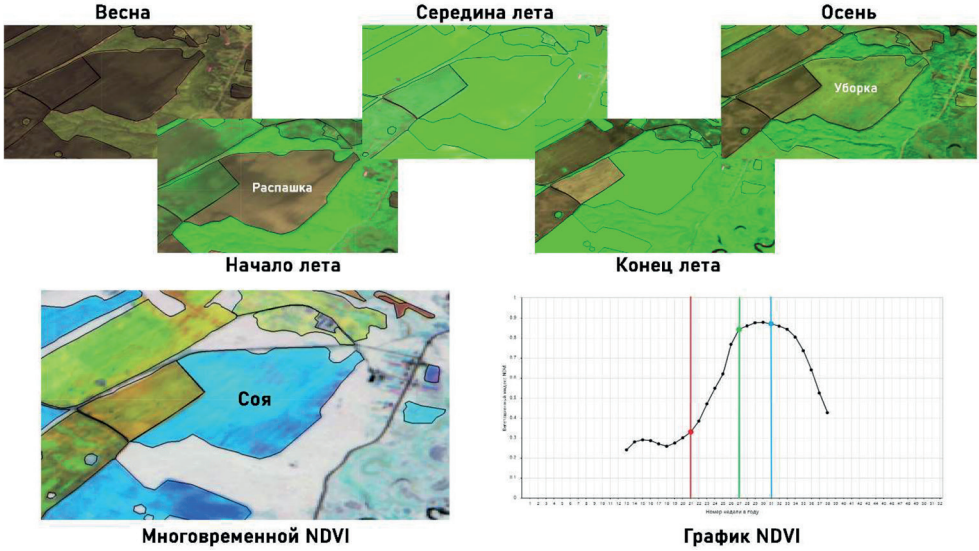


Рис. 6. Признаки дешифровки сои

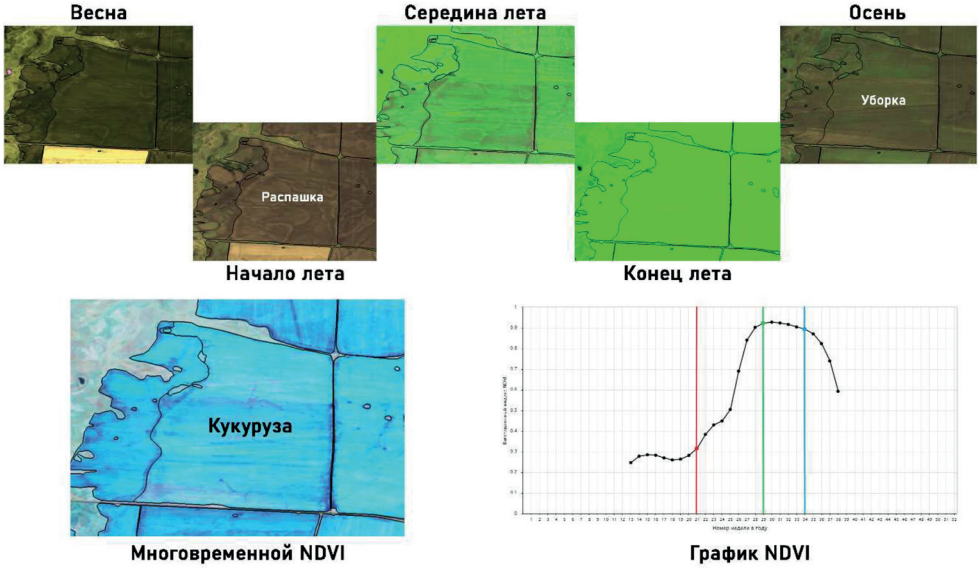


Рис. 7. Признаки дешифровки кукурузы

Для получения признаков дешифрования использовались спутниковые изображения, многовременные композитные цветосинтезированные изображения, полученные с сервиса «Вега», и с помощью сервиса составленный график хода NDVI по сельскохозяйственной культуре.

Полученные в результате работы признаки дешифрования сельскохозяйственных культур — сои, кукурузы и картофеля, определяют ряд характеристик, полученных по данным дистанционного зондирования Земли. Данные признаки указывают на периоды распашки, их посева, набора зелёной массы и сбора этой

культуры. По многовременным композитным цветосинтезированным изображениям культуры имеют разные NDVI, что является уникальным для той или иной сельскохозяйственной культуры.

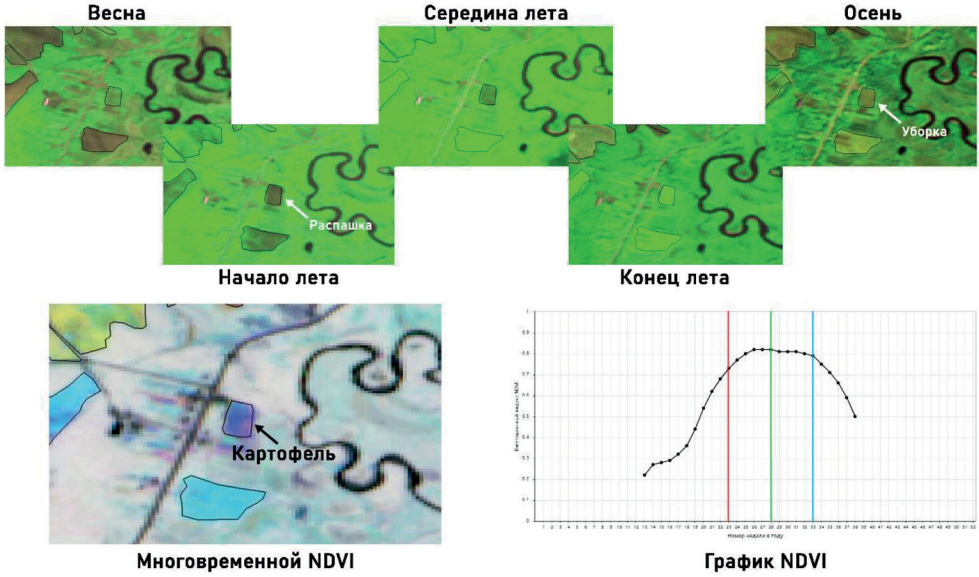


Рис. 8. Признаки дешифровки картофеля

По этим признакам в целях проведённого исследования были определены сельскохозяйственные культуры по спутниковым изображениям с 2022 по 2024 г. с целью проверки на соблюдение рационального использования земель сельскохозяйственного назначения Константиновского района Амурской области.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика сельскохозяйственного землепользования района

Полученные данные ДЗЗ помогли сформировать карты использования земель сельскохозяйственного назначения. Проанализировав данные по Константиновскому району Амурской области с 2022 по 2024 г. выяснилось, что в структуре посевных площадей основной сельскохозяйственной культурой является соя. Результаты анализа приведены на рис. 9–11.

Проанализировав сформированное изображение выясняется, что преимущественной культурой в 2022 г. является соя, расположенная на площади в 93,63 тыс. га, что составляет 78,3 % от общей посевной площади.

Анализ 2023 г. выявил, что основной сельскохозяйственной культурой является соя, расположенная на площади в 86,68 тыс. га. В 2024 г. основной культурой также оказалась соя, которая расположилась на площади в 82,94 тыс. га. Для сравнения данных по площадям за три года, составлена табл. 3.

По результатам сформированной табл. 3 видно, что в 2022 г. площадь сои расположена на 93,63 тыс. га, а в 2023 г. — на 86,68 тыс. га, что меньше на 6,95 тыс. га, или на 7,4 %.

Таблица 3. Посевные площади сои Константиновского района за три года

Год	Площадь, тыс. га	Соотношение к годам, %
2022	93,63	0
2023	86,68	–7,4
2024	82,94	–4,3



Рис. 9. Многовременное композитное цветосинтезированное изображение района за 2022 г.

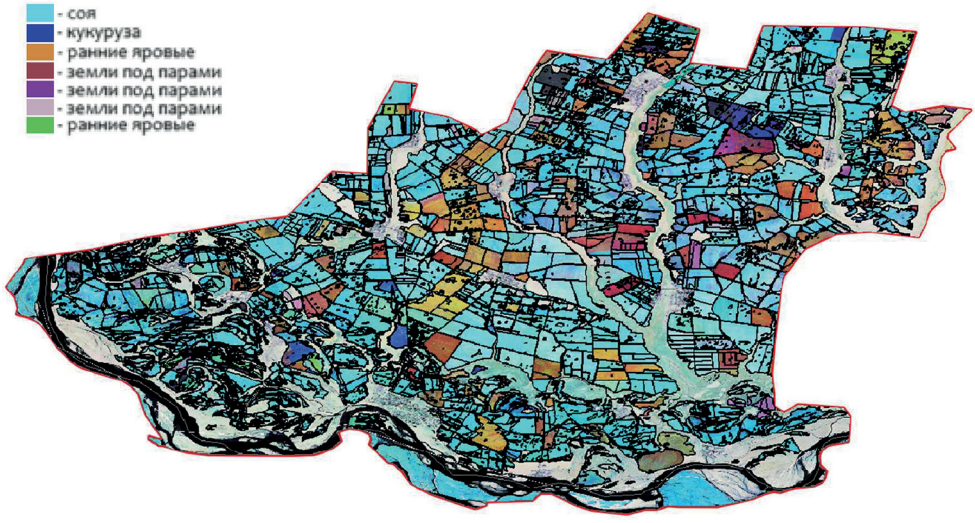


Рис. 10. Многовременное композитное цветосинтезированное изображение района за 2023 г.



Рис. 11. Многовременное композитное цветосинтезированное изображение района за 2024 г.

В 2023 г. площадь сои расположена на 86,68 тыс. га, а в 2024 г. — на 82,94 тыс. га, что меньше на 3,74 тыс. га, или на 4,3 %.

По данным мониторинга с применением данных ДЗЗ установлено, что общая площадь пашни составляет 114,21 тыс. га. Проанализировав информацию с 2022 по 2024 г. видно, что за три года площадь сои уменьшилась на 10,69 тыс. га или на 11,4 %.

Анализ структуры посевных площадей

Установлено, что на территории Амурской области основной сельскохозяйственной культурой является соя, это обусловлено востребованностью данной культуры, и, как следствие, высокой стоимостью. В структуре посевных площадей Амурской области соя занимает более 70 % (табл. 4). В соответствии с системой земледелия рекомендуемая и научно-обоснованная доля посевов сои должна составлять 45–50 % (Хабаров, 2022).

Таблица 4. Структура посевных площадей Константиновского района за три года

Наименование культуры	Посевные площади					
	2022 г.		2023 г.		2024 г.	
	тыс. га	%	тыс. га	%	тыс. га	%
Неиспользуемые земли	5,99	5,0	0,21	0,2	0,14	0,1
Земли под паром	5,14	4,3	4,62	4,0	8,43	7,4
Ранние яровые культуры	12,66	10,6	19,31	16,8	18,06	15,8
Поздние яровые культуры	0	0	0,76	0,7	0,21	0,2
Многолетние травы	0	0	1,62	1,4	1,81	1,6
Соя	93,63	78,3	86,68	75,4	82,94	72,6
Кукуруза	2,13	1,8	1,79	1,5	2,62	2,3
Суммарно	119,56	100,0	115,01	100,0	114,21	100,0

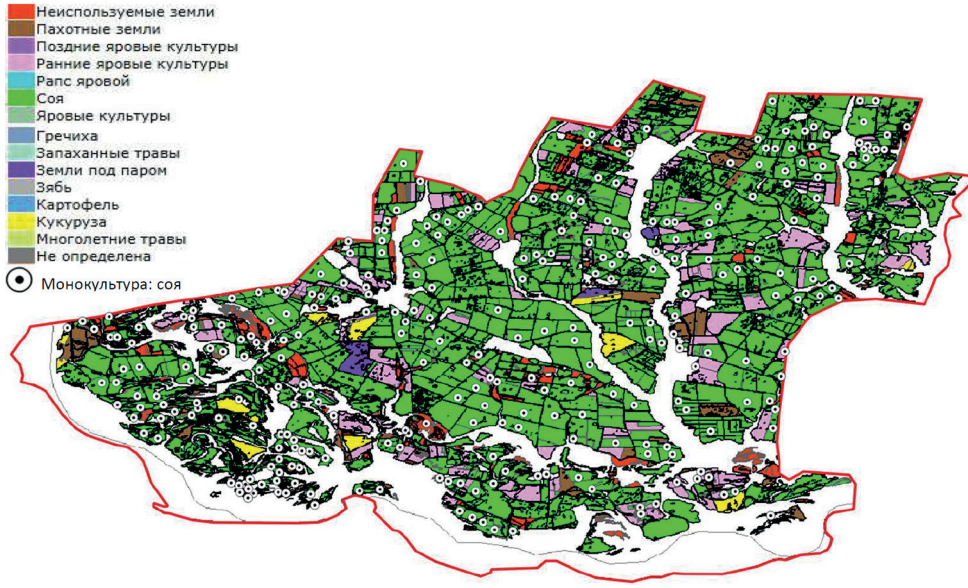


Рис. 12. Сельскохозяйственные культуры района за 2022 г.

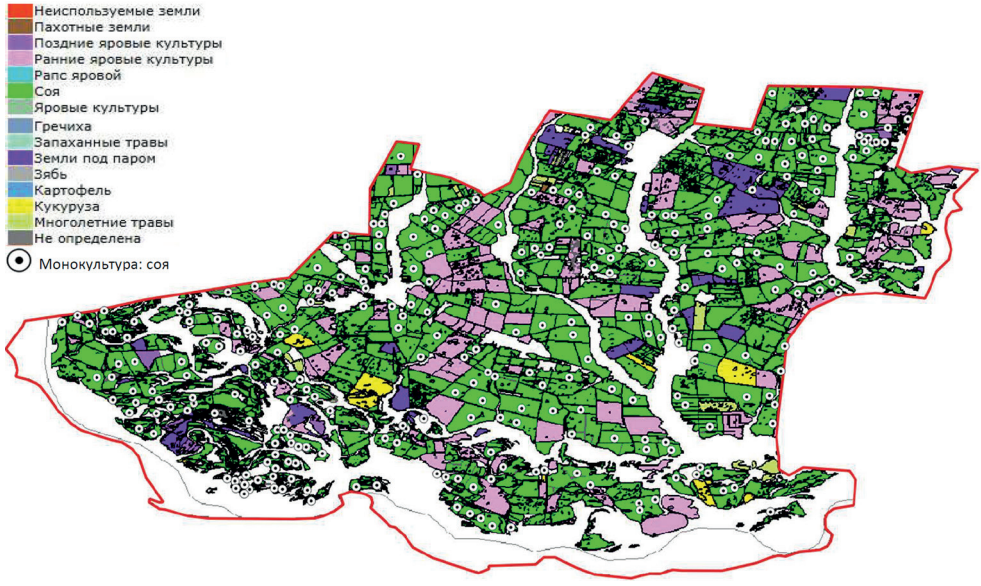


Рис. 13. Сельскохозяйственные культуры района за 2023 г.

В исследовании проведён спутниковый мониторинг пахотных угодий с применением таких дешифровочных признаков, как значение индекса NDVI и многовременные композитные цветосинтезированные изображения полей, исследована структура посевных площадей на территории Константиновского района Амурской области в период с 2022 по 2024 г. Выявлено, что на 289 полях общей площадью 37 412,02 га обнаружено повторение за три года возделывание сои, что недопустимо (рис. 12–14). Такое частое повторение культуры нарушает правила

рационального использования земель сельскохозяйственного назначения, утверждённые постановлением Правительства Амурской области от 20.11.2020 № 783 (https://amur-gov.ru/doc/98360).

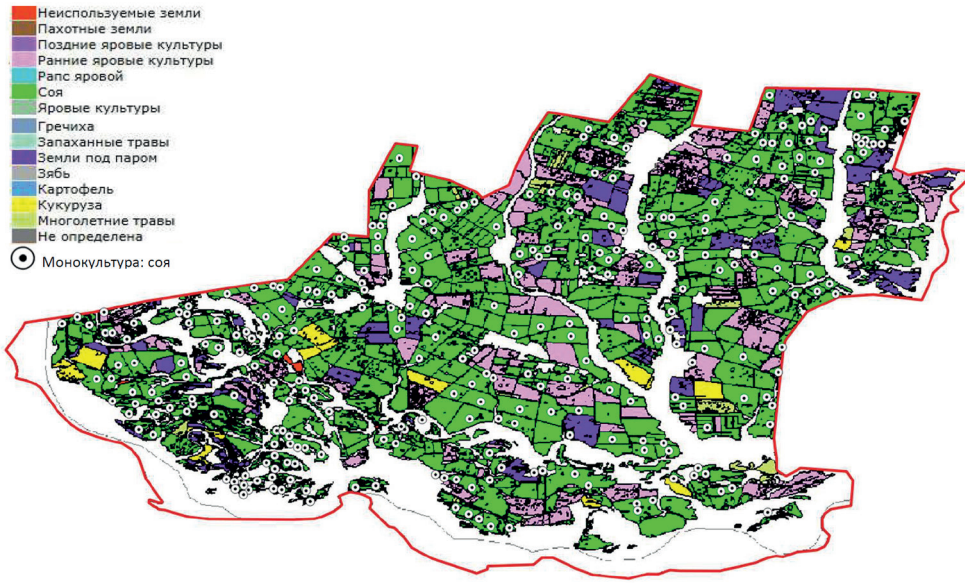


Рис. 14. Сельскохозяйственные культуры района за 2024 г.

Нарушение правил по рациональному использованию земель сельскохозяйственного назначения может привести к изменениям питательных веществ, содержащихся в почвах, сокращается продуктивность угодий. В этой области проведены разнообразные исследования, так, к примеру, по проведённому в США, штат Иллинойс исследованию при нарушении севооборота по схеме культур соя-соя-соя, запасы органических веществ в почве снижается, особенно общее содержание азота. Такое же исследование было проведено в Китае, провинция Аньхой, что подтверждает проведённую работу в США. Полученная информация об эффективности использования севооборота даёт понимание для оценки изменения органических веществ в почвах (https://encyclopedia.pub/entry/23619).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование спутникового мониторинга для сельскохозяйственного контроля за рациональным использованием земель подтвердило свою эффективность в ходе исследования. Данные от спутников Sentinel-2A и Sentinel-2B позволяют дистанционно проводить оценку состояния сельскохозяйственных угодий, контролировать соблюдение научно-обоснованного чередования сельскохозяйственных культур, анализировать получаемые данные и сравнивать их с фактическим состоянием.

Применение программного обеспечения QGIS и сервиса «Вега» упрощают во многом работу с данными дистанционного зондирования Земли. Через сервис «Вега» возможен заказ спутниковых снимков во всех 13 спектральных каналах и в дальнейшем проводить работу через QGIS для получения нужной информации и решения поставленной задачи.

В результате исследований с применением методов ДЗЗ выявлены многократные случаи использования сои как монокультуры, тем самым не соблюдая научно-обоснованное чередование культур. В следствии этого было установлено, что в Константиновском районе отсутствует соблюдение севооборота.

В дальнейшем исследование по контролю состояния земель сельскохозяйственного назначения может предоставить более детальную классификацию сельскохозяйственных культур при использовании новых дешифровочных признаков тех самых культур и проводить сравнение с данными наземных обследований для повышения точности анализа.

ЛИТЕРАТУРА

Свиридова А. С. Общая характеристика снимков Sentinel-2 // https://studfile.net. 2022. https://studfile.net/preview/16536376/page:2/

Хабаров Д. А. Разработка методики выявления неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения по материалам разновременных многозональных космических съемок // Мониторинг. Наука и технологии. 2022. № 2(52). С. 44–53. DOI: 10.25714/MNT.2022.52.005. EDN: VBMUPE.

SATELLITE MONITORING OF AGRICULTURAL LAND USE IN THE KONSTANTINOVSKY DISTRICT OF THE AMUR REGION

N. V. Kiryakov, N. V. Belmach

Far Eastern State Agrarian University, Blagoveshchensk, Russia

The study is aimed at using Earth remote sensing data to perform tasks on monitoring agricultural lands, for example, the municipal district of Konstantinovskaya of the Amur region was taken. The methods of satellite monitoring using the Sentinel-2A and Sentinel-2B spacecraft with the use of the VEGA geoinformation service are analyzed. The studies presented in the paper are the result of processing satellite images for the period 2022 to 2024, violations of scientifically based crop rotation were identified, and the cultivation of a soybean monoculture was revealed. The study confirms the effectiveness of using Earth remote sensing data to monitor agricultural land use.

Keywords: Earth remote sensing, satellite monitoring, agricultural lands, Sentinel-2, VEGA geoinformation service, Amur Region

Kiryakov Nikita Vladimirovich — employee of the Artificial Intelligence Center, bachelor, platenumgeo@gmail.com

Belmach Natalia Viktorovna – associate professor of the Department of Geodesy and Land Management, candidate of agricultural sciences

УДК 551.501.86 DOI: 10.21046/KMU-2025-194-201

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ WRF-ARW

В. А. Клецова, О. Г. Анискина

Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается влияние городской застройки на точность численного прогноза метеорологических параметров с использованием модели WRF-ARW. Проведены численные эксперименты с параметризацией урбанизации BEP (*англ.* Building Effect Parameterization) для Санкт-Петербурга за январь 2015, 2020 и 2021 гг. Основное внимание уделено верификации температурных и ветровых профилей по радиозондовым данным станции Воейково. Выполнен анализ ошибок прогноза MAE и RMSE. Показано, что параметризация BEP улучшает воспроизведение температуры в приземном слое, особенно при устойчивых инверсиях.

Ключевые слова: урбанизация, численное моделирование, модель WRF-ARW, параметризация BEP, радиозонд, температурный профиль, верификация, RMSE, MAE

Урбанизация — один из ключевых факторов, влияющих на локальный климат. Рост плотности застройки и изменение характеристик подстилающей поверхности в городах нарушают естественные процессы тепло- и влагообмена в приземном слое атмосферы. Эти процессы влияют на формирование городского микроклимата и, в частности, на такие явления, как городской остров тепла, изменение ветрового режима и распределение осадков. Учёт этих эффектов особенно важен при численном моделировании погоды в мегаполисах (Bhautmage et al., 2022; Giannaros et al., 2018).

Моделирование выполнялось с использованием инструмента WRF-ARW (*англ.* Weather Research and Forecasting Model Advanced Research WRF) версии 4.0, поддерживающей вложенные сетки и высокое вертикальное разрешение (Chen et al., 2011; https://ral.ucar.edu/projects/WRF-urban).

Для достижения цели была выбрана расчётная область, включающая две сетки:

- материнская сетка: 100×200 узлов по горизонтали с шагом 6 км;
- вложенная сетка: 94×163 узла с шагом 2 км.

По вертикали область моделирования простиралась до изобарической поверхности 50 гПа и включала 35 уровней. Шаг по времени составил 30 с для материнской сетки и 10 с для вложенной.

Были заданы следующие параметризации физических процессов:

- длинноволновое излучение — RRTM (*англ.* Rapid Radiative Transfer Model) Longwave Scheme,
- коротковолновое излучение — Dudhia Shortwave Scheme,
- микрофизика — WRF Single-moment 3-class and 5-class Schemes,
- приземный слой — Revised MM5 (*англ.* Fifth-Generation Mesoscale Model) Surface Layer Scheme,
- подстилающая поверхность — Unified Noah Land Surface Model,
- пограничный слой — Yonsei University Scheme (YSU),
- конвекция — Kain-Fritsch Scheme.

Клецова Влада Александровна — магистр, vlada_melder@mail.ru
Анискина Ольга Георгиевна — заведующая кафедрой, доцент, кандидат физико-математических наук

Период моделирования — январь.

Начальные и граничные условия формировались из анализа модели GFS (*англ*. Global Forecasting System), с обновлением каждые 6 ч.

Проведены следующие численные эксперименты:

- без учёта урбанизации за 2010, 2015, 2020 и 2021 гг.;
- с учётом урбанизации (параметризации BEP, *англ*. Building Effect Parameterization) за 2015, 2020 и 2021 гг.

Для верификации результатов моделирования использовались радиозондовые профили станции Воейково (59,95° с. ш., 30,70° в. д.), доступные через сайт Университета Вайоминга (*англ*. University of Wyoming; https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding_legacy.html).

Для количественной оценки качества прогноза применялись метрики:

- Bias — средняя ошибка;
- MAE (*англ*. Mean Absolute Error) — средняя абсолютная ошибка;
- RMSE (*англ*. Root Mean Square Error, RMS Error) — среднеквадратическое отклонение ошибки.

Для системного анализа влияния городской застройки (на основе параметризации BEP) на ночные метеорологические поля была подготовлена серия ежемесячных карт — поля средней разности $\Delta X = X$(урб) $- X$(без урб), показывающие городской остров тепла.

Эти карты созданы для каждого января 2015, 2020, 2021 гг. в 00:00 UTC (*англ*. Coordinated Universal Time).

На рис. 1 представлено поле средней разности температуры $\Delta T = T_2$(урб) $- T_2$(без урб) за январь 2021 г.

В 2021 г. остров тепла более выражен по сравнению с другими годами. Разница температуры составляет около 4 °C. В то время как разница над прилегающей территорией остаётся небольшой (до ±0,6 °C). Присутствуют участки, где включение схемы урбанизации понизило температуру (см. рис. 1).

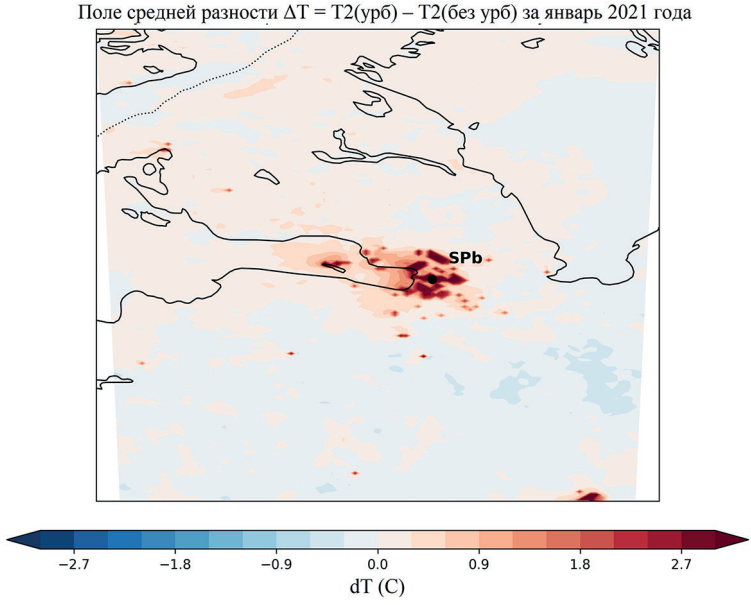


Рис. 1. Поле средней разности $\Delta T = T_2$(урб) $- T_2$(без урб) за январь 2021 г.

Анализ температурных профилей проводился с использованием данных радиозондирования. Поскольку точки, в которых проводилось зондирование, не совпадают с узлами сетки, то проводилась интерполяция методом ближайшего соседа по следующему алгоритму.

На расчётной сетке модели WRF-ARW вычислялась матрица расстояний от узлов до координат станции зондирования (59,95° с. ш., 30,70° в. д.) и выбиралась ближайшая ячейка, данные которой и использовались при сравнении с измеренными профилями метеорологических величин.

Была произведена верификация результатов моделирования по сравнению с радиозондовыми профилями температуры и ветра, позволяющие оценить точность модели по всему вертикальному столбу атмосферы для точки, соответствующей Воейково.

На рис. 2 представлены профили средней абсолютной ошибки (MAE) и среднеквадратического отклонения (RMSE) для каждого уровня модели, осреднённые по дням.

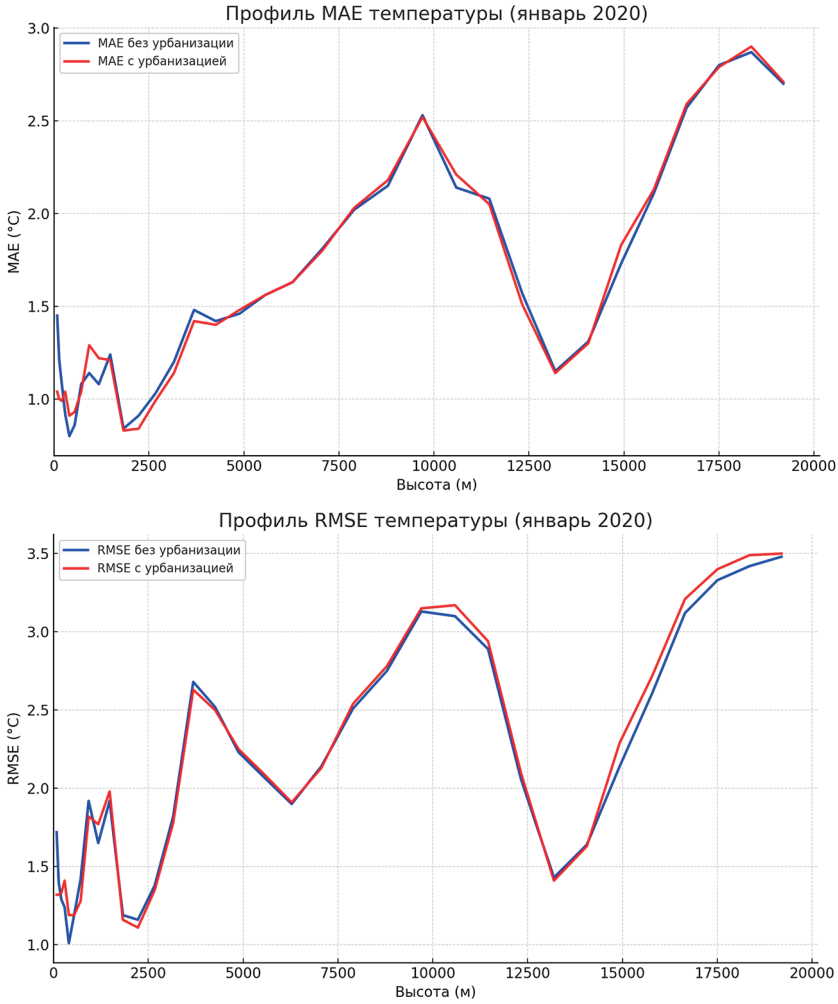


Рис. 2. Профили средней абсолютной ошибки (*сверху*) и среднеквадратического отклонения (*снизу*) (январь 2020 г.)

Ошибки распределяются по высоте схожим образом.

До высоты около 300 м модель лучше всего описывает температуру воздуха: MAE и RMSE не превышают 1 °C (см. рис. 2).

На высотах 0,5–1,0 км на рис. 2 наблюдается рост ошибок (до 1,5–1,8 °C). Причина этого роста — устойчивые зимние инверсии. Для иллюстрации были отобраны два характерных дня. На рис. 3 (*слева*) показан случай за 11 января в 00:00 ч, когда урбанизация сглаживает инверсию, а модель без урбанизации не воспроизводит инверсию вовсе. На рис. 3 (*справа*) представлены профили за 18 января в 00:00 ч, где урбанизация уже лучше описывает нижнюю инверсию, а базовая схема снова не показывает её.

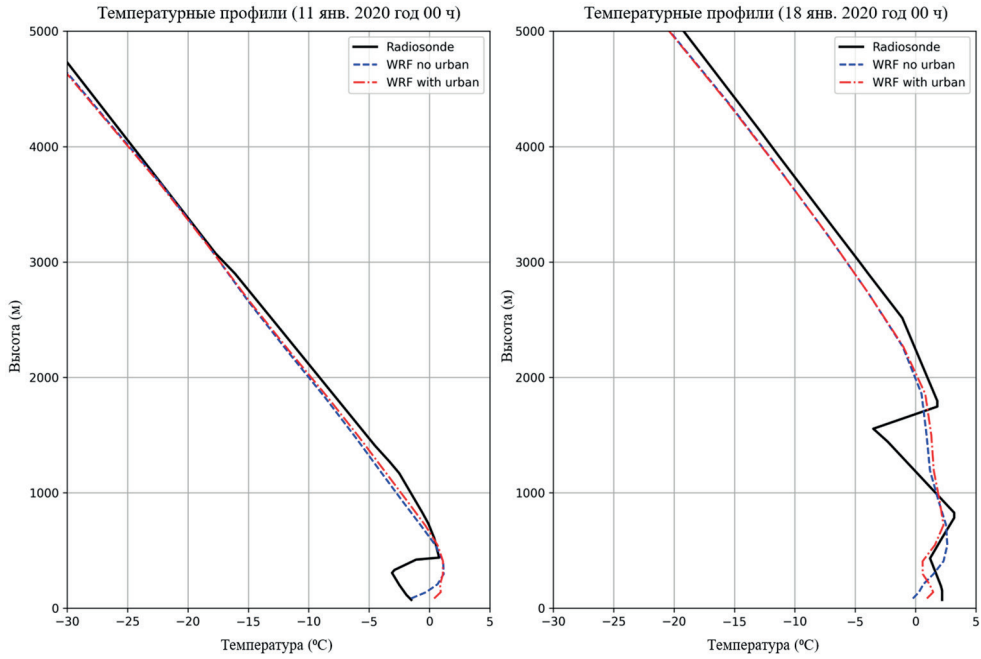


Рис. 3 — Профили температуры 11.01.2020, 00:00 ч (*слева*), 18.01.2020, 00:00 ч (*справа*)

В нижней тропосфере (1–3 км) ошибки снижаются до 1,3–1,6 °C. На этих высотах температуру воздуха определяет крупномасштабная динамика, а локальные процессы влияют меньше, поэтому обе конфигурации модели хорошо воспроизводят температуру (см. рис. 2).

Выше 5 км снова наблюдается рост ошибок, а ближе к тропопаузе (10–12 км) наблюдается их максимум: RMSE достигает более 3 °C. На этой высоте происходит резкий переход от тропосферного к стратосферному градиенту и любая неточность в определении положения тропопаузы резко увеличивает разницу между температурными профилями (см. рис. 2).

Снижение ошибок на высоте ~13–14 км обусловлено устойчивой динамикой нижней стратосферы, выше рост ошибок, вероятно, связан с влиянием стратосферного полярного вихря (см. рис. 2).

Итак, наилучшие результаты модель демонстрируют у поверхности, в слое 1–3 км и в нижней стратосфере; наихудшие — на верхней границе пограничного слоя, в средней тропосфере, в районе тропопаузы и выше (см. рис. 2).

Как отмечалось ранее, обе конфигурации модели хуже всего воспроизводят температуру в условиях изотермии и инверсии. Также при сравнительном анализе ошибок, осреднённых по дням для каждого уровня модели, было выявлено, что наибольшие расхождения между моделями наблюдаются в приземном слое до 2 км, поэтому далее для расчёта ошибок будут отобраны разные диапазоны высоты.

Для каждого дня (всего 26 дней) были рассчитаны ошибки (Bias, MAE, RMSE), осреднённые по четырём характерным диапазонам высоты:

Первый диапазон — это конкретный уровень модели, соответствующий высоте ~84,6 м; второй — слой до 200 м; третий — до 2 км; четвёртый диапазон — вся толщина атмосферы (до ~20 км).

Такой агрегированный подход позволяет выявить слой, в котором параметризация урбанизации улучшает прогноз; оценить, как точность меняется от погодных условий; проверить, уменьшает ли городская схема ошибку по всей колонке или перераспределяет её по высоте.

Классификация качества прогноза *T* по средней абсолютной ошибке и СКО

День	84,6 м	До 200 м	До 2 км	До 20 км
2	1	1	1	1
4			0	С
5			1	1
6	0	0	0	0
7	1	1	1	1
8			0	0
9		0		
10		1	1	С
11	0	0	0	0
12				
13	1	1		1
14			1	
15	0	0	0	0
16	1	1	1	1
17			0	0
18			1	С
19				
20				1
21	0	0	С	0
22	1	1	1	
23				С
24		0	0	0
25		1	1	1
26	0	0	0	0
27	1	1	1	1
28				

После сравнения полученных ошибок составлена сводная таблица, состоящая из условных кодов: «1» означает, что обе метрики (MAE и RMSE) меньше у модели с учётом урбанизации; «0» — обе метрики меньше у модели без учёта урбанизации; «С» — у модели одна из ошибок меньше, а другая больше. Такое представление позволяет быстро увидеть дни с выигрышем, проигрышем или смешанным результатом модели с учётом урбанизации.

На уровне модели в слое ~84,6 м схема урбанизации улучшила прогноз температуры в 20 случаях из 26 (~77 %), отрицательный эффект всего в 6 случаях. В слое до 200 м преимущество стало меньше, но всё ещё заметно: в 18 случаях ошибки меньше (~69 %), в 8 случаях ошибки больше. До 2 км у модели с учётом урбанизации метрики ошибок меньше в 14 случаях (~54 %), в 11 случаях — больше. И один «смешанный» случай, когда MAE больше, а RMSE меньше у модели с урбанизацией. При оценке ошибки прогноза по всей модельной атмосфере (до 20 км) преимущества у конфигурации с параметризацией города уже нет — 10 случаев с меньшими ошибками, 11 — с большими и 5 «смешанных» случаев (таблица).

Таким образом, эффект городской параметризации ярко выражен у поверхности и в пределах городского пограничного слоя; по мере роста удаления от поверхности его вклад ослабевает и к масштабу всей атмосферы статистически не выделяется. Это подтверждает выводы, сделанные по профильным графикам: урбанизация в модели работает именно там, где должна — на уровнях до 300 м, а дальше её влияние уменьшается.

При анализе ошибок профилей скорости ветра было установлено, что на 18 уровнях более точным оказался прогноз без урбанизации, на 11 уровнях — прогноз с урбанизацией, на 5 уровнях получились смешанные результаты.

Для скорости ветра ошибки у модели с урбанизацией уменьшаются при увеличении слоя атмосферы. На уровне 84,6 м схема улучшила прогноз только в 8 случаях (~31 %). В слое до 200 м схема города улучшила прогноз в 10 случаях (~38 %). До 2 км— в 17 случаях (~65 %). Для слоя до 20 км — в 15 случаях (~58 %). То есть, модель с учётом города эффективно воспроизводит скорость ветра в пределах нижней тропосферы, но в приземном слое ухудшает прогноз.

Тот же алгоритм был применён и для января 2021 г. На уровне ~84,6 м в 14 из 28 дней (50 %) ошибки оказались меньше у модели с урбанизацией, в оставшихся 14 днях — у модели без урбанизации. В слое до 200 м смешанные результаты: 13 дней (~46 %) с улучшением, столько же с ухудшением и ещё 2 дня (~7 %) со «спорным» результатом. До 2 км урбанизация чаще ухудшала прогноз: в 17 днях из 28 (~61 %) ошибки оказались больше, чем в базовой конфигурации; лишь в 11 днях (~39 %) наблюдалось улучшение прогноза. По всей атмосфере (до 20 км) урбанизация ухудшила прогноз: 13 дней (~46 %) с большими ошибками, 11 дней (~39 %) с улучшением и 4 дня (~14 %) со смешанным результатом.

В январе 2021 г. введение параметризации города оказала на прогноз ветра противоположное влияние по сравнению с 2020 г. На самом нижнем модельном уровне (~ 84,6 м) она улучшила результат в 17 из 28 сут, т. е. примерно в 61 % случаев; в остальные 39 % базовая конфигурация оказалась точнее. Преимущество стало больше в слое до 200 м: здесь урбанизация снизила обе ошибки (MAE и RMSE) в 20 случаях из 28, что соответствует ~71 % выборки, тогда как ухудшения зафиксированы лишь в 29 % дней. В слое до 2 км схема урбанизации давала преимущество и проигрыш поровну (по ~46 %), а ~7 % остались смешанными. В слое до 20 км модель улучшила прогноз всего в 39 % случаях, 14 % смешанных случаев.

Таким образом, для января 2021 г. введение схемы параметризации города однозначно улучшало прогноз скорости ветра в слое от поверхности 200 м, т. е. в том слое, который критичен для городской аэродинамики. Выше 200 м её воздействие оказалось переменным.

Переходя к анализу результатов моделирования в январе 2015 г., важно ещё раз отметить, что расчёты с городской параметризацией проводились только с 15 января. До этого момента данные анализа модели GFS (начальные условия у WRF-ARW) имели более низкое пространственное разрешение, что могло исказить эффект урбанизации. Поэтому весь последующий обзор результатов за 2015 г. будет опираться на период с 16 по 31 января, что обеспечивает сопоставимость конфигураций и позволяет сделать выводы о влиянии схемы параметризации города.

На уровне ~84,6 м модель с урбанизацией дала более точный прогноз температуры в 13 из 16 дней (~81 %) и лишь в 3 случаях (~19 %) ухудшила результат. В слое до 200 м улучшения оказались ещё более устойчивыми: в 14 днях (~88 %) ошибки меньше у модели с параметризацией города и только в 2 случаях больше (~12 %). В слое до 2 км в 12 случаях модель с урбанизацией уточнила прогноз (~75 %), в 2 случаях ухудшила (~13 %) и ещё в 2 случаях получился спорный результат. Для всего модельного столба атмосферы (до 20 км) модель с урбанизацией оказалась лучше в 12 случаях (~75 %), хуже в 3 (~19 %) и 1 раз (~6 %) спорный результат.

Для ветра на уровне ~84,6 м схема города улучшила прогноз в 8 случаях из 16 (~50 %) и столько же раз ухудшила (~50 %). В слое до 200 м улучшение наблюдалось в 8 днях (~50 %), ухудшение – в 7 днях (~44 %) и 1 раз (~6 %) смешанные результаты. В слое до 2 км модель с урбанизацией улучшила прогноз для 10 дней (~63 %), ухудшила для 5 дней (~31 %) и для 1 случая (~6 %) получился спорный результат. До 20 км в пользу урбанизации 9 случаев (~56 %), против — в 7 случаев (~44 %).

В январе 2015 г. схема BEP для прогноза температуры улучшила прогноз по всем диапазонам высот, а для ветра наибольшее преимущество наблюдалось до 2 км.

В целом введение схемы параметризации города за исследуемые периоды не показала устойчивого преимущества. Из чего можно сделать вывод, что на качество прогноза существенное влияние оказывают конкретные погодные условия. Дополнительно проводилось сравнение результатов моделирования с данными наземной метеостанции, а также анализировались энергетические потоки поверхности и параметры турбулентного обмена. Показано, что применение альтернативных физических схем (в том числе параметризации турбулентности и микрофизики) в ряде случаев позволяло повысить точность прогноза, особенно в условиях сложной циркуляции. Эти результаты подтверждают необходимость комплексного подхода к конфигурации модели.

ЛИТЕРАТУРА

Bhautmage U. P., *Martilli A.*, *Salamanca F. et al.* Development and Evaluation of a New Urban Parameterization in the Weather Research and Forecasting (WRF) Model // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2022. V. 127(16). DOI: https://doi.org/10.1029/2021JD036338.

Chen F., *Kusaka H.*, *Bornstein R. et al.* The integrated WRF/urban modeling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems // Intern. J. Climatology. 2011. V. 31. P. 273–288. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.2158.

Giannaros T. M., *Melas D.*, *Founda D.*, *Zanis P.* A comprehensive approach for the simulation of the Urban Heat Island effect with the WRF/SLUCM modeling system: The case of Athens (Greece) // Atmospheric Research. 2018. V. 201. P. 86–101. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.10.021.

NUMERICAL MODELING OF ATMOSPHERIC PROCESSES USING THE WRF-ARW MODEL

V. A. Kletsova, O. G. Aniskina

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

The study examines the impact of urban development on the accuracy of numerical weather prediction using the WRF-ARW model. Numerical experiments were conducted with the BEP urban parameterization scheme for St. Petersburg in January 2015, 2020, and 2021. Particular attention is given to the verification of temperature and wind profiles based on radiosonde observations from the Voeikovo station. Forecast errors were analyzed using MAE and RMSE metrics. It was shown that the BEP parameterization improves the reproduction of near-surface temperature, especially under stable inversion conditions.

Keywords: urbanization, numerical modeling, WRF-ARW model, BEP parameterization, radiosonde, temperature profile, verification, RMSE, MAE

Kletsova Vlada Alexandrovna — master, vlada_melder@mail.ru
Aniskina Olga Georgievna — head of the department, associate professor, candidate of physical and mathematical sciences

УДК 528.9 DOI: 10.21046/KMU-2025-202-211

КОРРЕКЦИЯ АЛГОРИТМА ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МТВЗА-ГЯ

А. В. Клитная[1], *И. Н. Садовский*[2]

[1] **Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Москва, Россия**
[2] **Институт космических исследований РАН, Москва, Россия**

Работа посвящена внесению изменений в существующую процедуру географической привязки измерений, выполняемых российским сканером/зондировщиком МТВЗА-ГЯ, установленным на борту космического аппарата «Метеор-М» № 2-4. Необходимость корректировки обусловлена результатами, полученными сотрудниками ИКИ РАН в рамках работ по тематической обработке данных, поступающих с этого прибора. В частности, на примере корректировки географической привязки различных инструментов этой серии (функционирующих в настоящее время и закончивших свою работу на орбите) было показано, что оптические лучи визирования частотных каналов, относящихся к разным облучателям антенной системы, ориентированы по-разному. Данный факт был подтверждён дополнительно в рамках исследований радиотепловых портретов солнечного диска и его окрестностей. Разнонаправленность приводит к тому, что для каждой группы частотных каналов требуются свои корректировочные углы крена, тангажа и рыскания, обеспечивающие максимальное совпадение формируемых прибором радиометрических портретов с реперными географическими точками на поверхности Земли. В качестве начального приближения этот подход является оправданным и даёт возможность оценить потенциальные пределы точности географической привязки приборов этой серии. Однако корректность данной процедуры остаётся под вопросом, поскольку оказывается, что ось вращения (сканирования) прибора должна иметь свою ориентацию для каждой группы частотных каналов, что физически невозможно. Для устранения возникших несоответствий предлагается в рамках обновлённой процедуры географической привязки формирование не одного, а группы векторов наблюдения в приборной системе координат (их число определяется количеством облучателей антенной системы), с единой осью вращения, но различающимися углами сканирования в угломестной и азимутальной плоскостях. Второе приближение существующего алгоритма географической привязки, требующее корректировки, — это положение о совпадении трёх основных систем координат — приборной, космического аппарата и орбитальной. Необходимость отказа от имеющегося упрощения обусловлена периодическим маневрированием спутника-носителя «Метеор-М» № 2-4. Это, в свою очередь, приводит к возникновению дополнительных смещений в ориентации лучей визирования прибора, корректный учёт которых невозможен в рамках используемых приближений и, как следствие, приводит к неверной оценке угла встречи с Землёй и изменению плоскостей поляризации отдельных частотных каналов прибора. Детальному описанию указанных проблем, а также чёткой формулировке предлагаемых модификаций существующего алгоритма географической привязки и посвящена содержательная часть представляемой работы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, СВЧ-радиометрия, микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ, спутник, радиометр, географическая привязка данных ДЗЗ

Клитная Анастасия Викторовна — студентка магистратуры факультета космических исследований, kl.va2002@mail.ru
Садовский Илья Николаевич — кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, ilya_nik_sad@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время со спутников приходит огромное количество информации. Также это касается и измерений, проводимых в области спутниковой микроволновой радиометрии. Рост объёма спутниковой информации обусловлен стремительным развитием космических и информационных технологий, используемых при создании космических аппаратов (КА), направленных на дистанционное зондирование нашей планеты и космоса. И это развитие тесно связано с необходимостью получать и обрабатывать большое количество информации, на основе которой будут производиться измерения климата, атмосферы и других параметров, а также их влияния на окружающую среду.

Спутниковая микроволновая радиометрия занимает особое место в ряду средств дистанционного зондирования Земли. Её достоинствами является всепогодность, независимость от освещённости, высокая чувствительность к вариациям физико-химических параметров исследуемых объектов, малое энергопотребление приборов, позволяющее вести непрерывное наблюдение поверхности Земли и атмосферы. Её методы основаны на измерении микроволнового излучения, которое отражается от земной поверхности или излучается ею в космос. Это излучение зависит от физических и химических характеристик исследуемых объектов: влажности почвы, температуры поверхности, концентрации водяного пара в атмосфере и многих других параметров. В отличие от оптических методов, которые могут быть ограничены в своих возможностях из-за облаков, дождя или недостаточной освещённости, радиометрия позволяет получать данные в любую погоду и в любое время суток. Эта уникальная всепогодная способность делает спутниковую микроволновую радиометрию особенно ценной для долгосрочного мониторинга природных процессов и обеспечения устойчивого управления природными ресурсами.

Важной частью работы с данными, полученными с помощью микроволновых радиометров, становится географическая привязка. Операция географической привязки данных представляет собой операцию совмещения внутренней системы координат (СК), сформированной в результате конического сканирования и перемещения вдоль траектории космического аппарата сканером/зондировщиком радиометрического изображения, с географической СК. Таким образом, операция географической привязки представляет собой преобразование координат данных, полученных с КА с земными координатами: широтой и долготой.

Таким образом, операция геопривязки является ключевым этапом обработки данных спутниковых наблюдений, а задача по повышению её точности для действующего на орбите прибора МТВЗА-ГЯ — актуальной с научной и практической точки зрения.

В данной работе были использованы измерения с микроволнового сканера температурно-влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА-ГЯ). Этот инструмент представляет собой единственный отечественный микроволновый радиометр, функционирующий на орбите.

Текущий алгоритм, несмотря на высокую точность, которая оценивается на уровне 4–5 км, содержит ряд методических ограничений и допущений, влияющих на качество географической привязки данных. Особенно заметной эта проблема становится при расчёте дополнительных параметров, чувствительных к направлению визирования прибора. В существующем алгоритме это направление определяется с искажениями, вызванными искусственными допущениями в расчётах. В связи с этим целью данной работы является разработка модифицированной версии алгоритма географической привязки измерений, выполняемых российским спутниковым прибором МТВЗА-ГЯ.

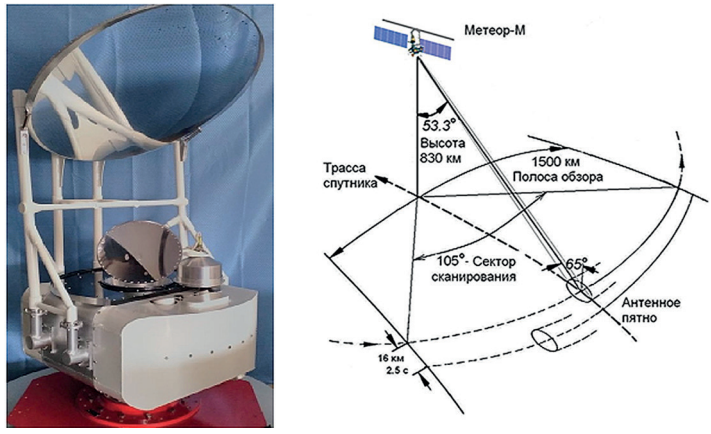
МОДУЛЬ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ МТВЗА-ГЯ

Общая характеристика прибора

Инструмент МТВЗА-ГЯ (сокращение ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове, который был одним из создателей российских приборов этого класса), разработан и усовершенствован в ФГУП «Центр космических наблюдений». Он запущен 29 февраля 2024 г. на аппарате «Метеор-М» № 2-4 (Барсуков и др., 2025). Данный радиометр является одним из приборов, которые традиционно устанавливаются на спутниках серии «Метеор-М». Прибор имеет нетипичное размещение — выше панелей солнечных батарей. Такое расположение обусловлено повышением качества съёмки радиометра. Это происходит из-за того, что аппарат для оптимизации энергоснабжения имеет подвижные панели солнечных батарей, которые меняют положение при переходе между витками. Из-за такой особенности при установке инструмента под панелями солнечных батарей есть риск, что тень затенит область обзора инструмента.

Инструмент МТВЗА-ГЯ выполняет коническое сканирование под углом в 65° к местной нормали. Он имеет полосу обзора в 1500 км, измерения выполняются на 40 частотных диапазонах от 6,9 до 190 ГГц. При этом частотные каналы располагаются в окнах прозрачности атмосферы, т. е. на частотах 6,9; 7,3; 34; 45 и 165 ГГц, а также в области резонанса водяного пара с центром на частоте в 185,31 ГГц. Пространственное же разрешение тесно связано с размером антенного пятна и зависит от направления антенны и частоты. Само пятно принимает форму эллипса и его размер определяется длиной малой и большой оси. При этом длина малой оси определяется по дуге конического сканирования, а большой — вдоль линии визирования.

Антенная система представляет собой однозеркальную систему с боковым облучением параболического зеркала размером 0,67 м, что хорошо видно на рис. 1*а*. Также инструмент обладает четырьмя группами частотных каналов, которые представлены в виде четырёх отдельных рупоров, оптимизированных в диапазонах 6,9–23,8; 31,5–48,0; 52–91 и 165–183 ГГц. Ориентация оптических каналов настроена таким образом, чтобы они были образующими конуса сканирования с углом в 53,3° (см. рис. 1б). Но при этом образованные оси имеют расхождения для каждого отдельного рупора.



а *б*

Рис. 1. Сканирующая платформа (*а*) и геометрия сканирования (*б*) радиометра МТВЗА-ГЯ с орбиты КА «Метеор-М» № 2-3

Круговое коническое сканирование МТВЗА-ГЯ выполняется в направлении кормы КА. Направление скана — справа налево, ширина рабочего сектора 105°. Ширина и несимметричность сектора сканирования определяются максимальным использованием области, которая не затеняется элементами конструкции КА. Ширина полосы обзора при этом не менее 1500 км.

Информация, полученная МТВЗА-ГЯ, используется в решении широкого круга задач. Среди них задачи метеорологии, океанографии, численного прогноза погоды, определяется паросодержание атмосферы, водозапас облаков, скорость приводного ветра и другие параметры.

Описание спутника-носителя

Инструмент установлен на полярно-орбитальном спутнике «Метеор-М» № 2-4, изготовленным корпорацией «ВНИИЭМ» (https://iki.cosmos.ru/news/pribory-iki-ran-na-bortu-meteora-m-no2-4). Аппарат был запущен 29 февраля 2024 г. в 8 часов 43 минуты. Спутник выведен на орбиту при помощи ракеты-носителя «Союз-2.1б» с разгонным блоком «Фрегат» (рис. 2). Отделение аппарата от ракеты-носителя произошло спустя 59 мин на целевой солнечно-синхронной орбите.



Рис. 2. Фото запуска ракеты-носителя, полученное Роскосмосом

Перечислим характеристики КА «Метеор-М» № 2-4. Он расположен на круговой солнечно-синхронной орбите с высотой в 832 км, периодом примерно в 100 мин. Для оптимизации мощности спутник обладает подвижными панелями солнечных батарей, которые производят до 1000 Вт в сутки. Масса спутника составляет 2700 кг с полезной нагрузкой в виде научной аппаратуры с весом примерно в 320 кг.

На борту, помимо МТВЗА-ГЯ находится ряд приборов (рис. 3):

- комплекс многозональной спутниковой съёмки (КМСС-2), который предназначен для многозональной съёмки Земли в видимом и ближнем ИК-диапазонах электромагнитного излучения. Он имеет ширину полосы сканирования приблизительно в 1000 км и пространственное разрешение в 60 м;
- звёздные датчики БОКЗ-М2, которые обеспечивают высокоточную ориентацию космического аппарата;
- бортовой радиолокационный комплекс (БРЛК). Он имеет ряд характеристик: несущая частота зондирующего сигнала — 9500–9700 МГц, ширина полосы съёмки — не менее 600 км; пространственное разрешение составляет два режима малого разрешения — 0,7×1,0 км и среднего разрешения составляет 0,4×0,5 км;

- радиотехнический комплекс сбора и передачи данных, включая систему получения данных с наземных измерительных платформ (ССПД);
- инфракрасный фурье-спектрометр температурного и влажностного зондирования;
- гелиогеофизический аппаратурный комплекс (ГГАК-М), объединяющий на одной платформе пять приборов для изучения излучения широкого энергетического спектра.



Рис. 3. Внешний вид аппарата «Метеор-М» № 2-4

ПРИЧИНЫ НЕОБХОДИМОСТИ КОРРЕКТИРОВКИ СУЩЕСТВУЮЩЕГО АЛГОРИТМА ГЕОПРИВЯЗКИ

При анализе действующего алгоритма географической привязки данных, получаемых с радиометра МТВЗА-ГЯ, на основе публикаций (Садовский, Сазонов, 2022, 2023), а также с учётом актуальной технической и конструкторской документации были выявлены особенности текущей реализации, которые могут существенно влиять на точность интерпретации измерений.

Во-первых, в конструкции МТВЗА-ГЯ реализовано использование нескольких облучателей, обеспечивающих наблюдение в различных частотных диапазонах. В результате этого визирующие лучи различных групп частотных каналов имеют неодинаковое пространственное направление. Для компенсации этого эффекта в действующем алгоритме привязки вводятся индивидуальные корректировочные углы — крена, тангажа и рыскания — для каждой группы каналов. Однако подобный подход неизбежно приводит к концептуальному противоречию: для каждой частотной группы алгоритм «требует», чтобы прибор имел собственную, уникальную ось вращения, тогда как физически МТВЗА-ГЯ — это единый сканирующий инструмент с общей механикой. Такое несоответствие приводит к внутренним логическим противоречиям в структуре алгоритма и может провоцировать ошибки в результирующих данных.

Во-вторых, подобное искажение геометрии привязки может оказывать негативное влияние на параметры, критически важные для решения обратных задач — в частности, для оценки углов встречи с поверхностью Земли, направление вектора сканирования, а также положения плоскости поляризации принимаемого сигнала. Так, например, при расчёте плоскости поляризации в текущей реализации алгоритма происходит искажение геометрии при применении корректировочных углов. Это, в свою очередь, приводит к формированию недостоверной картины поляризационного распределения, особенно в краевых зонах видимости.

В дальнейшем в работе будет продемонстрирован конкретный пример возникновения подобной ошибки и предложен способ её исправления.

В-третьих, необходимо учитывать и влияние динамики движения самого космического аппарата. В случае манёвров спутника «Метеор-М» № 2-4, связанных с корректировкой орбиты или ориентации, происходят отклонения от штатной (программно заложенной) ориентации. Эти отклонения не учитываются в текущем алгоритме привязки, в котором априорно предполагается совпадение приборной, орбитальной и платформенной систем координат. На практике это приводит к дополнительным смещениям визирующих лучей и, соответственно, к ухудшению точности привязки. Особенно чувствительными к этому являются каналы с высокой пространственной разрешающей способностью и узким лучом визирования.

Несмотря на потенциальную значимость этих эффектов, на сегодняшний день их количественная оценка и систематический анализ влияния на точность радиометрических измерений не проводились. Это указывает на необходимость модернизации алгоритма географической привязки с учётом физических ограничений и динамических характеристик работы прибора и платформы.

НЕОБХОДИМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА ГЕОПРИВЯЗКИ

Для устранения существующих проблем предлагается использовать фиксированные значения для половины угла раствора конуса сканирования и азимутального угла начала рабочего сектора, а также формировать не один, а группы мгновенных векторов наблюдения, относящихся к разным облучателям антенной системы. То есть введение этих значений приводит к необходимости применять свой вектор наблюдений для каждой из групп частотных каналов (рис. 4).

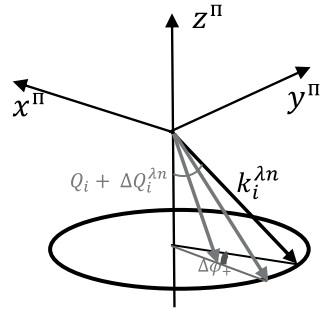


Рис. 4. Определение координат вектора наблюдения

Искомый вектор k будет определяться по следующей формуле:

$$k_i^{\lambda_n} = \begin{bmatrix} \sin\left(\theta_i + \Delta\theta_i^{\lambda_n}\right) \cdot \cos(\varphi_i + \Delta\varphi_+) \\ \sin\left(\theta_i + \Delta\theta_i^{\lambda_n}\right) \cdot \sin(\varphi_i + \Delta\varphi_+) \\ -\cos\left(\theta_i + \Delta\theta_i^{\lambda_n}\right) \end{bmatrix},$$

где i — номер измерения; λ_n, — номер группы частотных каналов; θ_i — половина угла раствора конуса, $\theta_i = 53{,}3°$ для всех сканеров; $\Delta\theta_i^{\lambda_n}$ — поправка на отклонение каждого из сканеров, она будет задаваться в алгоритм по техническим данным ап-

парата; φ_i — азимутальный угол, $\varphi_i = \frac{360}{2,5}\left(0,95236 + \frac{2,5}{360} \times \frac{145}{200-1}(i-1)\right)$, при этом добавка $\Delta\varphi_+$ будет индивидуальной для каждой группы сканеров (см. рис. 4).

Коэффициенты $\Delta\theta_i^{\lambda_n}$ и $\Delta\varphi_+$ необходимо будет найти для каждой группы сканеров независимо друг от друга и ввести в алгоритм. В качестве начального приближения углов необходимо использовать результаты наблюдений за солнечным диском.

Также необходимо будет отказаться от единичных матриц перехода между системами координат: орбитальной (ОСК), космического аппарата (СККА), приборной (ПСК).

При переходе из ПСК в СККА будут применены преобразования, почти не отличающиеся от изначального алгоритма, т. е. применена матрица:

$$R_z(\alpha_р) = \begin{bmatrix} \cos\alpha_р & -\sin\alpha_р & 0 \\ \sin\alpha_р & \cos\alpha_р & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_x(\alpha_к) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_к & \sin\alpha_к \\ 0 & -\sin\alpha_к & \cos\alpha_к \end{bmatrix},$$

$$R_y(\alpha_т) = \begin{bmatrix} \cos\alpha_т & 0 & \sin\alpha_т \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha_т & 0 & \cos\alpha_т \end{bmatrix}.$$

$$M^{\text{СККА}\leftarrow\text{ПСК}} = R_y(\alpha_т)R_x(\alpha_к)R_z(\alpha_р) =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\alpha_т \cdot \cos\alpha_р - \sin\alpha_р \cdot \sin\alpha_к \cdot \sin\alpha_т & -\sin\alpha_р \cdot \cos\alpha_т - \sin\alpha_р \cdot \sin\alpha_к \cdot \sin\alpha_т & \sin\alpha_т \cdot \cos\alpha_к \\ \cos\alpha_к \cdot \sin\alpha_р & \cos\alpha_к \cdot \cos\alpha_р & \sin\alpha_к \\ -\sin\alpha_т \cdot \cos\alpha_р - \cos\alpha_т \cdot \sin\alpha_к \cdot \sin\alpha_р & \sin\alpha_р \cdot \sin\alpha_т - \cos\alpha_р \cdot \sin\alpha_к \cdot \cos\alpha_т & \cos\alpha_к \cdot \cos\alpha_т \end{bmatrix},$$

где $\alpha_р$ — угол рысканья; $\alpha_к$ — угол крена; $\alpha_т$ — угол тангажа. При учёте преобразований, описанных ниже, делаем предположение, что коэффициенты $\alpha \approx 0$, кроме случая с углом рысканья, который из работы со спутником был выведен равным $-25°$.

При переходе из СККА в ОСК ранее сделано предположение о том, что ошибка географической привязки данных возникает из-за расхождения положения КА и его орбитальной ориентации. Вследствие такого предположения возникает необходимость введения углов коррекции: тангажа $\beta_т$, рысканья $\beta_р$ и крена $\beta_к$. Положительные значения углов соответствуют повороту по часовой стрелке, аналогично направлению углов α, изображённом на рис. 5. Последовательный поворот системы относительно каждой из трёх осей обеспечивает полный переход в ОСК. Тогда матрицы перехода для каждого отдельного вектора наблюдений будут иметь вид:

$$\tilde{R}_z(\beta_р) = \begin{bmatrix} \cos\beta_р & -\sin\beta_р & 0 \\ \sin\beta_р & \cos\beta_р & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{R}_x(\beta_к) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_к & \sin\beta_к \\ 0 & -\sin\beta_к & \cos\beta_к \end{bmatrix},$$

$$\tilde{R}_y(\beta_т) = \begin{bmatrix} \cos\beta_т & 0 & \sin\beta_т \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta_т & 0 & \cos\beta_т \end{bmatrix}.$$

В итоге матрица перехода из ПСК в СК КА имеет вид:

$$M^{\text{ОСК}\leftarrow\text{СККА}} = \tilde{R}_y(\beta_т)\tilde{R}_x(\beta_к)\tilde{R}_z(\beta_р) =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\beta_т \cdot \cos\beta_р - \sin\beta_р \cdot \sin\beta_к \cdot \sin\beta_т & -\sin\beta_р \cdot \cos\beta_т - \sin\beta_р \cdot \sin\beta_к \cdot \sin\beta_т & \sin\beta_т \cdot \cos\beta_к \\ \cos\beta_к \cdot \sin\beta_р & \cos\beta_к \cdot \cos\beta_р & \sin\beta_к \\ -\sin\beta_т \cdot \cos\beta_р - \cos\beta_т \cdot \sin\alpha_к \cdot \sin\beta_р & \sin\beta_р \cdot \sin\beta_т - \cos\beta_р \cdot \sin\beta_к \cdot \cos\beta_т & \cos\beta_к \cdot \cos\beta_т \end{bmatrix}.$$

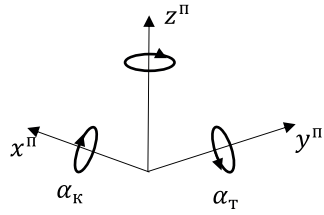


Рис. 5. Положительное направление углов

ПРОГНОЗ РЕЗУЛЬТАТА РЕАЛИЗАЦИИ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА

Реализация модифицированного алгоритма географической привязки данных, полученная при помощи внедрения указанных выше изменений в рабочий код алгоритма географической привязки данных, повысит точность пространственной локализации измерений МТВЗА-ГЯ. Также данный алгоритм физичен, что позволяет более осмысленно подходить к вводу углов коррекции.

Согласно предварительной оценке, реализация алгоритма позволит достичь следующих положительных эффектов:

- Повышение точности географической привязки данных при нахождении оптимальных значений углов.
- Устранение ошибки расчёта дополнительных параметров, рассчитываемых в рамках геопривязки. Самым значимым будет устранение ошибок определения плоскости поляризации, имеющая ключевое значение при расчёте параметров ветра и атмосферы, и угла встречи с Землёй, которая была вызвана неверным определением оси вращения прибора.
- Модифицированный алгоритм упрощает внесение корректировок в случае отклонения прибора от штатного положения.

Таким образом, модифицированный алгоритм не только устранит существующие проблемы, но и позволит физически обоснованно подходит к дальнейшей работе и улучшению алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена задача повышения точности географической привязки радиометрических измерений, выполняемых отечественным спутниковым прибором МТВЗА-ГЯ, установленным на борту космического аппарата «Метеор-М» № 2-4. Анализ существующего алгоритма показал наличие ряда методологических и физических ограничений, способных оказывать влияние на точность интерпретации получаемых данных, особенно в части определения углов визирования, плоскости поляризации и координатных смещений, возникающих при манёврах КА.

Основным направлением предлагаемой корректировки является введение модифицированного подхода к формированию векторов наблюдения в приборной системе координат, учитывающего конструктивные особенности антенной системы и сохраняющего физически обоснованную единую ось вращения. Также предложено отказаться от упрощённого предположения о совпадении всех координатных систем, что позволит учесть реальную динамику спутника.

Прогноз реализации предложенного алгоритма указывает на потенциальное снижение ошибок геопривязки, улучшение согласованности поляризационных характеристик и повышение достоверности расчётных параметров, что в перспективе приведёт к улучшению качества тематических продуктов и расширению прикладных возможностей прибора.

Работа выполнена при поддержке темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

ЛИТЕРАТУРА

Барсуков И. А., *Митник Л. М.*, *Болдырев В. В. и др.* Метеорологический спутник «Метеор-М» № 2-3: предварительные результаты микроволнового зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 1. С. 315–326. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-315-326.

Садовский И. Н., *Сазонов Д. С.* Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2022. Т. 202. № 6. С. 101–112. DOI: 10.31857/S0205961422060100.

Садовский И. Н., *Сазонов Д. С.* Корректировка географической привязки данных МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 6. С. 73–85. DOI: 10.31857/S0205961423060076.

CORRECTION OF THE GEOLOCATION ALGORITHM FOR MTVZA-GYa MEASUREMENT DATA

A. V. Klitnaya [1], ***I. N. Sadovsky*** [2]

[1] **Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia**
[2] **Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia**

This work is devoted to the modification of the existing geolocation procedure for measurements performed by the Russian microwave scanner/sounder MTVZA-GYa installed onboard the Meteor-M No. 2-4 satellite. The need for such a correction arises from the results obtained by IKI RAS specialists in the course of thematic data processing. In particular, based on geolocation adjustments performed for various instruments of this series (both currently operating and decommissioned), it was shown that the viewing directions of the frequency channels, associated with different feeds of the antenna system, are not aligned. This fact was further confirmed through studies of radiothermal images of the solar disk and its surroundings. Such directional discrepancies lead to the requirement for individual correction angles of roll, pitch, and yaw for each group of frequency channels to achieve optimal alignment of the radiometric images with reference geographic points on Earth's surface. While this approach is acceptable as a first approximation and allows estimation of potential accuracy limits of the geolocation procedure for this class of instruments, its physical validity is questionable. Specifically, the algorithm implies that the scan axis must have different orientations for each channel group, which is physically impossible. To resolve this inconsistency, the updated

algorithm proposes forming not a single, but a group of observation vectors in the instrument coordinate system—one per antenna feed—sharing a common scan axis but differing in elevation and azimuthal scan angles. A second critical approximation of the existing algorithm requiring correction is the assumption that the three main coordinate systems—instrumental, spacecraft, and orbital—coincide. The need to abandon this simplification stems from the periodic maneuvers performed by the Meteor-M No. 2-4 satellite, which introduce additional variations in the instrument's viewing geometry. These variations cannot be properly accounted for within the existing approximation framework and may lead to incorrect estimates of Earth intersection angles and changes in polarization planes for specific frequency channels. The core part of this study is dedicated to a detailed discussion of these problems and to the clear formulation of the proposed modifications to the geolocation algorithm.

Keywords: remote sensing, microwave radiometry, MTVZA-GYa scanner/sounder, satellite, radiometer, Earth observation data geolocation

Klitnaya Anastasia V. — Master's student faculty of space research, kl.va2002@mail.ru
Sadovsky Ilya N. — candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, senior researcher, ilya_nik_sad@mail.ru

УДК 524.352 DOI: 10.21046/KMU-2025-212-219

ОТКРЫТИЕ ОПТИЧЕСКОГО ТРАНЗИЕНТА AT 1985V — ВОЗМОЖНОГО ПОСЛЕСВЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ВСПЛЕСКА

Л. Д. Коньков, Д. В. Денисенко

Образовательный комплекс «Воробьевы горы» Москва, Россия

В ходе проверки участка неба в созвездии Девы на снимках Паломарского обзора DSS (*англ.* Digitized Sky Surve) обнаружен необычный объект красного цвета 16-й звёздной величины. Оптический транзиент присутствует на красной пластинке DSS, снятой на обсерватории Сайдинг Спринг (*англ.* Siding Spring Observatory) 28 февраля 1985 г. в 17:06–18:41 UT. На более глубоких изображениях обзоров PanSTARRS и DECaLS на месте транзиента видно слабое диффузное пятно — галактика 23,5 величины. Объект был зарегистрирован на сервере обозначений транзиентов TNS (*англ.* Transient Name Server) как AT 1985V. Различие блеска транзиента и галактики в 7,5 звёздных величин слишком велико для сверхновой, но вполне правдоподобно для оптического послесвечения гамма-всплеска. Поиск возможных совпадений в каталогах космических гамма-всплесков показал возможный кандидат GRB 850227, наблюдавшийся КА «Пионер-Венера-Орбитер» (*англ.* Pioneer Venus Orbiter — PVO PVO) 27 февраля 1985 г. в 01:06:21 UT, за 40 ч до снимка DSS. Мы предположили, что транзиент 1985V мог быть оптическим послесвечением гамма-всплеска GRB 850227. Однако триангуляция GRB 850227 по данным PVO и SMM (*англ.* Solar Maximum Mission) исключила такую возможность. Тем не менее, это не исключает возможной связи AT 1985V с другим гамма-всплеском 28 февраля, не зарегистрированным космическими аппаратами. На данный момент самым ранним из обнаруженных остаётся оптическое послесвечение всплеска GRB 920925C, наблюдавшегося приборами космической обсерватории «Гранат».

Ключевые слова: оптические транзиенты, космические гамма-всплески, послесвечения

ВВЕДЕНИЕ

Космические гамма-всплески — одно из самых грандиозных и высокоэнергичных явлений во Вселенной. Природа их происхождения оставалась главной загадкой астрофизики в течение трёх десятилетий. Первый гамма-всплеск был зарегистрирован космическими аппаратами Vela в 1967 г., но статья об их открытии появилась спустя несколько лет (Klebesadel et al., 1973). До конца 90-х гг. XX в. шли споры о том, приходят ли гамма-всплески из Млечного Пути или из далёких галактик.

Первое отождествление космического гамма-всплеска в оптическом диапазоне было сделано только в 1997 г. для события GRB 970228 (Bloom et al., 2001). Спустя сутки после всплеска на месте его рентгеновского двойника был обнаружен слабый объект 21-й величины в галактике с красным смещением $z = 0{,}695$. Тогда стало понятно, что гамма-всплески происходят на расстояниях в сотни миллионов и миллиарды световых лет и содержат в себе энергию, вызванную взрывами звёзд с массой в десятки солнечных.

В 1999 г. была зарегистрирована вспышка в оптике 8,9 величины от всплеска GRB 990123 (Akerlof et al., 2000). Наконец, в 2008 г. был установлен рекорд яркости наблюдений космического гамма-всплеска в видимом свете. Во время события GRB 080319B было обнаружено сопровождающее его излучение, достигшее в максимуме блеска 5,8 звёздной величины (Racusin et al., 2008). С учетом красного смещения GRB 080319B ($z = 0{,}937$) его абсолютная величина в максимуме блеска достигала $M \sim -38$, что на 10 звёздных величин (4 порядка) превышает типичную

Коньков Леонид Дмитриевич — ученик 8-го класса, konkovleonid@yandex.ru
Денисенко Денис Владимирович — педагог дополнительного образования, методист, d.v.denisenko@gmail.com

светимость квазаров. Очевидно, оптическое излучение от гамма-всплесков не является чем-то уникальным и сопровождает многие такие события. Всплески происходят сейчас и происходили раньше с частотой около 1 события в сутки. Следует ожидать, что оптические проявления гамма-всплесков могли случайно попасть на снимки обзоров неба и до их официального открытия. Одной из наиболее подходящих баз данных для их поисков может служить Паломарский обзор неба DSS (*англ*. Digitized Sky Survey), снимки которого были сделаны с 1983 по 2000 г. на двух идентичных 48-дюймовых телескопах в Северном и Южном полушарии и охватывают всё небо с предельной звёздной величиной до 22 в фильтре *B*, 21 в *R* и 19.5 в *I*. Ранее на синей Паломарской пластинке 25 сентября 1992 г. было открыто оптическое послесвечение гамма-всплеска GRB 920925C, зарегистрированного за шесть часов до этого приборами обсерватории «Гранат» (Денисенко, Терехов, 2008).

ОТКРЫТИЕ ОПТИЧЕСКОГО ТРАНЗИЕНТА AT 1985V

В ходе проекта «Центр открытия астрономических объектов» Московского дворца пионеров автор статьи ранее уже обнаружил 13 сверхновых и 3 переменные звезды. Все предыдущие сверхновые были найдены в довольно ярких и близких галактиках и имели звёздную величину слабее своих родительских объектов. Поиск проводился на сайте Simbad на снимках Паломарского атласа неба. В ходе проекта «Палеоастрономия» (*англ*. Paleo — Palomar Extinct Objects) мы искали объекты, которые имеют синий или красный цвет на снимках DSS Colored, но отсутствуют на изображениях современных обзоров SDSS (*англ*. Sloan Digital Sky Survey), PanSTARRS (*англ*. Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System) или DECam (*англ*. Dark Energy Camera). Если объект находится рядом с галактикой, он с большой вероятностью является сверхновой. Такие кандидаты проверялись на известность на сайтах SIMBAD (*англ*. Set of Identifications, Measurements, and Bibliography for Astronomical Data), Vizier и TNS (*англ*. Transient Name Server). Объекты, которых не было ни в каких каталогах, отправлялись на регистрацию на сайт TNS, где им присваивались обозначения в соответствии с годом вспышки и порядковым номером открытия. Список сверхновых и переменных звёзд, открытых обучающимися Московского дворца пионеров в ходе проекта Paleo, размещён на сайте https://scan.sai.msu.ru/~denis/Paleo/ в разделе «Наши открытия».

14 марта 2024 г. автор этой статьи обнаружил на снимках неба звездообразный объект красного цвета с координатами 13h 10m 59s.54 –06° 07′ 02″.9 (рис. 1). Его не было ни в базе данных астрономических объектов Simbad, ни в Международном реестре переменных звёзд AAVSO VSX (*англ*. American Association of Variable Star Observers Variable Star IndeX). Объект присутствовал в каталоге GSC 2.3.2 как звезда с величиной 15,96 в фильтре *R* и эпохой наблюдений 1985,189 (28 февраля 1985 г.). На снимках PanSTARRS на месте транзиента виден слабый диффузный объект. На более глубоких изображениях обзора DECaLS (*англ*. Dark Energy Camera) очевидно, что это галактика примерно 23,5 величины. Оптический транзиент находится на расстоянии 0,9 угл. с от центра галактики. Он был отправлен на регистрацию на сервер обозначений транзиентов (*англ*. Transient Name Server) Международного астрономического союза IAU (*англ*. International Astronomical Union) TNS 1985V (https://www.wis-tns.org/object/1985V) и получил обозначение AT 1985V (https://www.wis-tns.org/object/1985V).

На рис. 1 показано цветное изображение AT 1985V с полем зрения 6×6 угл. мин, составленное из двух пластинок оцифрованного обзора неба DSS: синей, снятой 8 мая 1983 г., и красной, полученной 28 февраля 1985 г. На врезке показан фрагмент изображения центральной части этого же участка неба с DECam, увеличенный для наглядности.

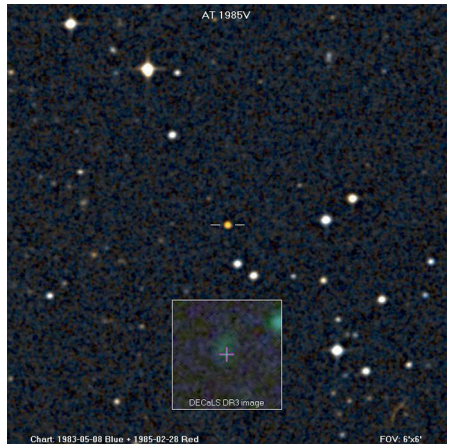


Рис. 1. Изображение оптического транзиента AT 1985V на снимках DSS

АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ AT 1985V

Снимок 28 февраля 1985 г. был скачан с сайта DSS Plate Finder в формате FITS и тщательно проанализирован в программе MaxIm DL Version 6.11. Точное время начала снимка согласно заголовку файла FITS равно 1985-02-28 17:06:00 UT (*англ*. Universal Time). Анализ снимка показал, что оптический транзиент имеет правильную форму, мало отличающуюся от соседних звёзд поля на том же снимке. Вытянутость изображения (eccentricity) 0,038 и ширина профиля на половине высоты FWHM (*англ*. full width at half maximum) 3,7 угл. с совпадают с такими же параметрами звёзд 15,5–16,5 величины на том же снимке в пределах 10 угл. мин от транзиента. Нами были тщательно проверены окрестности AT 1985V на той же пластинке DSS 1985 г. на предмет наличия следов искусственных спутников, бликов от самолётов и дефектов изображения. Других подобных объектов или артефактов обнаружено не было. Можно с уверенностью сказать, что AT 1985V — реальный объект на небе, прошедший сквозь оптику телескопа и светивший в течение долгого времени, в отличие, к примеру, от бликов геостационарных спутников или вращающегося космического мусора.

Мы исключили вероятность того, что 1985V мог быть астероидом или кометой. Проверка была проведена на сайте Центра малых планет MPC (*англ*. Minor Planet Center) https://minorplanetcenter.net//cgi-bin/checkmp.cgi. Она показала, что в радиусе 30 угл. мин от указанных координат в момент времени 1985-02-28.75 UT не было астероидов ярче 17,8 величины, а все ближайшие объекты двигались по небу с угловой скоростью не менее 13 угл. с/ч. При экспозиции пластинки в 95 мин любой астероид оставил бы на снимке след в виде чёрточки, что и наблюдается у ближайших малых планет, попавших в поле зрения. Как было сказано выше, транзиент имеет совершенно звездообразный вид с вытянутостью изображения 0,038, как у соседних звёзд на снимке.

ПАРАМЕТРЫ ВОЗМОЖНОЙ РОДИТЕЛЬСКОЙ ГАЛАКТИКИ AT 1985V

Галактика на месте оптического транзиента присутствует в каталоге объектов камеры тёмной энергии DECam (Duncan, 2022). Для неё определено фотометрическое красное смещение $z = 0{,}695 \pm 0{,}221$. Фотометрическое расстояние

до галактики было вычислено в рамках стандартной космологии ΛCDM (*англ.* Lambda-Cold Dark Matter), используя сайт «Космологический калькулятор» (https://www.kempner.net/cosmic.php). Соответствующая абсолютная звёздная величина AT 1985V получается равной −27,2±0,3 (без учета *k*-поправки). Это заметно превышает яркость оптического послесвечения известного гамма-всплеска GRB 030329 (Буренин и др., 2003), который спустя 48 ч после вспышки на красном смещении $z = 0{,}1685$ имел 16-ю звёздную величину в фильтре R ($M_R \sim -23{,}6$). Отметим, что формально 0,1685 отличается от красного смещения галактики на месте AT 1985V на 2,4 стандартного отклонения. Для уточнения оценки красного смещения возможной родительской галактики крайне желательны её наблюдения на крупных телескопах.

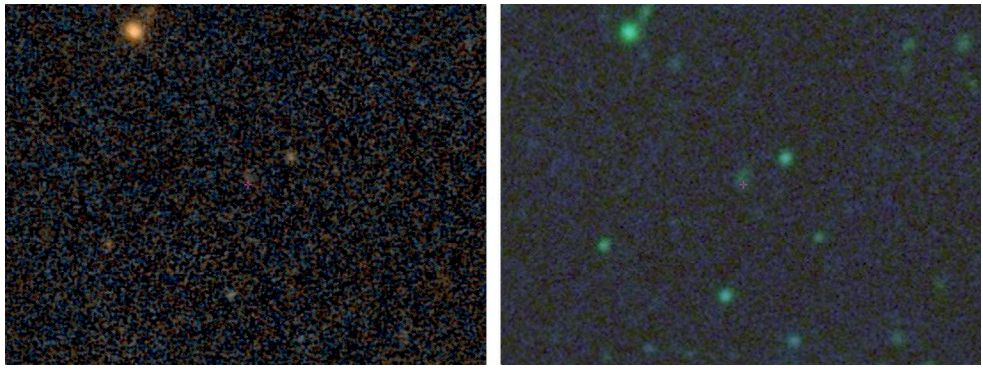


Рис. 2. Изображение родительской галактики AT 1985V на снимках PanSTARRS (*слева*) и DECam (*справа*). Положение оптического транзиента отмечено штрихами

Мы также оценили вероятность случайного совпадения нашего оптического транзиента с галактикой. AT 1985V находится на угловом расстоянии 0,9 угл. с от центра галактики, что на красном смещении $z = 0{,}695$ соответствует линейному расстоянию около 6,5 кпк. Анализ снимка камеры тёмной энергии (рис. 2) показывает, что галактики в поле AT 1985V занимают около 2 % площади неба, а вероятность случайного попадания AT в пределах 1 угл. с от центра галактики составляет 0,0097.

ПОИСК ГАММА-ВСПЛЕСКА, СВЯЗАННОГО С AT 1985V

За несколько месяцев до нашего открытия был опубликован каталог космических гамма-всплесков, наблюдавшихся с межпланетного космического аппарата «Пионер-Венера-Орбитер» (Fenimore et al., 2023). Ближайшим гамма-всплеском, произошедшим незадолго до съёмки пластинки с AT 1985V, оказался GRB 850227, зарегистрированный детектором PVO (*англ.* Pioneer Venus Orbiter) в 01:06:21 UT 27 февраля 1985 г., за 40 ч до снимка DSS. За 240 сут с сентября 1984 по май 1985 г. PVO зарегистрировал всего 12 гамма-всплесков (в среднем 1 раз в 20 дней), т. е. вероятность совпадения двух событий с разницей по времени в 40 ч (1,6 сут) составляет менее 10 %. Момент съёмки AT 1985V среди гамма-всплесков PVO за 8 мес 1984–1985 гг. отмечен на рис. 3 красной вертикальной линией.

Всплеск продолжался как минимум 9 с, после чего в телеметрических данных космического аппарата произошёл сбой. Это говорит о том, что GRB 850227 был длинным всплеском, от таких обычно и наблюдаются оптические послесвечения.

Однако в предположении о связи AT 1985V с GRB 850227 транзиент оказывается ярче всех оптических двойников гамма-всплесков, включая знаменитый GRB 030329. На рис. 4 показано положение оптического транзиента AT 1985V на кривых блеска измеренных оптических послесвечений гамма-всплесков из статьи (Позаненко и др., 2021).

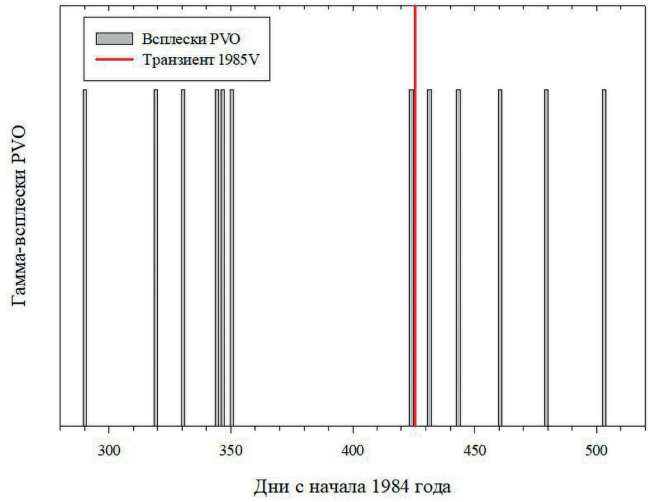


Рис. 3. Положение AT 1985V среди гамма-всплесков, зарегистрированных PVO с сентября 1984 по май 1985 г.

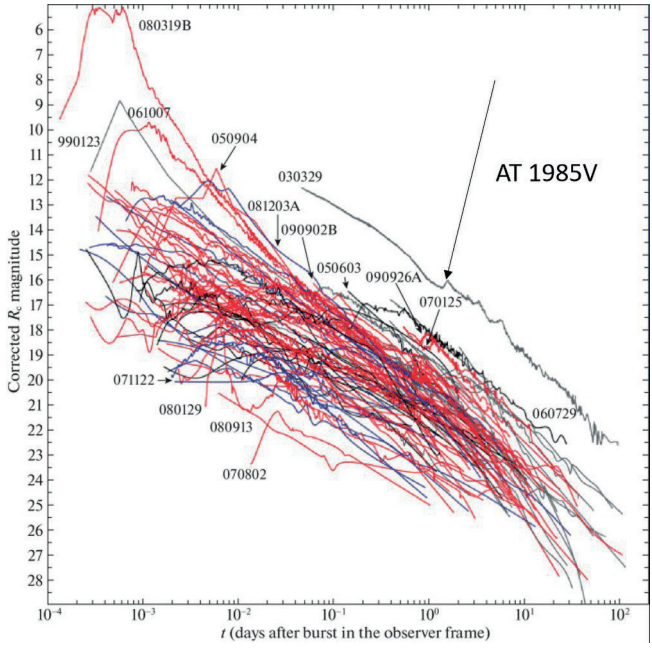


Рис. 4. Положение AT 1985V на кривых блеска оптических послесвечений гамма-всплесков в предположении его связи с GRB 850227. По горизонтальной оси — время в сутках в логарифмической шкале, по вертикальной оси — звёздная величина в фильтре *R*

ТРИАНГУЛЯЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ВСПЛЕСКА GRB 850227

По нашей просьбе кандидат физико-математических наук А. С. Позаненко (Институт космических исследований РАН, Москва) запросил локализацию GRB 850227 у коллег из Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе в Санкт-Петербурге. Они обнаружили, что этот всплеск был также зарегистрирован детектором космического аппарата SMM (*англ.* Solar Maximum Mission) на околоземной орбите (Messina et al., 1990) в 01:03:47 UT, за 154 с до PVO. Расстояние от Земли до Венеры в момент всплеска составляло 0,4288 а. е. (64,15 млн км, или 214 световых секунд). Геоцентрические координаты Венеры в момент всплеска 01:06 UT были таковы: 01h 00m 55s.98 +11° 48′ 21″.6 (в 173,8° от AT 1985V). Возможная область неба, в которой мог произойти гамма-всплеск, представляет собой кольцо с радиусом 43° и толщиной не более 5°. Она изображена на рис. 5. Положение AT 1985V отмечено звёздочкой. Видно, что оптический транзиент AT 1985V не попадает в кольцо триангуляции GRB 850227, находясь в 6° от его центра. Более того, для спутника SMM в момент гамма-всплеска (01:06 UT 27 февраля 1985 г.) наш транзиент оказался в области неба, закрытой Землёй. Это означает, что AT 1985V не связан с GRB 850227. Тем не менее, он мог быть вызван другим незарегистрированным гамма-всплеском 27 или 28 февраля, который был затенён для космических аппаратов подобно тому, как GRB 850227 находился за Землёй для спутника SMM.

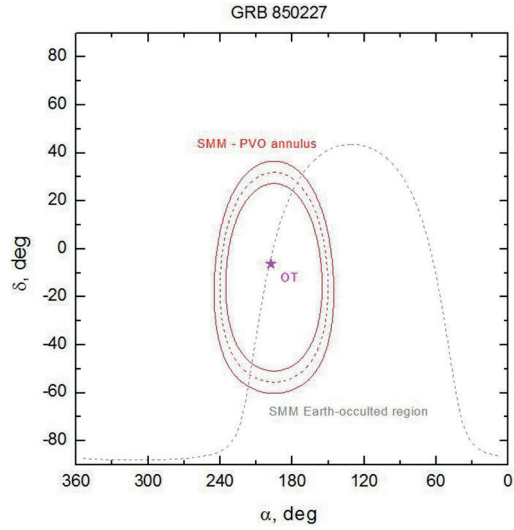


Рис. 5. Область локализации космического гамма-всплеска GRB 850227 по данным межпланетной сети (красное кольцо). Положение AT 1985V отмечено фиолетовой звёздочкой. Пунктирная линия — область неба, затенённая Землёй для SMM

ВЫВОДЫ

На снимке оцифрованного обзора неба DSS нами обнаружен объект 16-й величины, который совпадает с галактикой $23{,}5^{m}$ на более глубоких изображениях камеры тёмной энергии DECam. Абсолютная звёздная величина транзиента M около −27 исключает возможный вариант со вспышкой сверхновой в галактике. Однако вполне правдоподобным объяснением наблюдаемой яркости объекта выглядит

космический гамма-всплеск, произошедший за несколько часов до снимка DSS. Ближайшим по времени оказался GRB 850227, зарегистрированный за 1,6 сут до наблюдений в оптике. Однако триангуляция источника GRB 850227 по данным КА SMM на орбите Земли исключает возможное отождествление этого всплеска с нашим транзиентом. Тем не менее AT 1985V вполне мог быть связан с другим гамма-всплеском 27 или 28 февраля, не зарегистрированным детекторами на спутниках из-за затенения Землёй или технических перерывов в наблюдениях. На рис. 4 видно, что за последние 25 лет наблюдалось несколько десятков оптических послесвечений ярче 16-й величины, из них как минимум три были ярче 10^{m}. Не исключено, что никем не замеченные оптические послесвечения космических гамма-всплесков могут присутствовать на снимках Паломарского атласа неба DSS и других обзоров.

Авторы благодарят А. С. Позаненко (ИКИ РАН) за проявленный интерес к нашей работе и его коллег из ФТИ имени А. Ф. Иоффе за триангуляцию гамма-всплеска GRB 850227. Работа выполнена в рамках проекта «Центр открытия астрономических объектов» на занятиях кружка «Практическая астрофизика» Московского дворца пионеров (ГБОУ «Воробьевы горы»).

ЛИТЕРАТУРА

Буренин Р. А., *Сюняев Р. А.*, *Павлинский М. Н. и др.* Первые часы оптического послесвечения космического гамма-всплеска 030329 // Письма в Астрон. журн. 2003. Т. 29. № 9. С. 643–648.

Денисенко Д. В., *Терехов О. В.* Открытие оптического послесвечения космического гамма-всплеска 25 сентября 1992 года // Письма в Астрон. журн. 2008. Т. 34. № 5. С. 332–338.

Позаненко А. С., *Барков М. В.*, *Минаев П. Ю.*, *Вольнова А. А.* Космические гамма-всплески: многоволновые исследования и модели // Письма в Астрон. журн. 2021. Т. 47. № 12. С. 823–865.

Akerlof C., *Balsano R.*, *Barthelmy S. et al.* Observation of contemporaneous optical radiation from a gamma-ray burst // Nature. 1999. V. 398. P. 400–402. DOI: 10.1038/18837.

Bloom J. S., *Djorgovski S. G.*, *Kulkarni S. R.* The redshift and the ordinary host galaxy of GRB 970228 // The Astrophysical J. 2001. V. 554.Iss. 2. P. 678–686. DOI: 10.1086/321398.

Duncan K. J. All-purpose, all-sky photometric redshifts for the Legacy Imaging Surveys Data Release 8 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. 2022. V. 512. Iss. 3. P. 3662–3683. https://doi.org/10.1093/mnras/stac608.

Fenimore E. E., *Crider A.*, *int Zand J. J. M. et al.* The Pioneer Venus Orbiter Catalog of Gamma-Ray Bursts // https://arxiv.org/. 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.12859.

Klebesadel R. W., *Strong I. B.*, *Olson R. A.* Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin // Astrophysical J. 1973. V. 182. P. L85. DOI: 10.1086/181225.

Messina D. C., *Iadicicco A. J.*, *Leising M. D. et al.* A Catalog of Gamma-Ray Bursts Detected by SMM/GRS // Bull. American Astronomical Soc. 1990. V. 22. P. 893.

Racusin J. L., *Karpov S. V.*, *Sokolowski M. et al.* Broadband observations of the naked-eye γ-ray burst GRB080319B // Nature. 2008. V. 455. P. 183–188. DOI: 10.1038/nature07270.

DISCOVERY OF THE OPTICAL TRANSIENT AT 1985V — POSSIBLE GAMMA-RAY BURST AFTERGLOW

L. D. Konkov, D. V. Denisenko

State education center "Vorobyovy gory", Moscow, Russia

During the systematic checking of the area of sky in Virgo constellation an unusual object of 16th magnitude and the red color was found on the Palomar sky survey images. The optical transient is present on the red DSS plate taken at the Siding Spring observatory on 1985 February 28th at 17:06–18:41 UT. The deeper images of PanSTARRS and DECaLS surveys show the faint diffuse object near the transient position – a galaxy of 23.5 magnitude. The OT was submitted to Transient Name Server and has obtained the designation AT 1985V. The 7.5-magnitude difference between the transient and the galaxy is too high for a Supernova, but quite plausible for the gamma-ray burst optical afterglow. Search for the potential matches in gamma-ray burst catalogs has revealed the possible candidate GRB 850227 observed by Pioneer-Venus-Orbiter (PVO) on 1985 February 27th at 01:06:21 UT, 40 hours before the DSS image. We have supposed AT 1985V to be the optical afterglow of this gamma-ray burst. But the triangulation of GRB 850227 using the data from PVO and SMM has excluded this possibility. However, that does not preclude the possible relation of AT 1985V to another gamma-ray burst on February 28th not detected by spacecraft instruments. The earliest optical afterglow remains to be that of GRB 920925C detected by the instruments of GRANAT space observatory.

Keywords: Gamma-ray bursts, optical transients, afterglows

Konkov Leonid Dmitriyevich — 8th grade student, konkovleonid@yandex.ru
Denisenko Denis Vladimirovich — teacher of additional education, methodist, d.v.denisenko@gmail.com

УДК 523.43-852 DOI: 10.21046/KMU-2025-220-231

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДИФФУЗИИ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ МАРСА ПО ДАННЫМ ЗАТМЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ACS

Д. А. Коссова [1,2], *Д. А. Беляев* [1], *Е. Д. Стариченко* [1]

[1] Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» Москва, Россия

Исследуются высоты средней и верхней атмосферы Марса, а именно мезосфера (выше ~50 км) и термосфера (выше 100–120 км) вплоть до экзобазы для молекулы CO_2 (180–200 км). Эти высоты включают переходные области, где меняется режим диффузии атмосферных частиц: гомопаузу, находящуюся на высотах около 100–130 км и экзобазу, выше которой атмосфера считается бесстолкновительной для каждой молекулы в пределах её шкалы высот. Вариации высоты и температуры гомопаузы, а также экзобазы обусловлены сезонной изменчивостью, солнечной активностью, в том числе и вертикальным переносом энергии, вызванным глобальной циркуляцией и атмосферными волнами. Работа основана на анализе высотных профилей температуры и плотности CO_2, измеренных в режиме солнечных затмений спектрометрическим комплексом ACS (*англ.* Atmospheric Chemistry Suite) с борта орбитального аппарата TGO (*англ.* Trace Gas Orbiter) миссии «ЭкзоМарс-2016». Статистика анализируемых профилей покрывает сезоны за 2,5 марсианских года (MY): с середины MY 34 (май 2018 г.) по конец MY 36 (декабрь 2022 г.), охватывая диапазон атмосферных высот от 10 до 180 км. На основе обработанных высотных профилей были оценены коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузии (в приближении насыщения вертикальных гравитационных волн), а также получены сезонные вариации высоты и концентрации гомопаузы и CO_2 экзобазы. Установлено, что высота гомопаузы меняется от 100 км в афелии до 140 км в перигелии при вариациях концентрации CO_2 в пределах 10^{10}–10^{12} см$^{-3}$ и коэффициента диффузии $5{,}0\cdot10^{6}$–$1{,}5\cdot10^{8}$ см^2/с. Высота CO_2 экзобазы опускается до 150 км в афелии и поднимается до 200 км в перигелии. Полученные данные могут быть использованы для уточнения моделей циркуляции при расчётах вертикального переноса частиц в верхней атмосфере.

Ключевые слова: верхняя атмосфера, Марс, гомопауза, экзобаза

ВВЕДЕНИЕ

Марс обладает довольно разреженной атмосферой с давлением на поверхности около 6 мбар и концентрацией газовых частиц порядка 10^{17} см$^{-3}$. Основным компонентом атмосферы является углекислый газ (около 95 %), при этом также присутствуют азот, аргон и малые составляющие, включая угарный газ, кислород, озон и водяной пар. Климат Марса, а также физические и химические процессы в атмосфере сильно зависят от сезона (времени года), местного времени и географической широты, что обусловлено наклоном оси вращения планеты относительно нормали к плоскости эклиптики (25°), большим эксцентриситетом орбиты (~0,1) и низкой тепловой инерцией атмосферы. Пылевые бури также влияют на температурные профили атмосферы в зависимости от времени года.

По своей вертикальной структуре атмосферу Марса разделяют на нижнюю (до 80 км) и верхнюю. Первая включает в себя слои тропосферы и мезосферы, вторая — термосферу, экзобазу и экзосферу (Sanchez-Lavega, 2011). Несмотря на

Коссова Дария Андреевна — студент магистратуры, инженер, dakossova@edu.hse.ru
Беляев Денис Анатольевич — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, dbelyaev@cosmos.ru
Стариченко Екатерина Дмитриевна — аспирант, инженер, ekaterina.starichenko@cosmos.ru

довольно разреженную атмосферу, вертикальное перемешивание её слоёв учитывается как в моделях глобальной циркуляции (González-Galindo et al., 2015) с волновыми процессами (Medvedev et al., 2015), так и в фотохимических моделях (Krasnopolsky, 1993, 2019). Особый интерес в вертикальной структуре представляют переходные области, обусловленные сменой режимов перемешивания частиц. Это гомопауза, расположенная на высотах 100–130 км, в которой происходит эффективный фотолиз (распад) некоторых молекул (CO_2, H_2O) под действием солнечного излучения, а также экзобаза (около 200 км) — высота, на которой длина свободного пробега молекулы становится равной шкале высоты атмосферы.

Гомопауза разделяет две области с различными диффузионными свойствами. Ниже этого слоя, в так называемой гомосфере, атмосфера равномерно перемешана благодаря преобладанию турбулентной (вихревой) диффузии, которая вызвана ветрами, конвекцией и другими динамическими процессами в атмосфере. Выше гомопаузы, в гетеросфере, преобладает молекулярное перемешивание, индивидуальное для каждой газовой компоненты, что приводит к разделению газов на слои с ростом высоты: более тяжёлые молекулы задерживаются в нижних слоях гетеросферы, а более лёгкие поднимаются в верхние слои. Перемешивание частиц в указанных областях характеризуется коэффициентами турбулентной (в гомосфере) и молекулярной (в гетеросфере) диффузии. Эти параметры используются при описании вертикального переноса (потока) вещества в атмосферном столбе в уравнении неразрывности для i-й компоненты:

$$\Phi_i = -(K_{eddy} + D_i)\frac{\partial n_i}{\partial z} - n_i\left[K_{eddy}\left(\frac{mg}{kT} + \frac{1}{T}\cdot\frac{\partial T}{\partial z}\right) + D_i\left(\frac{m_i g}{kT} + \frac{1}{T}\cdot\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right]. \qquad (1)$$

где K_{eddy} и D_i (в см^2/с) — коэффициенты турбулентной и молекулярной диффузии; m (в г) — масса вещества; n (в см$^{-3}$) — концентрация вещества. Данное уравнение выведено из законов сохранения массы и импульса для движущейся в вертикальном направлении частицы (Krasnopolsky, 2019; Sanchez-Lavega, 2011). При этом гомопауза как диффузионная граница атмосферы может быть определена из условия равенства коэффициентов турбулентной и молекулярной диффузий ($K_{eddy} \approx D_i$).

Связь между коэффициентом K_{eddy} и фактическим атмосферным переносом сочетает в себе факторы турбулентного перемешивания и внутренних гравитационных волн (Fritts, Alexander, 2003). Физически она определяется колебаниями скорости ветра на характерном расстоянии, равном шкале высот атмосферы $H = kT/mg$ (Lindzen, 1981). На практике при моделировании одномерного вертикального переноса вещества на Марсе турбулентное перемешивание выражается через экспоненциальный рост с высотой (Korablev et al., 1993; Lindzen, 1971), параметризованный через концентрацию как $K_{eddy}(z) \sim n^{-0,5}$ с коэффициентом пропорциональности $A = K_0 n_0^{0,5}$ (Krasnopolsky, 1993, 2019; Yoshida et al., 2022):

$$K_{eddy} = K_0\left(\frac{n_0}{n(z)}\right)^{0,5}. \qquad (2)$$

Здесь K_0 (в см^2/с) — параметр турбулентной диффузии на определённой высоте; n (в см$^{-3}$) — высотный профиль концентрации; n_0 (в см$^{-3}$) — концентрация на определённой высоте. Коэффициент K_0 зависит от динамических процессов в атмосфере и, следовательно, зависит от сезона и географии.

Существует множество оценок параметра K_{eddy} (K_0) в нижних слоях атмосферы. В одной из первых работ (Anderson, Leovy, 1978) получены значения $K_0 = 2\cdot10^6$ см^2/с на высоте 35 км и $7\cdot10^6$ см^2/с на высоте 45 км на основе съёмок

поверхности Марса космическим аппаратом Mariner-9 в период после пылевой бури. Аналогичные измерения, проведённые аппаратом Viking, показали более низкое значение $K_0 = 10^5$ см^2/с в диапазоне 20–50 км (Kahn, 1990). Эксперимент по солнечному просвечиванию, выполненный спектрометром Auguste на борту космического аппарата Phobos, привёл к получению вертикального распределения плотности числа частиц пыли с подобранным коэффициентом диффузии $K_{eddy} = (1{,}1 \pm 0{,}5) \cdot 10^6$ см^2/с в диапазоне высот 15–30 км (Korablev et al., 1993).

На основе указанных данных была предложена одномерная фотохимическая модель (Krasnopolsky, 1993, 2006), в которой для высот ниже 30 км использовалось значение $K_{eddy} = 10^6$ см^2/с в афелии и $3 \cdot 10^6$ см^2/с в перигелии (при более тёплой и запылённой атмосфере). Сезонные изменения вертикального профиля $K_{eddy}(z)$ недавно наблюдались прибором NOMAD (*англ.* Nadir and Occultation for MArs Discovery) с борта космического аппарата «ЭкзоМарс» Trace Gas Orbiter (TGO) (Yoshida et al., 2022).

Большой разброс значений K_{eddy} в нижней и средней атмосфере также был получен при анализе фотохимии кислорода в модели, предложенной в 1995 г. авторами исследования (Rosenqvist, Chassefière, 1995). Было выявлено, что в зависимости от времени года, пылевой и солнечной активности параметр варьируется от 10^6 до $3 \cdot 10^6$ см^2/с ниже 35 км, от 10^5 до $7 \cdot 10^6$ см^2/с на высотах 35–65 км и от 10^7 до $4 \cdot 10^7$ см^2/с около 80 км. В 2022 г. был также выявлен диапазон значений K_{eddy} от $3 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^9$ см^2/с на высоте гомопаузы от 90 до 130 км, меняющийся в зависимости от времени года на Марсе (Belyaev et al., 2022). Эти величины были оценены по формуле (2) из вертикальных профилей плотности CO_2 и температуры, измеренных спектрометром ACS (*англ.* Atmospheric Chemistry Suite) на борту TGO.

Контактные измерения в верхней атмосфере масс-спектрометром NGIMS (*англ.* Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer) с борта аппарата MAVEN (*англ.* Mars Atmospheric and Volatile EvolutioN) показало большую изменчивость высоты гомопаузы: от 60 км в афелии до 140 км в перигелии (Slipski et al., 2018). Измерения проводились в 2015–2016 гг. во время аэроторможения аппаратом в нижних слоях термосферы. При анализе гомопаузы для оценки коэффициента турбулентной диффузии авторы статьи использовали подход, основанный на волновых эффектах в атмосфере с учётом колебаний скорости ветра (Lindzen, 1981). Такой подход требует информацию о параметрах атмосферных гравитационных волн на высотах 80–130 км. Согласно данным того же эксперимента с использованием альтернативного метода, основанного на анализе соотношения концентраций газов Ar и N_2, в статье (Rao et al., 2025) был установлен диапазон высот гомопаузы от 90 км в афелии до 140 км в перигелии. Из всех упомянутых источников только в работах (Slipski et al., 2018) и (Belyaev et al., 2022) приведены оценки коэффициента турбулентной диффузии на уровне высот гомопаузы. Здесь экспоненциальный рост коэффициента K_{eddy} по формуле (2) может не работать, поэтому актуальным является именно волновой подход.

Что касается экзобазы, то её высота определялась в немногочисленных работах (Fu et al., 2020; Gu et al., 2023; Rao et al., 2025) на основе регулярных прямых измерений NGIMS миссии MAVEN. Вариации высоты CO_2-экзобазы составили от 150 до 200 км (Rao et al., 2025), а для более лёгких компонент (N_2, Ar, H) она простирается на 30–50 км выше. В упомянутых работах показано, что вариации обусловлены не только положением Марса на орбите, разницей между афелием и перигелием, но и влиянием солнечной активности.

В настоящей работе приведены оценки коэффициентов диффузии для верхней атмосферы Марса, а также вариаций высоты гомопаузы и CO_2-экзобазы. Результаты получены на основе анализа высотных профилей температуры и плотности CO_2, измеренных прибором ACS с борта аппарата TGO. В работе пересмотрены данные по гомопаузе, представленные ранее в статье (Belyaev et al., 2022):

увеличена статистика с 1,5 до 2,5 марсианских лет, с середины MY 34 по конец MY 36, и применён волновой подход к высотным профилям для оценки коэффициента турбулентной диффузии. Кроме того, впервые по данным ACS представлена вариация высот CO_2-экзобазы.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Анализируемые в работе высотные профили температуры и плотности атмосферы были измерены российским спектрометрическим комплексом ACS с борта аппарата TGO (Korablev et al., 2018). Канал средней инфракрасной области, ACS-MIR, представляет собой эшелле-спектрометр, который с апреля 2018 г. по настоящее время измеряет спектры атмосферного пропускания в диапазоне длин волн 2,3–4,2 мкм в режиме солнечного просвечивания. Спектральная разрешающая способность ($\lambda/\Delta\lambda \approx 30\,000$) и соотношение сигнал/шум около 1000 позволяют регистрировать тонкие линии поглощения различных молекулярных составляющих атмосферы Марса (Korablev et al., 2018). Схема ACS-MIR со скрещенной дисперсией периодически настраивается на измерения около сильной полосы поглощения CO_2 2,7 мкм в течение сеанса просвечивания — на восходе или заходе Солнца. При каждом сеансе такого солнечного затмения в этой спектральной полосе восстанавливаются вертикальные профили плотности CO_2 и температуры в диапазоне высот от 10 до 180 км, охватывая слои тропосферы, мезосферы и термосферы (Belyaev et al., 2022). Алгоритм восстановления высотных профилей, подробно описанный в указанной статье, основан на высокой температурной чувствительности колебательно-вращательных линий поглощения молекулы CO_2 при соблюдении гидростатического равновесия для профиля давления.

В настоящей работе анализируются данные, полученные за 2,5 марсианских года: наблюдения с середины MY 34 (май 2018 г.) до конца MY 36 (декабрь 2022 г.). Каждому сеансу затмения на утреннем или вечернем терминаторе планеты соответствует тройка высотных профилей (температура, плотность, давление). Всего за указанный период наблюдений было обработано 968 сеансов солнечного просвечивания в полосе 2,7 мкм: 498 сеансов в Северном полушарии, 470 в Южном. Широтное покрытие данных показано на верхних панелях рис. 2–4 в зависимости от годовой координаты Ls (*англ.* Longitude of Sun), отражающей ареоцентрическую долготу Солнца от точки весеннего равноденствия в Северном полушарии ($Ls = 0$). Каждая точка на этих панелях соответствует одному сеансу наблюдений. Географические координаты затмений отсчитываются относительно тангенциальной точки для горизонтального луча зрения прибора над поверхностью (Belyaev et al., 2022). Высота в атмосфере отсчитывается относительно общепринятой модели ареоида поверхности Марса. Частота измеряемых точек по высотному профилю составляет 1–2 км при вертикальном разрешении 2–3 км.

МЕТОДЫ

Указанное выше вертикальное разрешение высотных профилей позволяет выявлять в них присутствие атмосферных гравитационных волн с характерной длиной от 20 до 40 км. Эти волны возникают при колебаниях плотности атмосферы в поле тяжести и генерируются, например, при взаимодействии атмосферных потоков с орографическими препятствиями на поверхности (Yiğit, Medvedev, 2019). На практике параметры волн анализируются по флуктуациям высотного профиля температуры (рис. 1*а*, *б*), что по данным ACS было представлено в работе (Starichenko et al., 2021). В настоящей работе для оценки коэффициента турбулент-

ной диффузии мы исследуем волновые числа и частоту Бранта – Вяйсяля для волн выше 80 км, где наступает их насыщение и диссипация (Starichenko et al., 2024).

Молекулярная диффузия

Молекулярная диффузия, преобладающая в слоях выше гомосферы, в термосфере, обусловлена кинетической энергией молекул, а также случайным изменением их направления движения вследствие столкновений друг с другом. Коэффициент молекулярной диффузии пропорционален среднеквадратичной тепловой скорости молекул и их средней длине свободного пробега между столкновениями (Jacobson, 2005). В нашем случае мы оцениваем этот коэффициент для молекулы углекислого газа в углекислотной атмосфере следующим образом:

$$D_i = \frac{3\pi\sqrt{2}}{16} l_i(z) V_i^{th}(z). \quad (3)$$

Здесь длина свободного пробега молекулы $l_i(z) = \left(Q_i n_i(z)\right)^{-1}$, средняя тепловая скорость $V_i^{th}(z) = 3kT(z) \cdot N_A / m_i$, где эффективное газокинетическое сечение $Q_{CO_2} = 0{,}52$ нм^2; m_i — молярная масса молекулы. Высотные профили концентрации CO_2 $n_i(z)$ и температуры $T(z)$ берутся из данных ACS с учётом погрешностей измерений (Belyaev et al., 2022). Характерные погрешности температуры показаны на рис. 1*а*, на высотах от 80 до 140 км они составляют в среднем 1–4 K.

Турбулентная диффузия

В данной работе рассматривается оценка коэффициента турбулентного перемешивания в области гомопаузы на основе рядов данных, полученных ACS, на основе учёта атмосферных гравитационных волн как механизма вертикального транспорта вещества. Внутренние (атмосферные) гравитационные волны представляют собой колебания плотности (а следовательно, и температуры) атмосферы в вертикальном и горизонтальном профилях. В вертикальном профиле такие волны возникают за счёт баланса флуктуаций, вызванных двумя силами, действующими на частицу в атмосферном столбе: силой тяжести и силой Архимеда. Сами флуктуации порождаются различными изменениями в атмосферном давлении, конвекционными и циркуляционными потоками в атмосфере или при взаимодействии горизонтальных ветров с рельефом (Starichenko et al., 2021). Внутренние гравитационные волны могут наблюдаться только в конвективно устойчивой атмосфере, чаще всего они изучаются по вертикальным профилям температуры. Вклад атмосферных волн в турбулентное перемешивание существенен и влияет на скорости потока. По мере уменьшения атмосферной плотности и давления с высотой амплитуда этих волн растёт. На больших высотах, где атмосфера становится сильно разреженной, амплитуда волны достигает своего предельного значения, выше волна диссипирует и передаёт всю свою накопленную потенциальную энергию атмосфере. Этот предел называется уровнем насыщения волны (Lindzen, 1971). На высотах, где происходит насыщение волн, турбулентное перемешивание может быть описано через волновые параметры по формуле, впервые предложенной в статьях (Lindzen, 1971, 1981) для земной атмосферы и адаптированной в работе (Slipski et al., 2018) для марсианской. Согласно данным прибора ACS, насыщение волн на Марсе наблюдается на высотах от 80 до 120 км (Starichenko et al., 2021, 2024), что позволяет применить формулу, предложенную в работе (Lindzen, 1981) для коэффициента турбулентной диффузии в верхней мезосфере Марса:

$$K_{eddy}(z) = \frac{k_h (c-u)^4}{2HB^3(z)\left(1 + l^2 / k_h^2\right)^{3/2}}.$$

Здесь H — шкала высот атмосферы (в км); k_h и l — волновые числа в горизонтальном зональном и меридиональном направлении соответственно (в км$^{-1}$); B — частота Брента – Вяйсяля (в с$^{-1}$), являющаяся резонансной частотой устойчивых колебаний воздушной массы (см. формулу (5)). Разность между фазовой и зональной скоростью ветра $|c - u|$ может быть выражена через дисперсионное соотношение B/ν (Fritts, Alexander, 2003; Lindzen, 1981), где ν — волновое число в вертикальном направлении (в км$^{-1}$).

Таким образом, для случая вертикально насыщенных гравитационных волн можно оценить коэффициент турбулентной диффузии как:

$$K_{eddy}(z) = \frac{1}{2H} \cdot \frac{k_h B(z)}{\nu^4 \left(1 + l^2 / k_h^2\right)^{3/2}}. \quad (4)$$

В расчётах волновые числа зональных и меридиональных волн предполагаются равными $k_h = l = 2\pi/300$ км$^{-1}$, что типично для моделей общей циркуляции (Yiğit, Medvedev, 2019). Все остальные значения в формуле (4) физически определяются из эксперимента.

На рис. 1*а* показан пример профиля температуры $T(z)$, измеренной ACS, и профиля температуры $T_{mean}(z)$, усреднённого (сглаженного) по методу (Starichenko, 2021). Рисунок 1*б* демонстрирует вид вертикальной атмосферной гравитационной волны в виде разности температур $\mathrm{d}T(z) = T(z) - T_{mean}(z)$. В процессе анализа была учтена длина волны основной гармоники, которая была оценена преобразованием Фурье для профиля $\mathrm{d}T(z)$ в диапазоне высот от 60 до 145 км. Пример периодограммы профиля $\mathrm{d}T(z)$ в пересчёте на длину вертикальных волн приведён на рис. 1*в*. Для упрощения вычислений в формуле (4) рассматриваются только основные гармоники волн со средним значением около 30 км.

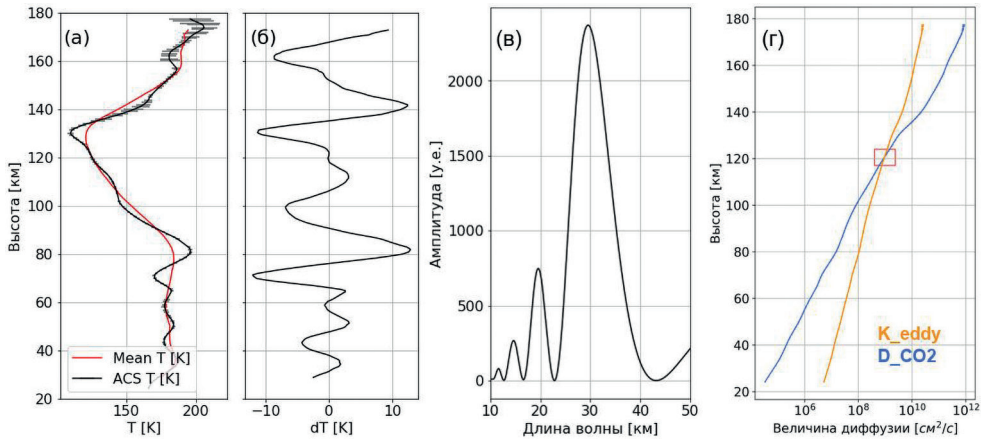


Рис. 1. Пример высотного профиля температуры T (чёрная линия с погрешностями) и усреднённый профиль температуры T_{mean} (красная линия) по данным ACS (*а*). Вертикальный профиль атмосферной гравитационной волны ($\mathrm{d}T = T - T_{mean}$) (*б*). Пример периодограммы профиля $\mathrm{d}T$ в пересчёте на длину вертикальных волн (*в*). Пример высотных профилей турбулентной (K_{eddy}) и молекулярной $\left(D_{CO_2}\right)$ диффузий с пересечением в области гомопаузы (с погрешностями) (*г*)

Атмосферная шкала высот рассчитывается как $H = RT(z)/\mu g$, где R — универсальная газовая постоянная; $T(z)$ — восстановленный профиль температуры.

Учитываются ускорение свободного падения $g(z) = 3{,}7\left[\frac{R_{mars}}{R_{mars}+z}\right]^2$ и молярная масса μ = 43 г/моль, соответствующая смеси газов в атмосфере Марса. Квадрат частоты Брента – Вяйсяля $B(z)$ определяется средним и адиабатическим градиентами температуры:

$$B(z) = \frac{g(z)}{T(z)}\left(\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g(z)}{C_p}\right), \quad (5)$$

где C_p — удельная теплоёмкость при постоянном давлении, которая эмпирически рассчитывается как $C_p = 0{,}0033T^2 - 0{,}27T + 656{,}3$, следуя (Magalhães et al., 1999).

На рис. 1*г* показан пример полученной пары высотных профилей D_{CO_2} по формуле (3) и $K_{eddy}(z)$ по формуле (4) для одного сеанса наблюдений. Область пересечения кривых, $K_{eddy} = D_{CO_2}$, соответствует гомопаузе, ниже которой преобладает турбулентная диффузия, а выше — молекулярная. Таким образом, для каждого сеанса затмений определяется высота, концентрация и коэффициент атмосферной диффузии в этой переходной области.

CO_2 экзобаза

CO_2 экзобаза определяется как высота, на которой длина свободного пробега молекулы углекислого газа l_{CO_2} становится сопоставимой со шкалой высоты атмосферы $H(z)$. Большинство профилей, полученных в рамках эксперимента ACS, не достигает указанных высот, поскольку ожидаемые значения экзобазы варьируются в пределах от 180 до 200 км. Данная область находится в термосфере, где, согласно данным ACS, температура нейтральной атмосферы остаётся постоянной. Для продления профилей плотности CO_2 до 200 км была применена глобальная модель циркуляции атмосферы Марса, известная как MPCM (*англ.* Mars Planetary Climate Model), разработанная в исследовании (González-Galindo et al., 2015). Эта математическая модель учитывает динамические и химические процессы, протекающие в атмосфере. В данной работе было использовано 968 высотных профилей плотности CO_2, охватывающих диапазон от 50 до 200 км, которые были рассчитаны с учётом геометрии эксперимента ACS. В ожидаемом диапазоне высот, согласно барометрическому закону, профили плотности в логарифмическом масштабе должны демонстрировать линейное убывание. В областях выше доступных наблюдений ACS было использовано модельное поведение для расчёта профиля плотности. В частности, верхние 20 км профиля были аппроксимированы линейным законом, что позволило вычислить коэффициент наклона профиля. Этот коэффициент, по определению, равен отрицательному значению атмосферной шкалы высоты. Определение шкалы высоты атмосферы также предоставляет возможность вычислить температуру в термосфере, которая сохраняется постоянной выше 180 км. Для удлинённого профиля была посчитана длина свободного пробега молекулы CO_2 l_{CO_2}. По аналогии с гомопаузой высота определялась как точка пересечения двух профилей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гомопауза

На рис. 2*а* представлена карта распределения высоты гомопаузы в зависимости от солнечной долготы Ls для обоих полушарий. Высота гомопаузы варьируется от 100 до 140 км за весь период наблюдений: минимальные значения высоты на-

блюдаются в период афелия, Ls = 60−120°, максимальные — в период перигелия, Ls = 240−300°. Цветовая шкала отражает концентрацию CO_2 на высоте гомопаузы, которая варьируется в диапазоне значений от 10^{10} см$^{-3}$ в высоких точках (синий цвет) до 10^{12} см$^{-3}$ в нижних точках (красный цвет).

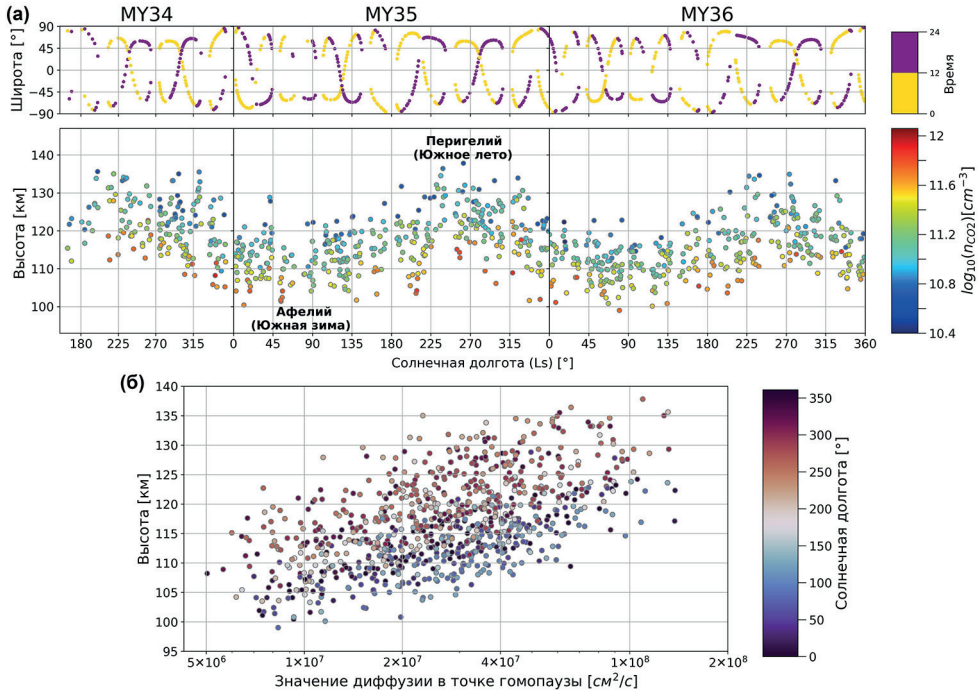


Рис. 2. Сезонное распределение высоты гомопаузы в зависимости от солнечной долготы Ls за 2,5 марсианских года (*а*). Цветовая шкала отражает соответствующую концентрацию CO_2. Верхняя панель показывает широтное покрытие измерений для утреннего (охровый) и вечернего (фиолетовый) сеанса затмения. Распределение высоты гомопаузы в зависимости от значения коэффициента диффузии (*б*). Цветовая шкала отражает сезонную координату Ls

Отметим, что те же значения концентрации в гомопаузе наблюдались в эксперименте NGIMS/MAVEN (Slipski et al., 2018, рис. 6), аналогичный диапазон высот был получен и в недавней статье (Rao et al., 2025). Локальные колебания высоты гомопаузы напрямую связаны с вариацией широты, на которой было сделано измерение. Диапазон диффузии в точке гомопаузы составляет от $5{\cdot}10^6$ до $1{,}5{\cdot}10^8$ см^2/с (см. рис. 2*б*). Максимальные значения высоты гомопаузы, превышающие 125 км, достигаются в течение короткого летнего периода в Южном полушарии (перигелий), что обусловлено максимальным расширением атмосферы вследствие её нагрева солнечными лучами. Минимальные значения, ниже 110 км, наблюдаются в южных широтах в течение продолжительного зимнего сезона (афелий), когда атмосфера получает наименьшее количество солнечного тепла. В Северном полушарии сезонная вариация высоты гомопаузы менее выражена, поскольку на перигелий приходится короткая зима, а на афелий – длинное лето.

Экзобаза

В рамках данной работы была получена аналогичная карта распределения высоты экзобазы в зависимости от солнечной долготы Ls для обоих полушарий Марса, представленная на рис. 3. Высота экзобазы CO_2 варьируется в пределах от 150 до 200 км, что соответствует более ранним результатам, полученным в рамках миссии MAVEN (Fu et al., 2020; Gu et al., 2023; Rao et al., 2025). В предыдущих исследованиях высота экзобазы определялась по методу, основанному на предположении, что высота экзобазы z^i_{exo} для данного вида молекулы *i* соответствует уровню, на котором общее количество столкновений с окружающими молекулами *j* составляет 1 в вертикальном столбе атмосферы выше данной высоты:

$$\int_{z^i_{exo}}^{\infty} \sum_j \sigma_{ij} n_j(z)\, dz = 1,$$

где σ_{ij} — эффективное сечение бинарных столкновений. Однако для данных, полученных в рамках эксперимента ACS, данный метод оказывается неприменимым, поскольку отсутствует возможность интегрирования на высотах выше 180–200 км.

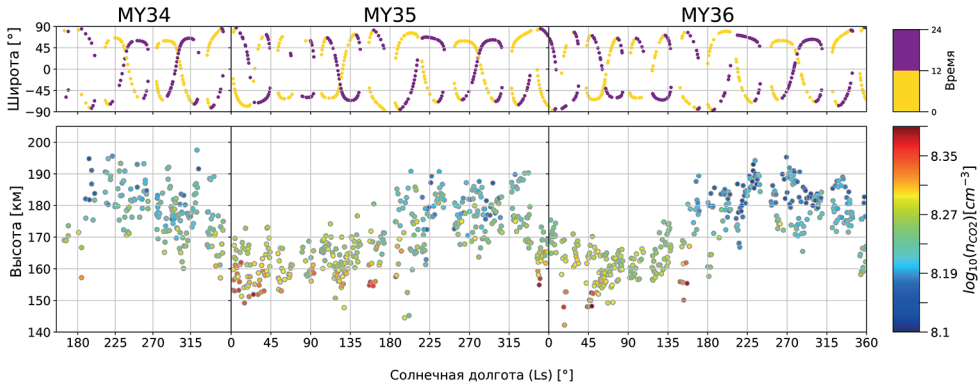


Рис. 3. Сезонное распределение высоты CO_2 экзобазы в зависимости от солнечной долготы Ls за 2,5 марсианских года. Цветовая шкала отражает соответствующую концентрацию CO_2. Верхняя панель показывает широтное покрытие измерений для утреннего (охровый) и вечернего (фиолетовый) сеанса затмения

Концентрация углекислого газа на этой высоте колеблется от $1 \cdot 10^8$ см$^{-3}$ в высоких точках (обозначенных синим цветом) до $3 \cdot 10^8$ см$^{-3}$ в более низких точках (обозначенных красным цветом).

Разница высот гомопаузы и экзобазы

Результаты работы показывают, что разница в высоте экзобазы и гомопаузы на Марсе остаётся стабильной в течение различных сезонов, составляя в среднем около 50 км. Рисунок 4 демонстрирует, что данная разница сохраняется как в Северном, так и в Южном полушарии. Кроме того, была проанализирована относительная концентрация CO_2 на этих высотах, и результаты показали, что концентрации CO_2 в экзобазе и гомопаузе различаются в среднем в 10^3 раза.

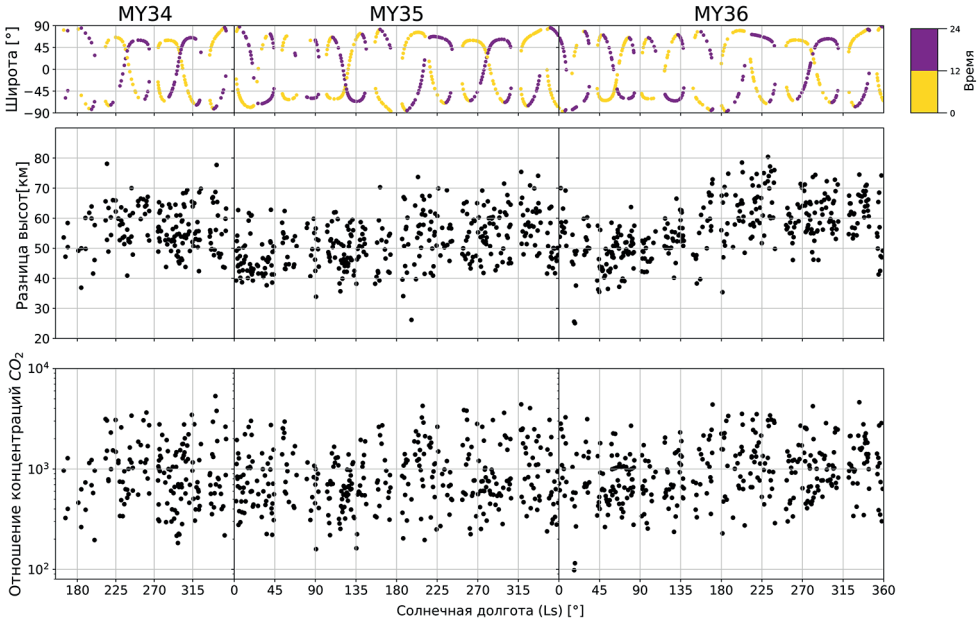


Рис. 4: Разница между высотами CO_2 экзобазы и гомопаузы (средняя панель) и отношение концентраций CO_2 на этих высотах (нижняя панель) за 2,5 марсианских года. Верхняя панель показывает широтное покрытие измерений для утреннего (охровый) и вечернего (фиолетовый) сеанса затмения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы было обработано 968 высотных профилей температуры и концентрации CO_2 по результатам эксперимента, выполненного спектрометром ACS-MIR в режиме солнечного просвечивания атмосферы Марса, за 2,5 марсианских года. По каждому из профилей были проанализированы параметры внутренних гравитационных волн в вертикальном направлении и вычислены коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузий на высотах мезосферы и термосферы, 70–160 км. По вертикальным профилям коэффициентов диффузии в этой переходной зоне была определена высота гомопаузы как область диффузионного разделения атмосферы. Кроме того, по анализу профилей выше 140 км была оценена высота CO_2 экзобазы и её сезонные вариации.

В зависимости от сезона высота гомопаузы меняется от 90–100 км в афелии до 130–140 км в перигелии; а CO_2 экзобазы — от 150 км в афелии до 200 км в перигелии. При этом концентрация CO_2 на высоте гомопаузы варьируется в диапазоне от 10^{10} до 10^{12} см$^{-3}$. Концентрация углекислого газа на высотах CO_2 экзобазы составляет порядка 10^8 см$^{-3}$. Диапазон значений диффузии в точке гомопаузы меняется от $5{,}0\cdot10^6$ до $1{,}5\cdot10^8$ см^2/с. Значения высоты и концентрации CO_2 хорошо согласуются с результатами экспериментов в предыдущие марсианские годы. Разница высот экзобазы и гомопаузы в среднем по сезону составляет 50 км. Полученные значения коэффициентов диффузии и высоты переходных областей могут быть использованы для уточнения моделей циркуляции и при вычислении по формуле (1) вертикального потока частиц в верхней атмосфере Марса.

Исследование выполняется при поддержке гранта РНФ № 25-22-00494, https://rscf.ru/project/25-22-00494/.

ЛИТЕРАТУРА

Anderson E., *Leovy C.* Mariner 9 Television Limb Observations of Dust and Ice Hazes on Mars // J. Atmospheric Sciences. 1978. V. 35. P. 723–734. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1978)035<0723:MTLOOD>2.0.CO;2.

Belyaev D. A., *Fedorova A. A.*, *Trokhimovskiy A. et al.* Thermal structure of the middle and upper atmosphere of Mars from ACS/TGO CO_2 spectroscopy // J. Geophysical Research: Planets. 2022. V. 127. Iss. 10. Article e2022JE007286. https://doi.org/10.1029/2022JE007286.

Fritts D. C., *Alexander M. J.* Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Reviews Geophysics. 2003. V. 41. Iss. 1. P. 1–68. DOI: 10.1029/2012RG000409.

Fu M., *Cui J.*, *Wu X. et al.* The variations of the Martian exobase altitude // Earth and Planetary Physics. 2020. V. 4(1). P. 4–10. https://doi.org/10.26464/epp2020010.

González-Galindo F., *López-Valverde M. A.*, *Forget F. et al.* Variability of the Martian thermosphere during eight Martian years as simulated by a ground-to-exosphere global circulation model // J. Geophysical Research: Planets. 2015. V. 120. P. 2020–2035. DOI: 10.1002/2015JE004925.

Gu H., *Cao Y.*, *Li Z. et al.* MAVEN-based investigation of Martian exobase temperatures: Diurnal and solar cycle variations // Reviews of Geophysics and Planetary Physics. 2023. V. 54. No. 1. P. 91–99. https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2022-051.

Jacobson M. Z. Fundamentals of Atmospheric Modeling. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press. 2005. 829 p. https://doi.org/10.1017/CBO9781139165389.024.

Kahn R. Ice haze, snow, and the Mars water cycle // J. Geophysical Research: Solid Earth. 1990. V. 95. Iss. B9. P. 14677–14693.

Korablev O. I., *Krasnopolsky V. A.*, *Rodin A. V.*, *Chassefiere E.* Vertical Structure of Martian Dust Measured by Solar Infrared Occultations from the Phobos Spacecraft // Icarus 1993. V. 102. Iss. 1. P. 76–87. DOI: 10.1006/icar.1993.1033.

Korablev O., *Montmessin F.*, *Trokhimovskiy A. et al.* The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 trace gas orbiter // Space Science Reviews. 2018. V. 214. Iss. 1. 62 p. https://doi.org/10.1007/s11214-017-0437-6.

Krasnopolsky V. A. Photochemistry of the Martian Atmosphere (Mean Conditions // Icarus. 1993. V. 101. Iss. 2. P. 313–332. DOI: 10. 1006/icar.1993.1027.

Krasnopolsky V. A. Photochemistry of the Martian atmosphere: Seasonal, latitudinal, and diurnal variations // Icarus. 2006. V. 185. Iss. 1. P. 153–170. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.06.003.

Krasnopolsky V. A. Spectroscopy and photochemistry of planetary atmospheres and ionospheres: Mars, Venus, Titan, Triton and Pluto. Cambridge Planetary Science Book Series. V. 23. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2019. DOI: 10.1017/9781316535561.

Lindzen R. S. Tides and Gravity Waves in the Upper Atmosphere // Mesospheric Models and Related Experiments. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 1971. P. 122–130. DOI: 10.1007/978-94- 010-3114-1_8.

Lindzen R. S. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown // J. Geophysical Research: Oceans 1981. V. 86. Iss. C10. P. 9707 9714. DOI: 10.1029/JC086iC10p09707.

Magalhães J. A., *Schofield J. T.*, *Seiff A.* Results of the Mars Pathfinder atmospheric structure investigation // J. Geophysical Research: Planets. 1999. V. 104. Iss. E4. P. 8943–8955. DOI: 10.1029/1998JE900041.

Medvedev A. S., *González-Galindo F.*, *Yiğit E. et al.* Cooling of the Martian thermosphere by CO_2 radiation and gravity waves: An intercomparison study with two general circulation models // J. Geophysical Research: Planets. 2015. V. 120. Iss. 5. P. 913–927. DOI: 10.1002/2015JE004802.

Rao N. V., *Leelavathi V.*, *Gupta N.* Exobase and homopause altitudes in the Martian upper atmosphere: Solar cycle variability and response to the 2018 global dust storm // Icarus. 2025. V. 435. Article 116565. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2025.116565.

Rosenqvist J., *Chassefière E.* A reexamination of the relationship between eddy mixing and O_2 in the Martian middle atmosphere // J. Geophysical Research: Planets 1995. V. 100. Iss. E3. P. 5541–5551. https://doi.org/10.1029/95JE00324

Sanchez-Lavega A. An introduction to planetary atmospheres. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 629 p. https://doi.org/10.1201/9781439894668.

Slipski M., *Jakosky B. Â. M.*, *Benna M. et al.* Variability of Martian turbopause altitudes // J. Geophysical Research: Planets. 2018. V. 123. Iss. 11. P. 2939–2957. DOI: 10.1029/2018JE005704

Starichenko E. D., *Belyaev D. A.*, *Medvedev A. S. et al.* Gravity wave activity in the Martian atmosphere at altitudes 20–160 km from ACS/TGO occultation measurements // J. Geophysical Research: Planets. 2021. V. 126. Iss. 8. Article e2021JE006899. https://doi.org/10.1029/2021JE006899.

Starichenko E. D., *Medvedev A. S.*, *Belyaev D. A. et al.* Climatology of gravity wave activity based on two Martian years from ACS/TGO observations // Astronomy and Astrophysics. 2024. V. 683. Article A206. 9 p. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348685.

Yiğit E., *Medvedev A. S.* Obscure waves in planetary atmospheres // Physics Today. 2019. V. 72. P. 40–46. DOI: 10.1063/PT.3.4226.

Yoshida N., *Nakagawa H.*, *Aoki S. et al.* Variations in vertical CO/CO_2 profiles in the Martian mesosphere and lower thermosphere measured by the ExoMars TGO/NOMAD: Implications of variations in eddy diffusion coefficient // Geophysical Research Letters. 2022. V. 49. Iss. 10. Artucle e2022GL098485. https://doi.org/10.1029/2022GL098485.

STUDY OF DIFFUSION REGIMES IN THE VERTICAL STRUCTURE OF MARTIAN UPPER ATMOSPHERE BASED ON SOLAR OCCULTATION DATA FROM THE ACS EXPERIMENT

D. A. Kossova [1,2], ***D. A. Belyaev*** [1], ***E. D. Starichenko*** [1]

[1] **Space Research Institute RAS, Moscow, Russia**
[2] **Higher School of Economics National Research University, Moscow, Russia**

This study investigates the altitudes of the Martian middle and upper atmosphere, specifically the mesosphere (above ~50 km) and thermosphere (above 100–120 km) up to the exobase for the CO_2 molecule (180–200 km). These altitudes include transitional areas where the diffusion regime of atmospheric particles changes, namely the homopause located at altitudes of approximately 100–130 km and the exobase, above which the atmosphere is considered collisionless for each molecule within its scale height. Variations in the altitude and temperature of the homopause, as well as the exobase, are influenced by seasonal variability, solar activity, and vertical energy transfer due to global circulation and atmospheric gravity waves. The research is based on the analysis of temperature and CO_2 density profiles measured during solar occultations by the Atmospheric Chemistry Suite (ACS) on board the Trace Gas Orbiter (TGO) of the ExoMars-2016 mission. The statistics of the analyzed profiles cover seasons spanning 2.5 Martian years, from mid-Year 34 (May 2018) to the end of Year 36 (December 2022), with atmospheric altitudes ranging from 10 to 180 km. Based on the processed altitude profiles, the coefficients of molecular and turbulent diffusion were evaluated (under the approximation of saturated vertical gravity waves), seasonal variations in the altitude and CO_2 density of the homopause and CO_2 exobase were obtained. It was found that the altitude of the homopause varies from 100 km at aphelion to 140 km at perihelion with CO_2 density ranging from 10^{10} to 10^{12} cm^{-3} and diffusion coefficients between $5 \cdot 10^6$ and $1.5 \cdot 10^8$ cm^2/s. The altitude of the CO_2 exobase decreases to 150 km at aphelion and rises to 200 km at perihelion. The obtained data could be utilized to refine circulation models in calculations of vertical particle transport in the upper atmosphere.

Keywords: upper atmosphere, Mars, homopause, exobase

Kossova Dariia Andreevna — master's degree student, engineer, dakossova@edu.hse.ru
Belyaev Denis Anatolyevich — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences, dbelyaev@cosmos.ru
Starichenko Ekaterina Dmitrievna — postgraduate, engineer, ekaterina.starichenko@cosmos.ru

УДК 524.387 DOI: 10.21046/KMU-2025-232-240

ИССЛЕДОВАНИЕ ВСПЫШЕК ВТОРОГО ТИПА В BE-РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ

Е. В. Кузнецова [1], ***А. С. Горбан*** [2]

[1] **Школа № 1158, Москва, Россия**
[2] **Институт космических исследований РАН, Москва, Россия**

Проведено исследование зависимости вспышек II типа от различных параметров для 21 Be-рентгеновской двойной системы. Для каждой из систем были получены значения светимости и пиковой светимости, а также фазы, на которых начинались вспышки. Было обнаружено несколько двойных систем с повторяющимися с фазой вспышками. Также было получено, что пиковая светимость зависит от геометрических размеров двойной системы — чем больше проекция большой полуоси системы, тем меньше наблюдается энерговыделения во время вспышки, что согласно аккреции Бонди может быть напрямую связано с темпом аккреции и со скоростью нейтронной звезды относительно звёздного ветра в системе.

Ключевые слова: вспышки второго типа, рентгеновские двойные, Be-рентгеновские двойные системы, нейтронная звезда, 1A 0535+262, 2S 1417-624, 4U 0115+634, EXO 2030+375, GRO J1008-57, XTE J1946+274, KS 1947+300, V 0332+53, RX J0209.6-7427, SMC X-3, GX 304-1, 4U 1901+03, XTE J1859+083, Swift J0243.6+6124, RX J0520.5-6932, 2S 1553-542, XTE J1858+034, SAXJ2103.5+4545, GS0834-430, GRO J1750-27, GRO J1744-28

Рентгеновские двойные — это системы, состоящие из компактного объекта и оптического компаньона. Под оптическим компаньоном понимается звезда, в которой всё ещё происходят термоядерные процессы и которая наблюдается в оптическом диапазоне. В качестве компактного объекта в таких системах могут выступать звёздные остатки, активно излучающие в рентгеновских и гамма-диапазонах — нейтронные звёзды, чёрные дыры, белые карлики. В нашей работе будут рассматриваться системы типа Be (BeXB), являющиеся подклассом HMXB (*англ.* high-mass X-ray binaries) — массивных рентгеновских двойных. Только у них регулярно наблюдаются вспышки I и II типа. О них мы будем говорить подробнее отдельно.

В Be-рентгеновских двойных системах в качестве компактного объекта выступают нейтронные звёзды, а компаньоном является оптическая звезда B класса с линиями излучения в оптическом спектре, на что указывает индекс “e”. Из-за быстрого вращения «звезды-донора» на её экваторе образуется экваториальный или декреционный диск. Вещество из него вытесняется в полость Роша оптического компаньона. Полость Роша — пространство вокруг каждой звезды в двойной системе, в котором происходят движения материи. Когда вещество оптического компаньона заполняет всю свою полость Роша, то через одну из точек Лагранжа вещество начинает переходить в полость Роша нейтронной звезды, в этом случае может возникнуть аккреция.

Аккреция — это процесс приращения массы небесного тела путём гравитационного притяжения материи (обычно газа) на него из окружающего пространства, который может также происходить в тесных двойных системах. Сам процесс аккреции часто описывается, как «падение» или «перетекание» вещества от оптического компаньона на поверхность компактного объекта. В процессе па-

Кузнецова Елизавета Витальевна — ученица, kukuruza_thephysicist@mail.ru
Горбан Алёна Сергеевна — инженер ИКИ РАН, магистр физико-математических наук

дения вещества на поверхность нейтронной звезды происходит выделение гравитационной энергии, которая затем переходит в тепло и уходит в виде излучения, которые мы можем зарегистрировать как вспышку. Процесс аккреции сопровождается нагревом падающей материи до экстремально высокой температуры, что приводит к интенсивному излучению в рентгеновском диапазоне спектра. Поэтому возникновение вспышек напрямую связано с аккрецией и возникающим вокруг нейтронной звезды аккреционным диском — структурой, в которой непосредственно происходят все процессы, приводящие к возникновению вспышек. Вспышки — выбросы избыточной аккрецирующей материи и энергии, накопившейся на поверхности магнитосферы нейтронной звезды. Так как сама аккреция зависит от скорости движения звезды относительно окружающего газа, моментом импульса падающего газа и наличием магнитного поля, то и вспышки имеют различную природу и характеристики.

В рентгеновских Be-системах различают вспышки первого (I) и второго (II) типа. Так как в таких системах не происходит переполнения полости Роша оптической звездой, то вспышки I типа возникают часто и регулярно только при прохождении нейтронной звездой периастра орбиты (периастр — ближайшая точка к оптическому компаньону на орбите нейтронной звезды) и в его окрестностях. Нейтронная звезда захватывает массу с диска компаньона только в короткий момент времени как раз при прохождении периастра, что и вызывает вспышку. Отличительной чертой вспышек I типа является то, что они повторяются с периодом и их светимость небольшая, по сравнению со вспышками II типа, и примерно равна $L_X \sim 10^{36-37}$ эрг/с ~ 10^{29-39} Вт. Чаще всего за одно прохождение периастра наблюдаются несколько вспышек I типа, идущих друг за другом (Reig, 2011).

Вспышки II типа представляют больший интерес. Их часто характеризуют как мощные всплески рентгеновского излучения. Светимость таких вспышек в разы больше: $L_X > 10^{37}$ эрг/с ~ 10^{30} Вт и может достигать эддингтоновского предела. Эддингтоновская светимость — предельная светимость звезды L_K, излучающей за счёт внутренних источников энергии, которая также даёт верхнюю границу светимости компактных рентгеновских источников, излучающих за счёт аккреции на нейтронные звёзды. Поэтому вспышки II типа считаются мощнейшими вспышками, которые могут происходит в двойных системах, а их длительность может достигать нескольких месяцев. Чаще всего регистрируются вспышки, возникающие по одной, в отличие от вспышек I типа. Такие мощные всплески чаще всего спонтанные и не имеют привязки к конкретной орбитальной фазе. Для многих вспышек характерно быстрое увеличение показателя светимости, а затем медленное и после этого быстрое угасание. Природа и механизм возникновения вспышек II типа до сих пор не имеет чёткого объяснения.

Исследование вспышек Be-рентгеновских двойных систем имеет большое количество научных результатов, полученных учёными за годы наблюдения этих объектов. В 1979 г. Ф. С. Грегори с коллегами (Gregory et al., 1979) обнаружили, что светимость рентгеновской двойной LS I +61 303 изменяется, и при этом наблюдаются периодические всплески, которые повторяются с орбитальным периодом системы. Таким образом пришли к выводу, что у системы наблюдаются вспышки I типа и из-за их переменности назвали «транзиентами». Дальнейшие исследования этих систем показали, что транзиенты также могут вспыхивать с большей светимостью вне зависимости от орбитальной фазы нейтронной звезды, что нехарактерно для вспышек I типа (Reig, 2011). Вспышки II типа чаще всего исследуется по отдельности, в частности учёных интересуют спектральные данные для более глубокого понимания физики происходящих процессов, например в работах С. В. Молькова с соавторами (Molkov et al., 2019) и А. С. Горбана с коллегами (Gorban et al., 2022) приводится сравнение физики процессов как во время вспышки, так и во время спокойного состояния источника GRO J2058+42.

Поиск закономерностей и зависимостей вспышек II типа в зависимости от параметров двойных систем — не сильно распространённая тема исследований, так как считается, что наблюдаемых величин, из-за которых возможно происхождение вспышки не было выявлено явно. Но, например, в работе П. Кречмара (Kretschmar et al., 2012) были представлены результаты систематического исследования большого количества вспышек двойных систем, которые наблюдались различными космическими миссиями. В работе сравниваются свойства вспышек и их связь с параметрами системы. Авторы пришли к выводу, что большинство вспышек имеют сложную форму, а также что не существует очевидной корреляции между продолжительностью вспышек и орбитальным периодом системы. И большинство вспышек происходят менее чем за половину орбитального периода, но некоторые гигантские вспышки продолжались до трёх орбит.

Но что интересно, в работе М. Кюнеля (Kühnel et al., 2013) для источника GRO J1008-57 после уточнения эфемерид орбиты выяснилось, что вспышки II типа также проявляют периодичность, что даёт возможность предсказывать их. Таким образом, перед нами стоит задача по поиску взаимосвязей орбитальных параметров и параметров вспышки для возможности более подробно изучить природу происхождения вспышек II типа и возможности предугадать вспышку для планирования наблюдений.

В рамках исследования вспышек II типа у Be-рентгеновских двойных систем была изучена научная литература, которая включает как теоретические работы, так и наблюдательные работы по исследованию природы Be-рентгеновских двойных (Reig, 2011). Также использовались данные наблюдений за рентгеновскими двойными, полученные измерения массы оптических компаньонов, расстояний до источников, орбитальных параметров, таких как время прохождения периастра, орбитальный период, эксцентриситет, долгота периастра, проекция большой полуоси, использовались специализированные базы данных астрономических наблюдений. Также были изучены методы обработки астрономических данных с помощью пакета AstroPy для языка программирования Python, изучены численные методы (метод Ньютона) для решения уравнения Кеплера, построения орбитального решения и поиска фаз вспышек на них. Использовались различные методы поиска и оценки вспышек II типа (отличительные свойства от вспышек I типа) по известным и полученным параметрам.

Вычислительный анализ данной работы предполагал разработку алгоритмов расчёта орбит и поиск фаз вспышек, а также визуализацию результатов и сравнение полученных результатов с результатами других работ.

Под нужды исследования подходили не многие источники рентгеновского излучения. Во время отбора мы пользовались информацией из научных статей. Нашей целью стали источники с уже известными орбитальными параметрами — орбитальный период, время прохождения периастра, долгота периастра, эксцентриситет, масса оптического компаньона, расстояние до системы. Список систем, фигурирующих в исследовании, можно увидеть в таблице, где каждой системе соответствует число, далее эти числа на изображениях будут обозначать номера систем для компактной записи и удобства.

Для того чтобы найти вспышки II типа, необходимо было построить графики кривых блеска систем, найти пик вспышки и рассчитать светимость. Вспышки II типа имеют светимость, превышающую 10^{37} эрг/с.

В ходе работы были произведены расчёты и построены орбиты движения нейтронных звёзд для всех выбранных нами двойных рентгеновских систем, пример такой орбиты представлен на рис. 1. Красными точками и цифрами от 1 до 4 обозначены моменты нахождения нейтронной звезды на орбите, когда произошла вспышка. Точкой «0» обозначена точка периастра. Синяя точка — положение центра масс системы.

Орбитальные параметры рентгеновских двойных, используемые в работе

№	Название двойной системы	Орбитальный период (день*)	Время прохождения периастра (день*) (MJD**)	Большая полуось, м	Долгота периастра, град	Эксцентриситет	Масса компаньона (масса Солнца)	Расстояние, м
1	XTE J1946+274	172,218	55599***	139703285428	274,70	0,2860	10–15	$2{,}93{\cdot}10^{20}$
2	XTE J1859+083	37,9859	57062,53***	63600969964,7	–116,47	0,1264	–	$2{,}08{\cdot}10^{20}$
3	XTE J1858+034	81	53436	56960567020	107,00	0,1	–	$3{,}36{\cdot}10^{20}$
4	V 0332+53	33,833	57225,068	23290876062,02	276,71	0,3694	6	$1{,}73{\cdot}10^{20}$
5	Swift J0243.6+6124	27,6943	58115,6***	34635322465,2	–74,05	0,1029	–	$1{,}6{\cdot}10^{20}$
6	SMC X-3	45,383	57677	58819280259,6	208,77	0,2200	20,5	$1{,}91{\cdot}10^{21}$
7	SAX J2103.5+4545	12,66528	52469,336	24226228530,98	241,36	0,4010	20	$1{,}66{\cdot}10^{20}$
8	RX J0520.5-6932	23,93	56666,41***	32257668480,8	233,50	0,0286	–	$1{,}54{\cdot}10^{21}$
9	RX J0209.6-7427	47,367983	58782,56	50919149406,38	65,69	0,3194	–	$1{,}69{\cdot}10^{21}$
10	KS 1947+300	40,443	56864,56	39179876336,02	40,44	0,0340	~2	$3{,}08{\cdot}10^{20}$
11	GX304-1	132,189	55425,6	180175267258	130	0,4620	9,9	6,2·10^19
12	GS0834-430	105,8	48809,6	38373434624	140	0,1300	15	$2{,}834{\cdot}10^{20}$
13	GRO J1750-27	29,817	49831,02	30518872224,4	206,3	0,3598	–	$4.32{\cdot}10^{20}$
14	GRO J1744-28	11,836397	56695,69	790552711,746	0	0	–	$2{,}31{\cdot}10^{20}$
15	GRO J1008-57	249,48	54424,71	158890002740	–26(8)	0,68(2)	3–8	$1{,}11{\cdot}10^{20}$
16	EXO 2030+375	46,0213	52756,17	73748944668	211,9	0,4100	20	$1{,}110843929261{\cdot}10^{20}$
17	4U1901+03	22,534777	5927,268***	31281244445,09	220,1	0,0150	–	$3.7{\cdot}10^{20}$
18	4U0115+634	24,316895	49282,13	42337590296,13	49,43	0,3411	18–19,5	$2{,}22{\cdot}10^{20}$
19	2S 1553-542	31,363796	57088,94***	60949905258,61	161,86	0,0368	–	$6.17{\cdot}10^{20}$
20	2S 1417-624	42,175	51612,17	56360982104	300,3	0,4460	5,9	$3{,}05{\cdot}10^{20}$
21	1A0535+262	111,143	54712	80044586286	161,3	0,4700	10–8	$6.17{\cdot}10^{19}$

Примечания: * 1 день = 86400 с; ** MJD — *англ.* Modified Julian Date; *** $T{\cdot}\pi/2$ — время, когда средняя долгота равна 90°; – информация отсутствует.

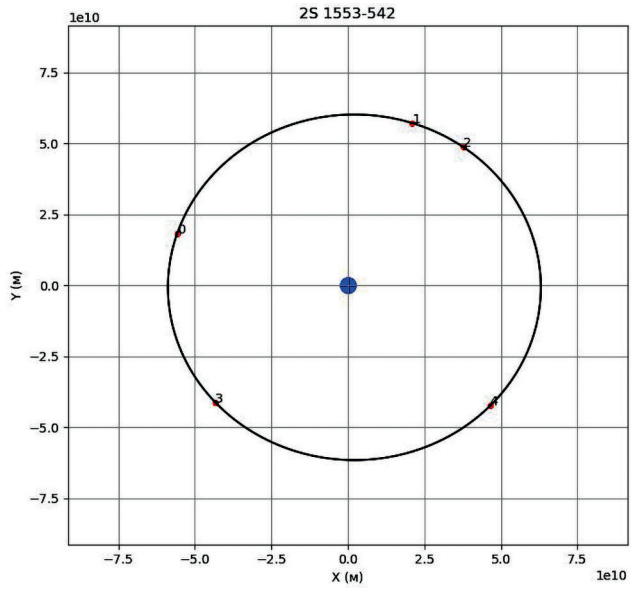


Рис. 1. Орбита 2S 1553-542

Для того чтобы вычислить положение каждой вспышки (фазу), необходимо было решить уравнение Кеплера:

$$E - e\sin E = M,$$

где E — эксцентрическая аномалия; e — эксцентриситет орбиты; M — средняя аномалия. Это уравнение мы решали с помощью численного метода Ньютона.

Для того чтобы построить зависимость светимости от фазы, за фазу мы приняли угол, равный истинной аномалии, мы провели вычисления для каждой из систем, зная расстояние до системы и их потоки во время вспышки; мы использовали следующую формулу для вычисления:

$$L \quad 4\pi D^2 F,$$

где L — полная светимость; D — расстояние до рентгеновской двойной; F — поток.

Полученный результат представлен на рис. 2. Цветами и числами обозначены вспышки определённых двойных систем, отобранных ранее. Пунктирной линией показана фаза, противолежащая периастру — апоастр. По графику видно, что вспышки некоторых систем лежат в пределах одних и тех же фаз, что несвойственно для вспышек II типа. Такое ранее наблюдалось для системы GRO J1008-57 (Kühnel et al., 2013). Таким образом, мы можем предположить, что среди этих двойных систем есть те, вспышки которых вероятно можно будет предсказать. Это даёт нам результат, который мы сможем использовать для дальнейшего исследования этих рентгеновских источников. Также большая часть вспышек лежит ближе к апоастру систем. Но всё же встречаются вспышки II типа и в районе периастра, это вспышки двойных № 1 (XTE J1946+274), № 3 (XTE J1858+034), № 8 (RX J0520_5-6932), № 20 (2S 1417-624) (см. рис. 2).

Для анализа также был построен график проекции большой полуоси от фазы вспышки (рис. 3). По графику видно, что зависимости практически не наблюдается. Ранее предполагалось, что чем шире система, тем вспышка должна быть ближе к периастру. Данный результат говорит нам, что фаза вспышки не зависит от размера системы.

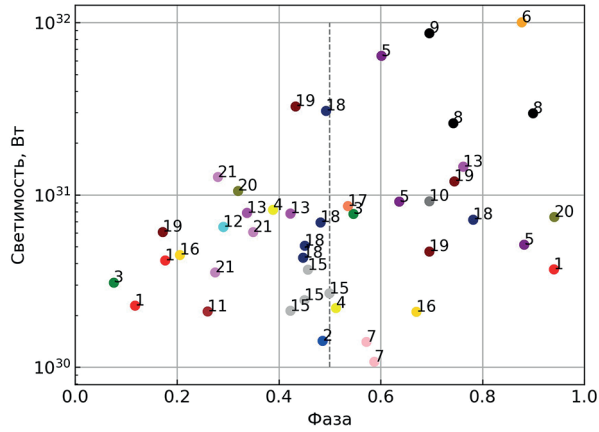


Рис. 2. Зависимость светимости от фазы

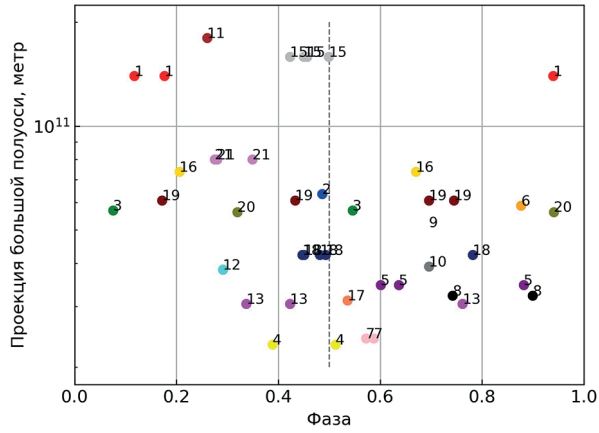


Рис. 3. Зависимость проекции большой полуоси от фазы

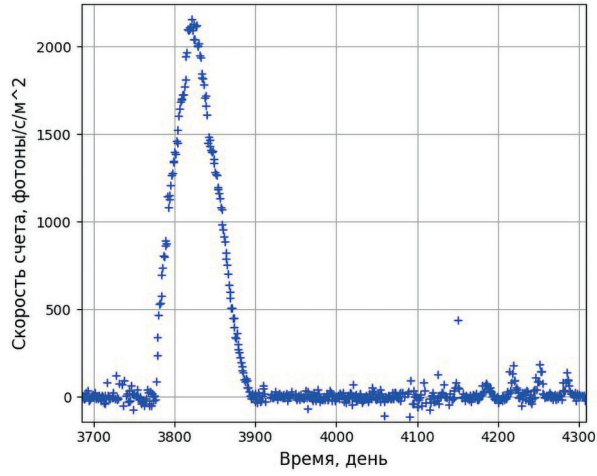


Рис. 4. Кривая блеска вспышки V 0332+53 за 2015 г.

Аналогично был проведён анализ полного энерговыделения от проекции большой полуоси; пиковая светимость рассчитывалось следующим образом:

$$E = \frac{(t_2 - t_1)L_{\max}}{2},$$

где t_2 — время конца вспышки; t_1 — время начала вспышки; $L_{\max}$ — максимальная светимость вспышки, пример вспышки II типа показан на рис. 4.

Была построена зависимость полного энерговыделения от массы компаньона (рис. 5), которая показала отсутствие корреляции между этими параметрами.

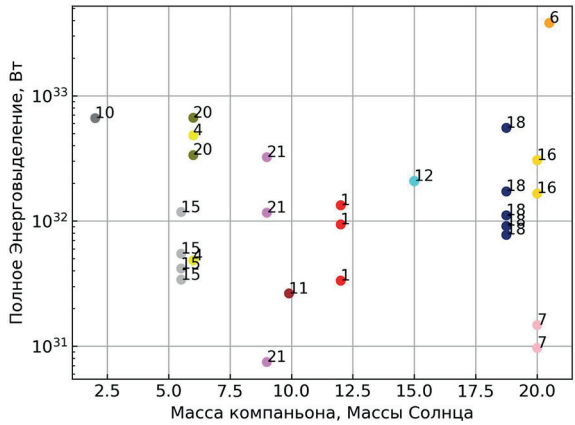


Рис. 5. Зависимость полного энерговыделения от массы компаньона

Также была исследована зависимость пиковой светимости от большой полуоси системы. Полученный результат показал, что пиковая светимость системы за время вспышки уменьшается с увеличением большой полуоси. Чтобы проверить этот результат были проведены теоретические расчёты, основываясь на теории для аккреции Бонди и взятых типичных параметров двойных систем с рентгеновскими пульсарами:

$$\dot{M}_{acc} = \frac{\pi R_G^2}{4\pi a^2}\dot{M}_w, \tag{1}$$

где M_{acc} — темп аккреции вещества; a — радиус орбиты системы; M_w — темп потери вещества звездой в виде ветра; R_G — теоретический радиус захвата вещества нейтронной звездой,

$$L_x = \frac{GM_xM_{acc}}{R_x},$$

где L — пиковая светимость; G — гравитационная постоянная; M_x — масса нейтронной звезды; R_x — радиус нейтронной звезды.

Таким образом было получено, что пиковая светимость действительно уменьшается с увеличением большой полуоси (рис. 6, сплошной линией показаны теоретические расчёты).

Таким образом, было проведено исследование зависимости вспышек II типа от различных параметров для 21 Be-рентгеновской двойной системы. Для каждой вспышки этих систем были рассчитаны орбитальные фазы начала вспышек, также были рассчитаны интегральные и пиковые светимости вспышек. Было обнаружено следующее: несмотря на то, что вспышки II типа не являются периодиче-

скими, некоторые из них происходят примерно в областях одних и тех же фаз. Это относится к системам V 0332+53, 4U 0115+634, GRO J1008-57, 1A 0535+262. Этот результат также согласуется с предыдущими работами (Kühnel et al., 2013), и говорит о достоверности полученных результатов проведённой работы, а также даёт вероятность того, что мы сможем предсказывать следующие вспышки II типа у этих рентгеновских двойных.

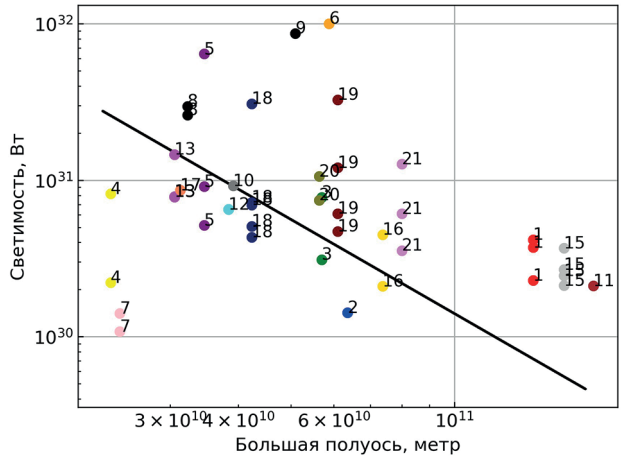


Рис. 6. Зависимость пиковой светимости от проекции большой полуоси

Также в работе было получено, что полное энерговыделение зависит от ширины двойной системы. Чем больше проекция большой полуоси системы, тем меньше мы наблюдаем энерговыделения во время вспышки. Этот результат также был проверен на теоретических данных и был тем самым подтверждён. Может говорить о том, что скорость нейтронной звезды относительно звёздного ветра, согласно аккреции Бонди, довольно мала, поэтому вещество звёздного ветра, падающее на неё, даёт светимость меньшую, чем в более узких системах. К тому же темп аккреции напрямую зависит от большой полуоси, по формуле (1), чем меньше большая полуось, тем больше темп аккреции и, соответственно, светимость и наоборот. Также это может быть связано с линейным размером декреционного диска Be-звезды, который может не пересекать орбиту нейтронной звезды или же быть недостаточно массивным, чтобы «кормить» нейтронную звезду, что требует дальнейшего более подробного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

Gorban A. S., *Molkov S. V.*, *Tsygankov S. S. et al.* Changes in the Nature of the Spectral Continuum and Stability of the Cyclotron Line in the X-ray Pulsar GRO J2058+42 // Astronomy Letters. 2022. V. 48. Iss. 4. P. 256–266. DOI: 10.1134/S1063773722040028.

Gregory P. C., *Taylor A. R.*, *Crampton D. et al.* The radio, optical, X-ray, gamma-ray star LSI+61 deg 303 // Astronomical J. 1979. V. 84. P. 1030–1036. DOI: 10.1086/112508.

Kretschmar P., *Nespoli E.*, *Reig P.*, *Anders F.* The Be X-ray Binary Outburst Zoo // Proceeding of science. 2012. https://doi.org/10.22323/1.176.0016.

Kühnel M., *Müller S.*, *Kreykenbohm I. et al.* GRO J1008-57: an (almost) predictable transient X-ray binary // Astronomy and Astrophysics. 2013. V. 555. 15 p. Article A95. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321203.

Molkov S., *Lutovinov A.*, *Tsygankov S. et al.* Discovery of a Pulse-phase-transient Cyclotron Line in the X-ray pulsar GRO J2058+42 // The Astrophysical J. Letters. 2019. V. 883. Iss. 1. Article L11. 6 p. DOI: 10.3847/2041-8213/ab3e4d.
Reig P. Be/X-ray Binaries. Foundation for Research and Technology-Hellas, 2011.

TYPE II OUTBURSTS IN BE X-RAY BINARIES

E. V. Kuznetsova [1], ***A. S. Gorban*** [2]

[1] **School No. 1158, Moscow, Russia**
[2] **Space Research Institute of the RAS, Moscow, Russia**

This work is a study of type II outbursts and their correlation with different orbital parameters in twenty one X-ray binaries. There have been calcualtions for each system's integrated and total luminosities and orbital phases of outbursts. We have discovered several systems with similar phases of outbursts and that a peak luminosity is proportional to a projection of a major semi-axis of a system. The bigger the major semi-axis — the less energy release we detect. According to Bondi accretion this can be connected to the accretion rate and the speed of the neutron star relative to the speed of a stellar wind in the system.

Keywords: type II outbursts, X-ray Binaries, Be X-ray Binaries, neutron star, 1A 0535+262, 2S 1417-624, 4U 0115+634, EXO 2030+375, GRO J1008-57, XTE J1946+274, KS 1947+300, V 0332+53, RX J0209.6-7427, SMC X-3, GX 304-1, 4U 1901+03, XTE J1859+083, Swift J0243.6+6124, RX J0520.5-6932, 2S 1553-542, XTE J1858+034, SAXJ2103.5+4545, GS0834-430, GRO J1750-27, GRO J1744-28

Kuznetsova Elizaveta Vitalienva — student, kukuruza_thephysicist@mail.ru
Gorban Alena Sergeevna — magister of physical and mathematical sciences

УДК 520.662 : [621.386.71+ 621.383.292] DOI: 10.21046/KMU-2025-241-249

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ С ФОТОКАТОДОМ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ИМИТАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В. А. Липилин, Н. П. Семена, М. В. Бунтов, А. В. Кривченко

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

От перспективных рентгеновских телескопах ожидается регистрация фотонов переменного рентгеновского излучения с качественно лучшей временно́й привязкой, чем у существующих телескопов. Для наземной отработки таких телескопов требуется соответствующая стендовая база, один из компонентов которой предполагается создать с применением с рентгеновской трубки с фотокатодом (ФРТ). ФРТ является относительно новым изделием, предназначенным в первую очередь для медицинских целей, биологии и других применений с высокой интенсивностью рентгеновского излучения. В статье приводятся результаты исследования работы ФРТ в качестве источника переменного рентгеновского излучения низкой интенсивности для имитации сигналов астрофизических объектов.

Ключевые слова: рентгеновская трубка с фотокатодом (ФРТ), переменное рентгеновское излучение, испытательный стенд, космические исследования

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения Вселенной проводятся с давних пор, используя различные диапазоны: видимый, радио-, инфракрасный и ультрафиолетовый. С того момента, как стало доступно выведение аппаратов в космос, начал изучаться и рентгеновский диапазон. Это очень интересный диапазон, поскольку в нём можно исследовать самые загадочные объекты Вселенной, обладающие колоссальной массой, включая чёрные дыры, и наблюдать процессы высочайшей энергетики, не воспроизводимые в лабораторных земных условиях.

Земная атмосфера поглощает рентгеновское излучение, и для изучения неба в этом диапазоне необходимо выведение исследовательских инструментов за пределы земной атмосферы. Такие инструменты периодически выводятся различными странами или консорциумами стран, например в 2019 г. Россия вывела в космос обсерваторию «Спектр-РГ» для получения детальной карты неба в рентгеновском диапазоне. ИКИ РАН играет ключевую роль в проекте «Спектр-РГ», в ходе работы телескопа ART-XC им. М. Н. Павлинского (Pavlinsky et al., 2021) этого проекта зарегистрировано множество источников рентгеновского излучения, в каталоге уже более 1400 объектов (Sazonov et al., 2024), и на момент написания этого материала работа «Спектр-РГ» продолжается.

Основное назначение миссии «Спектр-РГ» — обзорное, наземные калибровки детекторов телескопа ART-XC (*англ.* Astronomical Roentgen Telescope — X-ray Concentrator) проводились с помощью источников с постоянным рентгеновским потоком — это классические рентгеновские трубки с нитью накала, а также радиоизотопные источники (Pavlinsky et al., 2018, 2019). Эти источники не имитируют переменность рентгеновского потока, и для телескопа ART-XC этого было достаточно. Для новых перспективных инструментов, в частности для рентгеновской навигации, появились задачи, где нельзя обойтись без точной калибровки времен-

Липилин Василий Александрович — ведущий инженер, vlipilin@cosmos.ru
Семена Николай Петрович — доктор технических наук, semena@cosmos.ru
Бунтов Михаил Владимирович — начальник лаборатории, buntov@cosmos.ru
Кривченко Александр Викторович — ведущий инженер, krivchenko@cosmos.ru

ных характеристик (Сажин и др., 2018). На данный момент для развития экспериментальной базы очень важно воспроизведение переменности рентгеновского потока, при этом существенными являются и короткая периодичность, порядка единиц миллисекунд, и высокая временная стабильность этой периодичности.

РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА С ФОТОКАТОДОМ

Для решения обозначенной задачи в части воспроизведения переменности рентгеновского потока разрабатывается стенд, ключевым компонентом которого должна стать рентгеновская трубка с фотокатодом (ФРТ) (Лукьянов и др., 2016). ФРТ — изделие относительно новое, единичного производства, предназначенное в первую очередь для медицинских целей, биологии, для аппаратуры рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализа, а также перспективной рентгеновской связи. Информация о ФРТ представлена в режиме высокой интенсивности рентгеновского излучения (Аврамов и др., 2023; Гребенщиков, 2019).

В ИКИ РАН имеется образец ФРТ № 36 производства АО «ЦНИИ «Электрон», далее в настоящей статье речь идёт именно об этом образце. Другие образцы ФРТ могут быть изготовлены в других конфигурациях, с другим типом мишени или конструкцией выходного окна, например. ФРТ — это рентгеновская трубка с холодным катодом, в которой в качестве источника электронов используется фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) взамен традиционных катодов. Интенсивность рентгеновского излучения модулируется величиной светового потока, падающего на фотокатод ФЭУ.

Анод ФРТ выполнен из меди с мишенью из вольфрама. Линии характеристического рентгеновского излучения вольфрама соответствуют энергии примерно 59 и 67 кэВ. Для отработки перспективных рентгеновских телескопов стенд должен иметь возможность эмиссии излучения начиная с 2 кэВ. Выходное окно из бериллия толщиной 100 мкм слабо влияет на жёсткий спектр, но подавляет требуемое мягкое рентгеновское излучение примерно в пять раз. Согласно паспорту допускается подавать анодное напряжение ФРТ до 40 кВ включительно. Анодное напряжение определяет спектр тормозного излучения, а также влияет на его интенсивность (Иванов и др., 1989). Допустимый ток анода до 1 мА, указанный в документации ФРТ, даёт оценку максимальной мощности рентгеновского излучения в 0,4 Вт, что на несколько порядков больше требуемой. Для имитации астрономических объектов необходимо значительное ослабление производимого ФРТ потока рентгеновского излучения.

Источник электронов в ФРТ — фотокатод, а динодная система ФЭУ увеличивает число электронов, попадающих на анод. В системе 12 динодов, а также есть модулирующий и фокусирующий. Напряжение на динодах формируется с помощью делителя напряжения. Рекомендуемый производителем диапазон делителя напряжений ФЭУ от –900 до –1600 В. Чем больше это напряжение в абсолютном значении, тем большее число электронов производит ФЭУ и тем больше мощность рентгеновского излучения. Это напряжение влияет не только на количество электронов, но и на форму электростатического поля, которое определяет траекторию движения электронов. Также это напряжение влияет на скорость протекающих процессов. Эксперименты проводились в том числе и на пониженном, в абсолютном значении, напряжении делителя.

В документации производителя указано, что трубка работает на частотах вплоть до 1 МГц в импульсном режиме, обеспечивает импульсы 200 нс, время нарастания и спада 30 нс.

Зарубежным аналогом ФРТ является изделие MXS (*англ.* Miniaturized High-Speed Modulated X-Ray Source) от NASA (Iwakiri, 2015; патент US9117622B2), в нём

применён канальный умножитель вместо ФЭУ, что позитивно влияет на массогабаритные характеристики.

ПРЯМАЯ ЗАСВЕТКА

Схема установки для генерации и регистрации прямого рентгеновского излучения, с которой проводился эксперимент, показана на рис. 1. В этом эксперименте генератор задаёт модулируемый ток через светодиод (LED), который испускает фотоны света. Под действием фотонов света фотокатод эмитирует некоторое число электронов, далее число электронов увеличивается благодаря умножительной системе. Электроны разгоняются по направлению к аноду в электрическом поле, которое задаётся анодным напряжением U_a. Попадая на анод, электроны тормозятся, в результате чего на аноде выделяется как тепло, так и рентгеновское излучение. По пути к детектору оно проходит через 2,8 м атмосферы, а также два окна из бериллия (на выходе ФРТ и на входе детектора) толщиной 100 мкм каждое. У каждого рентгеновского фотона, который регистрирует детектор, записывается время регистрации. Далее по полученным данным профиль сигнала или «кривая блеска» восстанавливается методом наложения эпох. Этот метод необходимо применять ввиду крайне низкой интенсивности рентгеновского излучения, характерной для далёких астрономических объектов.

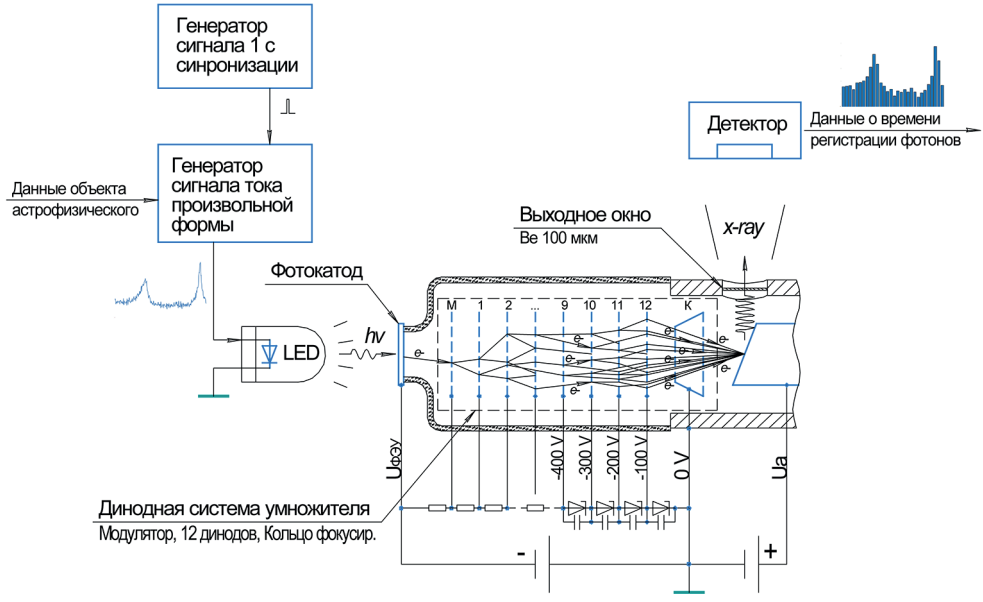


Рис. 1. Схема установки для генерации и регистрации прямого рентгеновского излучения

В этом эксперименте ФРТ вместе с детектором располагались в ёмкости со стальными стенками толщиной 5 мм, что достаточно хорошо защищает от естественного радиационного фона. Ввиду того что полированная нержавеющая сталь хорошо отражает фотоны света, а возможности по закрытию щели ёмкости, в которую пропущены кабели, весьма ограничены, гарантированной защиты фотокатода ФРТ от посторонней засветки в данных экспериментах нет. Это ограничивало возможности по снижению полезной яркости светодиода.

В этом эксперименте генератор и детектор не синхронизированы — сигнал синхронизации подавался только в генератор тока, а детектор тактировался по своему встроенному генератору тактовых импульсов.

В качестве детектора использовался узел рентгеновского детектора (УРД) № 29, аналогичный тем, что установлены в телескопе ART-XC. Этот детектор спроектирован для сбора данных с реальной небесной сферы, и его текущее мёртвое время, которое составляет примерно 0,7 мс, не является серьёзным ограничением. При высокой же интенсивности рентгеновского потока, которую выдаёт ФРТ в рекомендованном режиме, ошибка будет существенной. Например, при 300 регистрируемых событиях в секунду, примерно 20 % времени детектор игнорирует события, и чем больше поток, тем большую долю рентгеновских фотонов детектор игнорирует.

В данном эксперименте между светодиодом и фотокатодом был установлен светофильтр. Он подобран так, чтобы при напряжении на делителе ФЭУ ($U_{ФЭУ}$) −440 В, напряжении на аноде (U_a) 20 кВ и токе светодиода 10 мА скорость счёта детектора была близка к 300 событиям в секунду. Графики зависимости скорости счёта от тока светодиода при разном напряжении на делителе ФЭУ приведены на рис. 2.

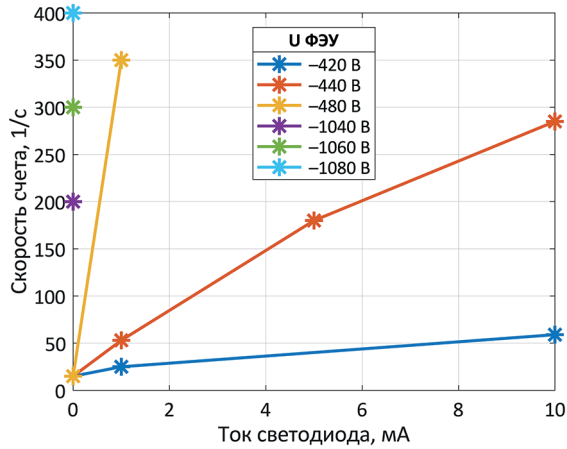


Рис. 2. Зависимость скорости счёта от тока светодиода при разном напряжении $U_{ФЭУ}$

При U_a = 20 кВ, и $U_{ФЭУ}$ в рамках рекомендованных производителем значений, проведены эксперименты с $U_{ФЭУ}$ равным −1040, −1060 и −1080 В. Темп счёта был крайне высоким, даже при обесточенном светодиоде. Таким образом для данной установки $U_{ФЭУ}$, равное −440 В, более приемлемое. Ток анода, измеренный встроенными средствами источника напряжения, находится на минимально возможном для регистрации уровне и составляет не более 20 мкА во всех приведённых на рис. 2 режимах.

Было проведено включение ФРТ без подачи напряжения на делитель ФЭУ и без подачи тока в светодиод — при U_a = 40 кВ был зафиксирован темп счёта 840 событий в секунду, что может свидетельствовать, например, о недостаточной для таких экспериментов чистоте внутреннего объёма ФРТ.

В следующем эксперименте на светодиод подавались импульсы тока амплитудой 10 мА длительностью 10 мкс и периодом 1,234568 мс при напряжении U_a = 20 кВ, $U_{ФЭУ}$ −440 В, с фильтром между светодиодом и фотокатодом, установленным как и ранее. В результате наложения эпох с периодом 1,234555 мс по-

лучена гистограмма распределения событий по времени, прошедшему от начала периода до момента регистрации события. Гистограмма показана на рис. 3.

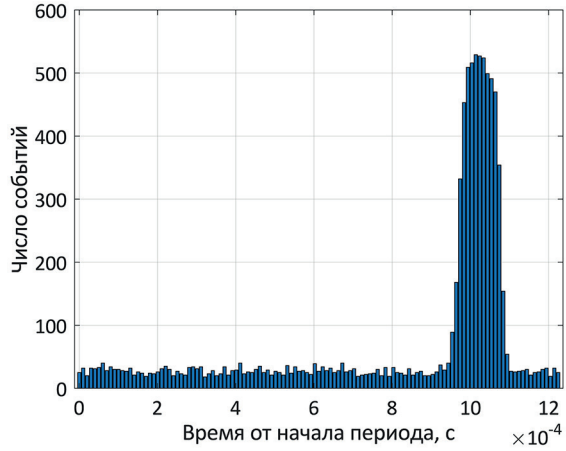


Рис. 3. Результат наложения эпох с периодом 1,234555 мс

Различие заданного и определённого периода оценивается в 10,5 ppm. Это соответствует типовой разнице между значениями частоты кварцевых генераторов, установленных в генераторе тока и детекторе, не синхронизированных между собой в данном эксперименте. Из гистограммы также видно, что диапазон моментов времени, в котором регистрируются основные события, лежит в пределах 111 мкс, что заметно больше, чем и заданная длительность импульса 10 мкс и «тик» часов детектора, близкий к 21 мкс.

Сниженное в абсолютном выражении напряжение делителя ФЭУ может приводить к нарушению нормального движения облака электронов внутри ФРТ, и в следующем эксперименте рентгеновский поток снижен изменением схемы эксперимента, что позволяет обойтись без понижения абсолютного значения напряжения делителя ФЭУ. Тем не менее в схеме эксперимента с прямой засветкой качественно удаётся получать переменность рентгеновского потока миллисекундной периодичности.

ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ МИШЕНИ

Второй вариант установки показан на рис. 4. В нём первичное рентгеновское излучение проходит через 100-мкм бериллиевое окно ФРТ, проходит через 0,7 м атмосферы и попадает на мишень. В данном случае использовалась медная мишень, поскольку её линии характеристического излучения находятся в интересующем диапазоне — около 8 кэВ. В результате флуоресценции мишени возникает вторичное рентгеновское излучение, которое проходит через 2,5 м атмосферы, проходит через 100-мкм бериллиевое окно детектора и попадает на чувствительную поверхность детектора. Детектор расположен так, чтобы первичное рентгеновское излучение от ФРТ не попадало в него непосредственно. Также была добавлена синхронизация детектора по тому же сигналу, что и генератор.

В этой серии экспериментов анодное напряжение снижено до 15 кВ для уменьшения интенсивности, которого вполне достаточно для получения характеристического рентгеновского излучения от медной мишени.

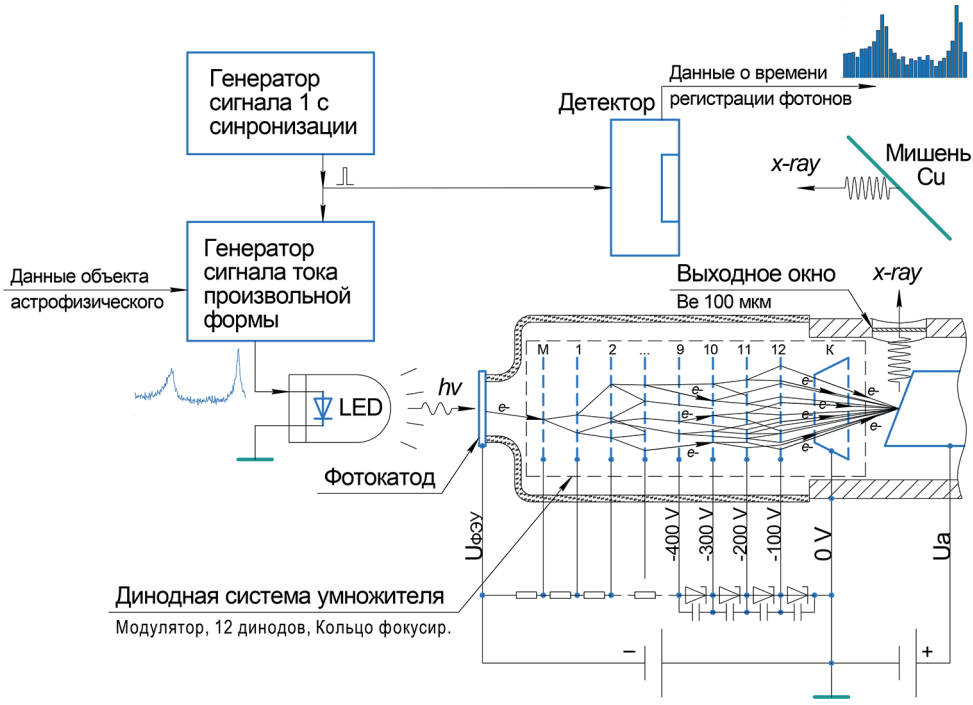


Рис. 4. Схема установки для генерации и регистрации рентгеновского излучения от флуоресцирующей мишени

Число фильтров между светодиодом и фотокатодом было увеличено до трёх для того, чтобы скорость счёта детектора оставалась приемлемой при токе светодиода 10 мА и напряжении $U_{ФЭУ}$ –920 В.

Для дальнейшего повышения абсолютного значения напряжения ФЭУ между светодиодом и фотокатодом к трём фильтрам добавлена диафрагма, значительно перекрывшая рабочую область фотокатода, оставив лишь центральную часть диаметром примерно 1 мм. Кроме того, был снижен ток светодиода до 3 мА. Это позволило установить $U_{ФЭУ}$ –1120 В, при этом скорость счёта детектора оставалась приемлемой.

Графики зависимости скорости счёта от тока светодиода и зависимости тока анода от тока светодиода приведены на рис. 5.

Некоторая нелинейность графиков тока анода связана с малой статистикой ввиду ограничения времени работы детектора в атмосфере, которая мешает охладить детектор до штатной температуры из-за выпадающего конденсата. Изгиб графиков скорости счёта отражает влияние мёртвого времени детектора. В будущих работах после снятия ограничений, связанных с работой в атмосфере, должна появиться возможность проводить более длительные экспозиции, что позволит получать приемлемую статистику и на низких скоростях счёта, что ближе к реальным условиям.

Далее на светодиод подавались импульсы тока амплитудой 3 мА длительностью 18 мкс и периодом 2 мс, при этом U_a = 15 кВ, $U_{ФЭУ}$ –1120 В, между светодиодом и фотокатодом установлены три фильтра и диафрагма. В результате наложения эпох с периодом 2 мс получена гистограмма распределения событий по времени, прошедшего от начала периода до момента регистрации события. Гистограмма показана на рис. 6.

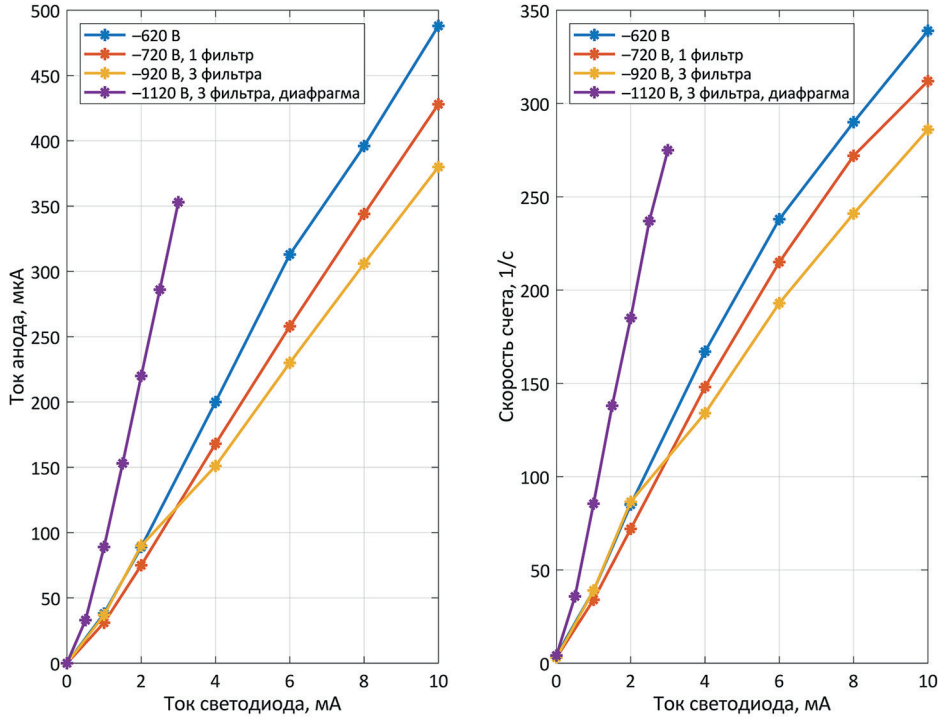


Рис. 5. Зависимости скорости счёта и тока анода от тока светодиода в экспериментах с флуоресцирующей мишенью

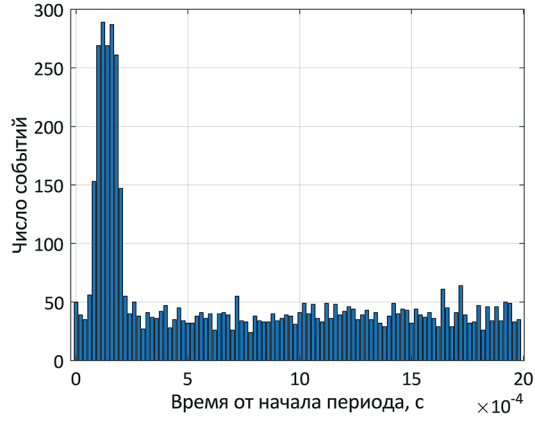


Рис. 6. Результат наложения эпох с периодом 2 мс

Как и в эксперименте с прямой засветкой, из гистограммы также видно, что диапазон моментов времени, в котором регистрируются основная масса событий, лежит в пределах 115 мкс. Таким образом из данного эксперимента не видно улучшения по этому показателю, несмотря на увеличение абсолютного значения $U_{\text{ФЭУ}}$ до рекомендованного. Тем не менее эксперимент показывает, что есть возможность использовать ФРТ по схеме с флуоресцирующей мишенью с переменностью единиц миллисекунд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для наземной отработки новых телескопов, разрабатываемых для решения перспективных задач астрофизики, требуются качественные калибровки по переменному рентгеновскому потоку. Для решения этих задач перспективно применение рентгеновской трубки с фотокатодом (ФРТ).

Имеющийся образец ФРТ был опробован в двух вариантах включения:

1) прямое направление в детектор первичного рентгеновского излучения ФРТ, образованного торможением разогнанных электронов о массивный анод;
2) направление излучения от медной мишени, флуоресцирующей в лучах первичного рентгеновского излучения ФРТ.

Для каждого варианта определены режимы ФРТ, в которых качественно показана возможность генерации и постоянного, и переменного рентгеновского излучения с параметрами, близкими к тем, что требуются для имитации астрофизических объектов.

В дальнейшем предполагается сборка установки, которая должна снять ограничения в части спектра на низких энергиях, а также устранить постороннюю засветку фотокатода. Работа в вакууме должна дать возможность проведения длительных экспозиций для накопления значительной статистики, что повысит качество данных и расширит возможности для экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

Аврамов В. В., *Коротков С. А.*, *Смелик Г. И.*, *Хасаев Т. О.* Разработка рентгеновского излучателя на основе трубки с катодным узлом — фотоэлектронным умножителем // 10-я Всероссийская научно-практ. конф. производителей рентгеновской техники. 2023.

Гребенщиков В. В., *Дмитриев А. С.*, *Нечаев А. И. и др.* Источник импульсного рентгеновского излучения и способ беспроводной передачи данных на его основе // Физ. основы приборостроения. 2019. Т. 8. № 4(34). DOI: 10.25210/jfop-1904-038047.

Иванов С. А., *Щукин Г. А.* Рентгеновские трубки технического назначения. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1989. 200 с.

Лукьянов В. Н, *Мамаева Г. А.*, *Филиппова О. А.*, *Фролов В. М.* Рентгеновская трубка с фотокатодом // 3-я Всероссийская научно-практ. конф. производителей рентгеновской техники. 2016. С. 20.

Сажин М. В., *Жаров В. Е.*, *Милюков В. К. и др.* Навигация по рентгеновским пульсарам в космическом пространстве // ВМУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2018. № 2. С. 18–30.

Iwakiri W. B., *Gendreau K.*, *Hayato A. et al.* Performance test of Modulated X-ray Source using UV-LED and Channel Electron Multiplier // RIKEN Accel. Prog. Rep. 48. 2015. P. 178.

Pavlinsky M. Tkachenko A., *Levin V. et al.* On-ground calibration of the ART-XC/SRG mirror system and detector unit at IKI. Part I // Experimental Astronomy. 2018. V. 45. Iss. 3. DOI: 10.1007/s10686-018-9582-5.

Pavlinsky M., *Tkachenko A.*, *Levin V. et al.* On-ground calibration of the ART-XC/SRG mirror system and detector unit at IKI. Part II // Experimental Astronomy. 2019. V. 47. P. 315–350. DOI: 10.1007/s10686-018-9610-5.

Pavlinsky M., *Tkachenko A.*, *Levin V. et al.* The ART-XC telescope on board the SRG observatory // Astronomy and Astrophysics. 2021. V. 650. Article A42. 18 p. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040265

Sazonov S., *Burenin R.*, *Filippova E. et al.* SRG/ART-XC all-sky X-ray survey: Catalog of sources detected during the first five surveys // Astronomy and Astrophysics. 2024. V. 687. Article A183. 18 p. DOI: 10.1051/0004-6361/202348950.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FRT OPERATION MODES FOR THE PURPOSES OF SIMULATION OF RADIATION OF VARIABLE ASTROPHYSICAL OBJECTS

V. Lipilin, N. Semena, M. Buntov, A. Krivchenko

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

In advanced X-ray telescopes it is expected to register photons of variable X-ray radiation with qualitatively better time reference than in existing telescopes. An appropriate test facility is required for ground tests. One of the components this facility is supposed to be created using a FRT (photocathode X-ray tube). The FRT is a relatively new product. It designed for medical purposes primarily. Work has been carried out to experimentally characterise the FRT to obtain the data of interest. A brief description of the testbed, the conditions, important limitations and first experimental results are reported.

Keywords: X-ray tube with photocathode (XRT), variable X-ray radiation, test facility, space research

Lipilin Vasily — lead engineer, vlipilin@cosmos.ru
Semena Nikolay — doctor of engineering sciences, semena@cosmos.ru
Buntov Mikhail — head of the laboratory, buntov@cosmos.ru
Krivchenko Aleksandr — lead engineer, krivchenko@cosmos.ru

УДК 520.6 DOI: 10.21046/KMU-2025-250-256

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ИМИТАТОРА ЛУННОГО РЕГОЛИТА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

А. М. Лысенко [1,3], ***Т. М. Томилина*** [1,3], ***П. Р. Савватимова*** [1,3], ***К. Н. Михайлов*** [2]

[1] **Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия**
[2] **Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия**
[3] **Институт космических исследований РАН, Москва, Россия**

Представлена методика определения оптимальных параметров сплавления объёмных образцов из порошка-имитатора лунного реголита методом селективного лазерного сплавления, основанная на исследовании качества сплавленных одиночных треков. Исследовано влияние различных параметров: толщины слоя сплавляемого порошка, его фракционности, мощности лазера и скорости движения лазерного пучка на качество одиночных сплавленных треков. Для тестовых образцов (5×6×7,5 мм) получены зависимости предела прочности на сжатие от величины перекрытия соседних треков и от объёмной плотности принятой порошком энергии. Установлено, что существует оптимальное значение этого параметра, соответствующее величине перекрытия около 10 % при шаге сканирования 200 мкм и плотности принятой порошком энергии в районе 15 Дж/мм^3, которое составляет 37,3 МПа.

Ключевые слова: лунный реголит, селективное лазерное сплавление, предел прочности на сжатие.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес учёных к свойствам лунного грунта вновь возрос в связи с обсуждением возможности создания из него элементов лунной инфраструктуры. Особый интерес представляет вариант использования природного реголита без добавок, требующих доставки с Земли. Принципиальная возможность такого подхода была рассмотрена и подтверждена в ряде исследований, в том числе в работах авторов, где применялся метод селективного лазерного сплавления (СЛС) порошка-имитатора реголита, например, (Томилина и др., 2023; Fatery, Gebhardt, 2015).

Метод СЛС изначально был разработан для изготовления деталей сложной формы из металлических порошков по заданной цифровой модели. Его преимущество для использования в космосе заключается в лёгкой регулировке параметров сплавления, возможности создания разнообразных объектов без изменения конструкции установки, а также в наличии опыта эксплуатации лазерных систем в подобных условиях.

Однако, как показали проведённые авторами исследования (Ким и др., 2024; Томилина и др., 2023, 2024), многочисленность параметров СЛС, каждый из которых может существенно повлиять на свойства конечного изделия, а также сложная морфология частиц и химический состав исходного порошка (лунного реголита) значительно затрудняют практическое применение этого метода.

Лысенко Артём Михайлович — младший научный сотрудник, аспирант, lysenko@imash.ac.ru
Томилина Татьяна Михайловна — заведующий лабораторией, кандидат технических наук
Савватимова Полина Романовна — инженер-исследователь
Михайлов Константин Николаевич — инженер

В связи с этим необходимы более детальные исследования применимости метода СЛС для создания образцов из лунного реголита с достаточной механической прочностью для обеспечения их функциональности.

В данной работе предлагается методика определения оптимальных режимов сплавления объёмных образцов, основанная на анализе качества сплавленных одиночных треков. Для исследований использовался порошок-имитатор реголита на основе измельчённой горной породы габбро-диабаза. В работе (Томилина и др., 2023) было показано, что для изучения возможностей метода СЛС необязательно применять имитатор, полностью воспроизводящий все природные свойства реголита, достаточно учитывать лишь ключевые характеристики, влияющие на процесс сплавления.

СТРАТЕГИЯ СПЛАВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

В соответствии с методом СЛС, лазерное сплавление порошка лунного реголита происходит послойно вдоль выбранной траектории, и конечный образец состоит из частично перекрывающих друг друга одиночных треков. При этом лазерный луч характеризуется параметрами мощности излучения (P), скорости движения лазерного пучка (V) и его диаметром (D), а стратегия сплавления задаётся траекторией сплавления, шагом сканирования (H) и толщиной слоя (h).

Следовательно, на качество полученного объёмного образца влияет, во-первых, качество одиночных треков, которое зависит от энергии, подаваемой в порошок, и от фракционности порошка, а во-вторых, величина перекрытия одиночных треков как между соседними слоями, так и в одном слое.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДИНОЧНЫХ ТРЕКОВ

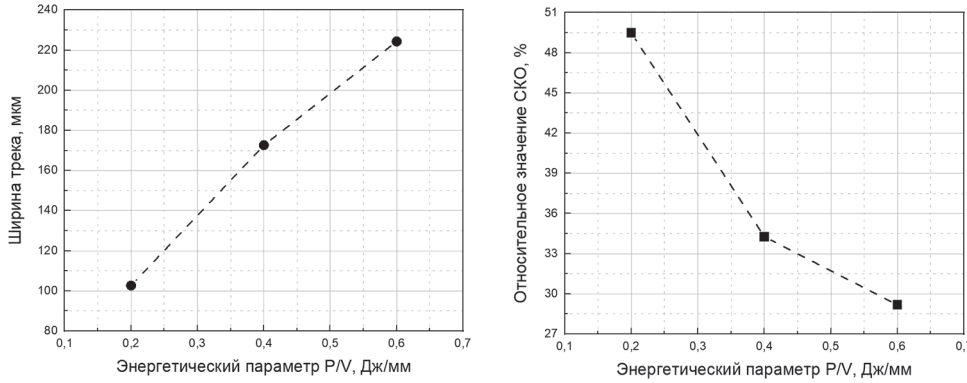
В ходе экспериментальных исследований было «напечатано» и проанализировано около 860 одиночных треков, по 8 копий каждого из 108 типов, отличающихся друг от друга набором параметров: мощности лазера, скорости движения лазерного пучка, толщины слоя порошка, фракционности порошка. Диаметр пучка лазера в данной работе не менялся и составлял 50 мкм.

Для анализа треков были введены «параметры качества»: средняя ширина треков, стандартное отклонение от среднего, количество мест с разбрызгиванием порошка и разрывом трека. Анализ проводился по следующей методике: с помощью микроскопа создавались увеличенные в 100 раз фотофрагменты треков в восьми местах по всей длине, затем с помощью программы, написанной на языке программирования Python, проводилась обработка изображений, и рассчитывалась ширина треков попиксельно по всей длине фрагмента.

Для каждого из 108 наборов параметров было получено примерно по 120 тыс. значений ширины трека, которые использовались для построения гистограмм распределения этого параметра. Форма гистограммы служит индикатором качества трека: узкое распределение свидетельствует о высокой однородности и качестве трека, тогда как широкое распределение указывает на нестабильность процесса сплавления.

Для каждого режима рассчитывались значения параметров качества и строились их соответствующие зависимости от параметров сплавления. Для примера на рис. 1 показаны графики зависимости средней ширины треков и относительного значения среднеквадратичного отклонения от энергетического параметра отношения мощности излучения к скорости движения лазерного пучка (P/V) для

толщины слоя 200 мкм и порошка с фракционностью 50–100 мкм. На основе полученных экспериментальных данных были разработаны рекомендации для дальнейших исследований по сплавлению объёмных образцов.



а *б*

Рис. 1. Зависимости ширины (*а*) и среднеквадратичного отклонения ширины (*б*) треков, напечатанных из ГД 50–100 при толщине слоя 200 мкм.

Оптимальные треки получались при использовании энергетического параметра $P/V = 0{,}6$ Дж/мм и низких значениях мощности лазерного излучения и скорости движения лазерного пучка (60 Вт, 100 мм/с), при толщине слоя 200 мкм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЁМНЫХ ОБРАЗЦОВ

Для исследования зависимости качества объёмных образцов от шага сканирования было напечатано 160 образцов для 16 значений расстояния между треками в диапазоне от 110 до 250 мкм, что соответствовало величине перекрытия треков от 51,1 до –11,1 % и плотности принятой порошком энергии от 27,3 до 12,0 Дж/мм^3. Общий вид подложки с девятью напечатанными образцами показан на рис. 2.

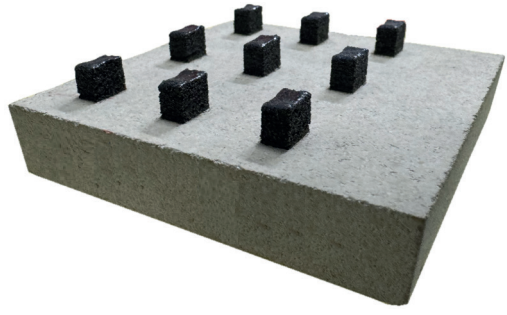


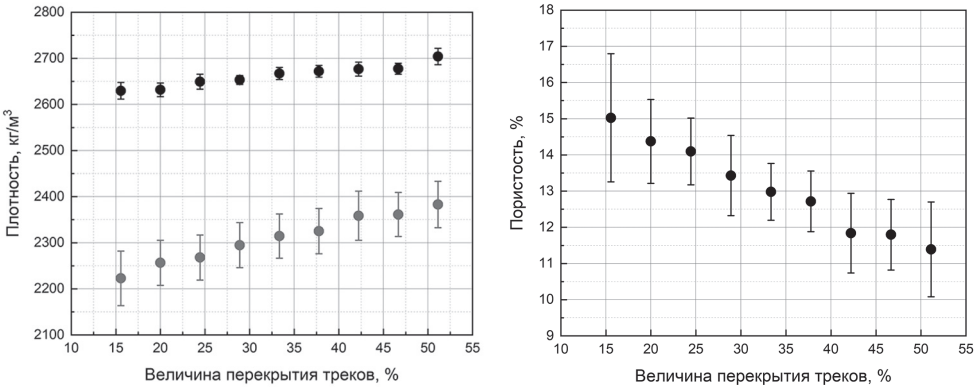
Рис. 2. Сплавленные образцы на подложке

Визуальный анализ полученных образцов и измерение их геометрических размеров показали, что большой процент перекрытия треков (>40 %) приводит к искажению геометрии и образованию трещин в затвердевшей стеклянной фазе

трека из-за термического разрушающего воздействия при переизбытке энергии сплавления, что приводит к повышению хрупкости образца.

Для первой серии сплавленных образцов, напечатанных с перекрытиями треков от 16,7 до 51,1 %, были определены значения объёмной плотности и истинной плотности, полученной пикнометрическим методом, а также рассчитаны значения открытой пористости.

На рис. 3 показаны зависимости плотностей образцов и их пористости от величины перекрытия соседних треков.



а *б*

Рис. 3. Зависимости истинной (чёрные точки) и объёмной (серые точки) плотности (*а*) и пористости (*б*) образцов от величины перекрытия соседних треков. Имитатор — ГД 50–100

Как видно на рис. 3, с увеличением перекрытия треков (т.е. с уменьшением шага сканирования и увеличением объёмной плотности принятой порошком энергии) растёт объёмная плотность на 7 % и истинная плотность на 3 %, а также уменьшается пористость образцов. Это говорит о том, что уменьшается объём как открытых, так и закрытых пор, что связано с более качественным проплавлением материала и уменьшением свободного пространства между частицами при увеличении объёмной плотности принятой порошком энергии вследствие большего наложения сплавляемых треков.

В сравнении с прошлыми исследованиями авторов в данной работе значительно увеличилась объёмная плотность образцов (на 25–35 %) и, как следствие, уменьшилась их пористость (на 60–70 %) при схожих значениях истинной плотности. Это означает, что используемый в данном исследовании системный подход к подбору параметров сплавления для создания образцов из имитатора лунного реголита приводит к качественному проплавлению материала и уменьшению пор в объёме образца, что, должно положительно сказываться на прочности изделия.

Для напечатанных на выбранных режимах тестовых образцов был проведён анализ их прочности на основе определения предела прочности на сжатие по стандартной методике.

На рис. 4 показан график зависимости предела прочности на сжатие образцов от величины перекрытия треков. Серыми точками показаны результаты измерения отдельных образцов, чёрными — усреднение по режимам. Образцы, напечатанные на режимах с величиной перекрытия >40 %, не проходили испытания на прочность, так как они разрушились при шлифовке граней, что свидетельствует о наличии дефектов, трещин и остаточных напряжениях внутри образцов.

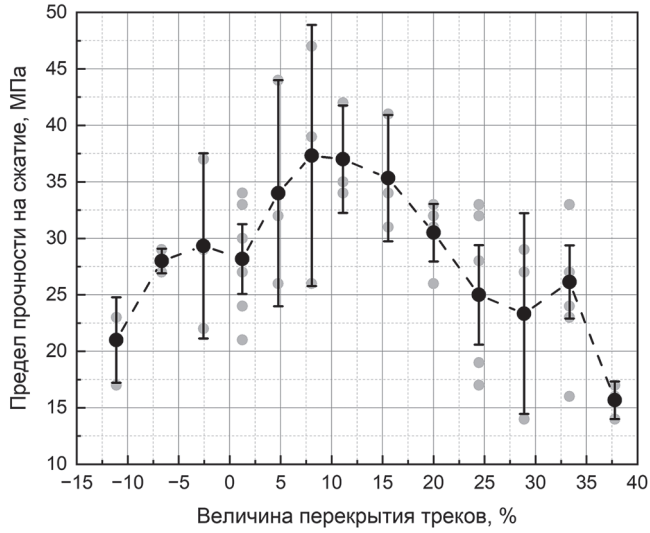


Рис. 4. Зависимость предела прочности на сжатие образцов от величины перекрытия соседних треков: серые точки — отдельные экспериментальные данные разных образцов; чёрные точки, соединённые пунктиром, — усреднение серых точек с одинаковым перекрытием

Как видно на графике, при увеличении величины перекрытия до 10 % прочность изделия растёт, что объясняется уменьшением пористости образцов и более качественным проплавлением материала. При дальнейшем увеличении перекрытия треков наблюдается общая тенденция уменьшения прочности, несмотря на уменьшение его пористости, — образец становится хрупким. Это, как уже отмечалось выше, связано с образованием большого количества трещин и локальных разрушений внутри образца при высоком значении плотности принятой порошком энергии.

Таким образом, предел прочности на сжатие достигает максимального значения при перекрытии треков около 10 %, что соответствует шагу сканирования примерно 200 мкм и плотности принятой порошком энергии порядка 15 Дж/мм^3. При этих параметрах пористость образцов мала, при этом большие разрушения в остывающем треке при повторном резком нагреве не возникают.

В таблице приведены экспериментальные значения предела прочности на сжатие, полученные авторами в оптимальном режиме сплавления при систематическом подборе параметров, а также данные предыдущих исследований (неоптимальный режим) и для сравнения — показатели земных строительных материалов. Полученные образцы демонстрируют прочность, сопоставимую со строительным кирпичом и бетоном.

Предел прочности на сжатие образцов из имитатора лунного реголита и земных строительных материалов

Оптимальный режим	37,3 МПа
Неоптимальный режим	20 МПа
Строительный керамический кирпич (ГОСТ)	10–30 МПа
Бетон для фундамента зданий	7,5–30 МПа

На рис. 5 приведено сравнение полученных результатов с данными других авторов (Caprio et al., 2020; Goulas et al., 2019). Как видно из графиков, полученные в исследовании результаты хорошо согласуются и в низкоэнергетической (серые ромбы), и в высокоэнергетической (серые квадраты) областях, а также демонстрируют изменение тенденций при переходе от зоны с низким значением плотности принятой порошком энергии к зоне высоких значений того параметра.

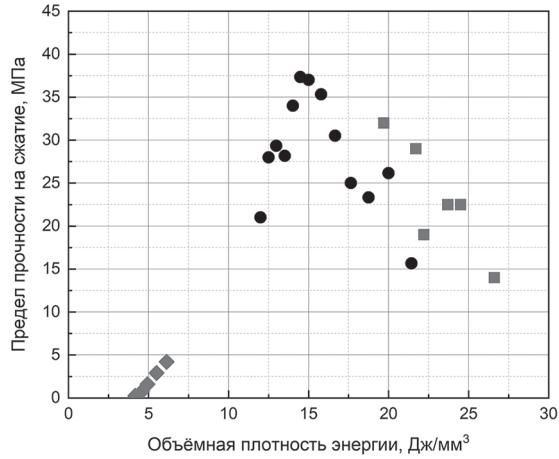


Рис. 5. Зависимость предела прочности на сжатие от объёмной плотности принятой порошком энергии для образцов, полученных в данном исследовании (чёрные круги) и в работах (Goulas et al., 2019) — серые ромбы и (Caprio et al., 2020) — серые квадраты

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на изучение влияния диаметра пучка лазера на качество объёмных образцов, а также на создание образцов больших размеров без ухудшения их прочностных характеристик. Для этих целей авторами была спроектирована и собрана лабораторная установка с волоконным непрерывным лазером Yb:YAG со сменными линзами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе проведённых исследований разработана методика определения оптимального набора параметров сплавления для создания объёмных образцов из имитатора лунного реголита, основанная на оценке сплавленных одиночных треков по параметрам качества. Среднее значение предела прочности на сжатие образцов, полученных при установленных оптимальных параметрах сплавления, составил 37,3 МПа, что в 1,9 раз выше, чем при не оптимальных.

В ходе экспериментальных исследований было изготовлено и проанализировано 864 одиночных трека при 108 комбинациях параметров сплавления, а также 190 объёмных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

Ким А. А., *Лысенко А. М.*, *Томилина Т. М.* Изучение свойств образцов из имитатора лунного реголита, полученных методом селективного лазерного сплавления // Косм. исслед. 2024. Т. 62. № 5. С. 542–551. DOI: https://doi.org/10.31857/S0023420624050111.

Томилина Т. М., *Ким А. А.*, *Лисов Д. И.*, *Лысенко А. М.* Эксперимент «Лунный-принтер» по лазерному сплавлению лунного реголита в космическом проекте «Лунагрунт» // Косм. исслед. 2023. Т. 61. № 4. С. 311–321. DOI: https://doi.org/10.31857/S0023420622600313.

Томилина Т. М., *Ким А. А.*, *Лисов Д. И.*, *Лысенко А. М.* Лабораторные испытания селективного лазерного сплавления имитаторов лунного реголита с различными гранулометрическими свойствами // Косм. исслед. 2024. Т. 62. № 5. С. 525–541. DOI: https://doi.org/10.31857/S0023420624050107.

Caprio L., *Demir A.*, *Previtali B.*, *Colosimo B.* Determining the feasible conditions for processing lunar regolith simulant via laser powder bed fusion // Additive Manufacturing. 2020. V. 32. Article 101029. https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.101029.

Fateri M., *Gebhardt A.* Process parameters development of selective laser melting of lunar regolith for on-site manufacturing applications // Intern. J. Applied Ceramic Technology. 2015. V. 12. Iss. 1. P. 46–52. https://doi.org/10.1111/ijac.12326.

Goulas A., *Binner J.*, *Engstrom D. et al.* Mechanical behaviour of additively manufactured lunar regolith simulant components // Proc. Institution of Mechanical Engineers. Part L: J. Materials: Design and Applications. 2019. V. 233. No. 8. P. 1629–1644.

EXPERIMENTAL STUDIES OF PHYSICAL CONDITIONS FOR THE CREATION OF SAMPLES FROM A LUNAR REGOLITH SIMULATOR BY SELECTIVE LASER MELTING

A. M. Lysenko [1,3], ***T. M. Tomilina*** [1,3], ***P. R. Savvatimova*** [1,3], ***K. N. Mikhailov*** [2]

[1] **A. A. Blagonravov Institute for Mechanical Engineering RAS, Moscow, Russia**
[2] **Baltic State Technical University "VOENMEKH" named after D. F. Ustinov Saint Retersburg, Russia**
[3] **Space Research Institute RAS, Moscow, Russia**

The paper presents a technique for determining the optimal parameters for fusing bulk samples of lunar regolith simulant powder using selective laser melting, based on studying the quality of fused single tracks. The influence of various parameters, such as the thickness of the powder layer, its fractionality, laser power, and laser beam speed, on the quality of single fused tracks was studied. For test samples ($5 \times 6 \times 7.5$ mm^3), the dependences of the compressive strength of the bulk sample on the overlap of adjacent tracks and on the volumetric density of the energy received by the powder were obtained. It was found that there is an optimal value of this parameter corresponding to an overlap of about 10 % with a scanning step of 200 μm and an energy density of the powder accepted in the region of 15 J/mm^3, which is 37.3 MPa.

Keywords: lunar regolith, selective laser melting, strength

Lysenko Artem Mikhailovich — junior researcher, postgraduate, lysenko@imash.ac.ru
Tomilina Tatiana Mikhailovna — head of the laboratory, candidate of technical sciences
Savvatimova Polina Romanovna — leading research engineer
Mikhailov Konstantin Nikolaevich — engineer

УДК 556.131.11 : [621.396.969:629.78] DOI: 10.21046/KMU-2025-257-260

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕГО ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТЕРРИТОРИЙ СРЕДНЕАЗИАТСКИХ РЕСПУБЛИК ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО РАДИОТЕПЛОВИДЕНИЯ

В. В. Мартьянова [1], ***Д. М. Ермаков*** [2]

[1] **Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Москва, Россия**

2. Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Апробирована методика расчёта водного баланса атмосферы, основанная на спутниковом радиотепловом мониторинге, который позволяет оценить разницу между осадками и испарением (эффективное увлажнение) на заданной территории. На примере территорий Казахстана и Узбекистана были получены ряды данных за 12-летний период, демонстрирующие сезонную динамику эффективного увлажнения, которая соответствует климатическим особенностям регионов и качественно сходится с официальной статистикой. Полученные результаты подтверждают перспективность применения методики и предлагают уникальные количественные оценки атмосферного водного баланса и эффективного увлажнения для исследуемых территорий по данным фактических спутниковых наблюдений.

Ключевые слова: водный баланс атмосферы, микроволновая радиометрия

Страны Средней Азии занимают территорию, на которой ярко проявляются современные изменения климатических условий. Главные реки региона — Амударья и Сырдарья, питаются талыми водами ледников Памира и Тянь-Шаня, площадь которых сокращается из-за глобального потепления. При этом водные ресурсы играют значительную роль в экономике и экосистеме, а из-за интенсивного водозабора для нужд сельского хозяйства проблема дефицита воды усугубляется, особенно в низовьях рек.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью точного мониторинга водного баланса для поиска механизмов перераспределения влаги на исследуемой территории и прогнозирования дальнейших изменений. Традиционные методы гидрологических наблюдений имеют ограниченное пространственное покрытие, в то время как спутниковое радиотепловидение позволяет получать глобальные данные, обновляемые регулярно с высокой периодичностью (Ермаков и др., 2023). Целью работы стал анализ многолетнего гидрологического режима среднеазиатских республик в период 2012–2023 гг. на основе спутниковых данных, а также оценка эффективного увлажнения на территории каждой страны. Исследование основано на данных пассивных микроволновых радиометров SSMIS (*англ.* Spectrally Scaning Microwave Imager/Sounder), которые устанавливаются на спутники серии DMSP (*англ.* Defense Meteorological Satellite Program) и позволяют измерить яркостную температуру Земли в различных частотных диапазонах, включая линии поглощения водяного пара (Кутуза и др., 2016). Преимуществом таких данных состоит в том, что их получение не зависит от погодных условий, наличия облачности и солнечного освещения. В результате обеспечивается регулярное глобальное покрытие с периодичностью 12 ч, которое улучшается до 3 ч с помощью интерполяционных алгоритмов спутникового радиотепловидения.

Мартьянова Валерия Викторовна — студент магистратуры, факультет космических исследований, vvmartianovav@mail.ru

Ермаков Дмитрий Михайлович — ведущий научный сотрудник, заведующий отделом, доктор физико-математических наук, d.m.ermakov@cosmos.ru

Методика расчёта водного баланса построена на расчёте интегрального влагосодержания в атмосфере над заданной территорией и горизонтального переноса водяного пара через границы территории. Для суши применены, в том числе, нейросетевые методы восстановления полей интегрального влагосодержания. Полученные поля в дальнейшем обрабатываются алгоритмами спутникового радиотепловидения, что позволяет определить эффективную скорость горизонтального переноса водяного пара (Ермаков и др., 2023). Получив данные о том, сколько влаги содержится в атмосфере, с какой скоростью и в каком направлении она перемещается, можно рассчитать эффективное увлажнение (или, с противоположным знаком, эффективное испарение) на заданной территории — разницу между массой воды, выпавшей в осадках и испарившейся над данной территорией. Для этого надо решить уравнение водного баланса

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint\limits_{A} Q\,\mathrm{d}A = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\oint \overrightarrow{F_a}\,\mathrm{d}\vec{l} + (E - P),$$

где Q — интегральное влагосодержание атмосферы над площадкой dA в пределах выбранной территории A; $\oint \overrightarrow{F_a}\,\mathrm{d}\vec{l}$ — конвергенция/дивергенция потока водяного пара через границы области A; $(E - P)$ — эффективное испарение (разность между испарением и осадками), находится как остаточный член уравнения (Ермаков и др., 2023). Расчёт может быть проведён на основе аппроксимирующей конечно-разностной схемы для минимальных трёхчасовых интервалов, либо в интегральной форме — для непрерывной последовательности таких интервалов произвольной длины (ограниченной интервалом спутниковых наблюдений).

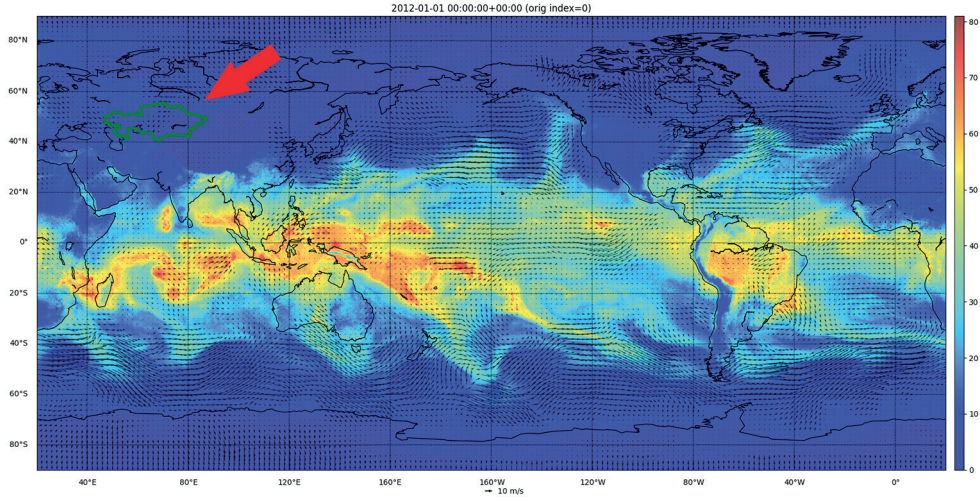


Рис. 1. Пример загрузки границ Казахстана на карту мира (цветом обозначено интегральное влагосодержание (в кг/м^2) в атмосфере на данный момент, чёрными стрелками показано направление перемещения воздушных масс)

Расчёт водного баланса по границам интереса проводился в специальной программе Viewflow, разработанной в ИКИ РАН. Была отработана методика загрузки в программу произвольно устанавливаемых границ. Для этого необходимо конвертировать нужные координаты в формат csv или shp, после чего загрузить в программу полученный файл (рис. 1). Такой метод позволит в дальнейшем проводить расчёт не только по политическим границам, но и по границам природных

объектов, таких как ледники, водосборы, реки, озёра, что в свою очередь даёт возможность детально изучать водный баланс экосистем различного масштаба.

По данным о водном балансе, импортированным из программы Viewflow для исследуемых территорий, было посчитано годовое эффективное увлажнение за двенадцатилетний период (таблица).

Эффективное увлажнение (в мм/год)

Страна	Год											
	2012	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**
Казахстан	516	474	458	449	415	493	484	427	433	540	453	467
Узбекистан	341	315	242	510	488	388	511	414	384	514	296	270

По данным национальных гидрометслужб среднее годовое количество осадков в Казахстане изменяется от 320 до 360 мм, в Узбекистане на равнинах составляет 120–200 мм, в горных районах — до 1000 мм. Сравнивая эти данные с рассчитанным эффективным увлажнением, можно сделать вывод, что показатели качественно согласуются.

Имея данные по водному балансу, можно проследить его годичную динамику.

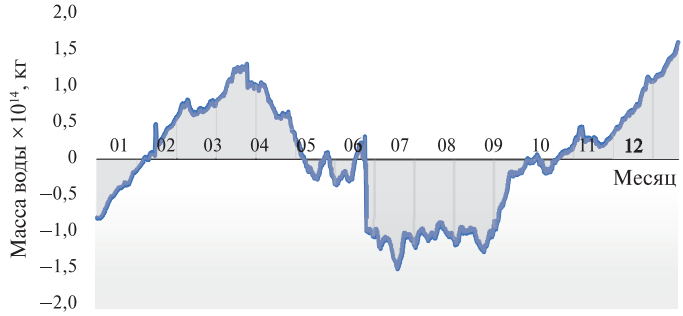


Рис. 2. Годовой ход баланса атмосферной влаги на территории Казахстана в 2016 г.

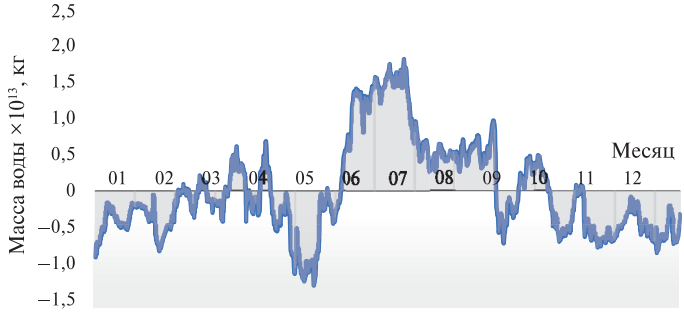


Рис. 3. Годовой ход баланса атмосферной влаги на территории Узбекистана в 2016 г.

На графиках (рис. 2, 3) можно видеть годовой ход баланса атмосферной влаги для Казахстана и Узбекистана за 2016 г. Они содержат циклические колебания с двумя характерными экстремумами (минимумами и максимумами увлажнения). Можно видеть характерную климатическую картину. Для Казахстана максимум

увлажнения приходится на лето (сезон дождей), в то время как для Узбекистана в это время наблюдается минимум осадков (дожди в Узбекистане приходятся главным образом на весенний период).

Таким образом, на рассмотренном примере удалось продемонстрировать перспективность методики расчёта эффективного увлажнения территорий по данным фактических спутниковых наблюдений путём сопоставления полученных результатов с независимыми официальными данными национальных гидрометслужб двух среднеазиатских республик. Планы развития работы включают переход к границам естественных экосистем (водосборов основных рек и всего бассейна Арала, горных ледников и др.), детальный анализ водного баланса за многолетний период наблюдений, выявление общих закономерностей и основных путей миграции влаги за пределы рассматриваемого региона, корреляции характеристик этого процесса с независимыми индикаторами региональных климатических изменений.

Обработка спутниковых данных и балансовые расчёты реализованы в рамках государственного задания ИКИ РАН (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8).

ЛИТЕРАТУРА

Ермаков Д. М., *Пашинов Е. В.*, *Кузьмин А. В. и др.* Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 470–492. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.

Кутуза Б. Г., *Данилычев М. В.*, *Яковлев О. И.* Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНАД, 2016. 336 с.

INVESTIGATION OF THE LONG-TERM HYDROLOGICAL REGIME OF THE TERRITORIES OF THE CENTRAL ASIAN REPUBLICS BASED ON SATELLITE RADIO THERMAL IMAGING

V. V. Martyanova [1], ***D. M. Ermakov*** [2]

[1] **Space Research Institute RAS, Moscow, Russia**
[2] **Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia**

A method for calculating the atmospheric water balance based on satellite radiothermovision has been tested, which makes it possible to estimate the difference between evaporation and precipitation (effective moisturizing) over a given territory. Using the example of Kazakhstan and Uzbekistan, data series for a 12-year period were obtained, demonstrating seasonal effective moisturizing dynamics that corresponds to the climatic characteristics of the regions and qualitatively converge with official statistics. The results obtained confirm the prospects of application of the methodology and provide quantitative estimates of the water balance and effective moisturizing for the studied territories from the data of actual satellite observations.

Keywords: atmospheric water balance, microwave radiometry

Martyanova Valeria Viktorovna — master's degree student, vvmartianovav@mail.ru
Ermakov Dmitry Mikhailovich — leading scientist, head of department, doctor of physical and mathematical sciences, d.m.ermakov@cosmos.ru

УДК 531.51 : 004.94 DOI: 10.21046/KMU-2025-261-267

КОНСОЛЬНАЯ СИМУЛЯЦИЯ ЗАДАЧИ *N* ТЕЛ С МОДЕЛИРОВАНИЕМ РАЗРУШЕНИЯ И АНАЛИЗОМ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С. А. Медведев

Школа № 444, Москва, Россия

Описывается разработка высокоточной компьютерной симуляции для интерактивного моделирования задачи *N* тел. Изначально проект создавался как образовательный инструмент, но благодаря высокой физической точности он перешёл в полноценную научную платформу. Ключевой особенностью модели является комплексный учёт физики столкновений, включающий упругие и пластические деформации, вязкоупругое поведение, разрушение и адгезию тел. В основе лежит авторский движок, написанный на языке программирования C^{++}, использующий метод интегрирования Velocity Verlet и технологию OpenMP для масштабируемых расчётов. Модель деформации учитывает широкий спектр параметров материала, таких как модуль Юнга и предел текучести, а также эффекты упрочнения и температурного влияния. В результате создана виртуальная лаборатория, способная с высокой точностью моделировать сложные динамические сценарии. Разработанный комплекс представляет собой универсальный инструмент, открывающий новые возможности для исследования многотельных систем на стыке вычислительной астрофизики и механики материалов.

Ключевые слова: задача *N* тел, компьютерное моделирование, вычислительная физика, небесная механика, механика деформируемого твёрдого тела, численное интегрирование, Velocity Verlet, разрушение материалов, вязкоупругость, адгезия, физический движок, OpenMP

Моделирование гравитационных систем *N* тел является одной из классических и наиболее сложных задач вычислительной физики. В то время как движение двух тел описывается аналитически, системы с тремя и более телами требуют применения численных методов для нахождения их эволюции во времени (Aarseth, 2003). Большинство существующих симуляций фокусируются на гравитационном аспекте, рассматривая тела как точечные массы или идеальные сферы. Данная работа посвящена разработке и описанию программного комплекса, который расширяет классическую постановку задачи, вводя комплексную модель физики твёрдого тела.

Основная цель проекта заключается в создании интерактивной виртуальной лаборатории, позволяющей в реальном времени моделировать не только гравитационное взаимодействие, но и его последствия: столкновения, упругие и пластические деформации, адгезию (слипание) и полное разрушение тел. Это позволяет исследовать широкий круг явлений, от формирования планетезималей до последствий астероидных ударов.

Разработанный программный комплекс представляет собой модульный физический движок, написанный на языке C^{++} (стандарт $C^{++}17$) с использованием библиотеки SFML (*англ.* Simple and Fast Multimedia Library) для визуализации. Архитектура движка следует современным подходам к проектированию подобных систем (Gregory, 2018), разделяя ядро физических расчётов, систему обработки столкновений и модуль рендеринга. В основе симуляции лежат две взаимосвязанные модели: модель гравитационного взаимодействия и модель контактной физики, включающая деформацию и разрушение.

Для обеспечения высокой производительности при расчёте гравитационных сил между большим количеством тел, что является наиболее вычислительно за-

Медведев Семён Алексеевич — учащийся 9-го класса, blockmaster2009s@gmail.com

тратной частью задачи (порядка $O(N^2)$), был задействован стандарт параллельных вычислений OpenMP. Это позволило эффективно распараллеливать циклы расчёта сил, значительно ускоряя симуляцию. Для интегрирования уравнений движения используется численный метод Velocity Verlet. Этот алгоритм отличается высокой стабильностью при сохранении энергии в долгосрочных симуляциях и простотой реализации. Он является развитием оригинального алгоритма, предложенного для задач молекулярной динамики (Verlet, 1967). На каждом шаге времени Δt координаты r и скорость v каждого тела пересчитываются следующим образом:

$$r(t+\Delta t) = r(t) + v(t)\Delta t + \frac{1}{2}a(t)\Delta t^2, \quad v(t+\Delta t) = v(t) + \frac{1}{2}\left[a(t) + a(t+\Delta t)\right]\Delta t,$$

где $a(t)$ — ускорение тела в момент времени t, вычисляемое как сумма всех гравитационных сил, действующих на него со стороны других тел.

При обнаружении столкновения двух или более тел активируется модель контактного взаимодействия. Теоретической базой для неё служат принципы механики деформируемого твёрдого тела (Работнов, 1979). В отличие от простых моделей, где столкновение обрабатывается через абсолютно упругий или неупругий удар, разработанный движок моделирует процесс деформации материала.

Ключевые физические параметры, определяющие поведение материалов в симуляции

Категория	Параметр	Символ	Единицы	Роль в модели
Базовые инерционные свойства	Плотность	ρ	кг/м^3	Определяет массу тела при заданном объёме и его инерционные характеристики
Упругие свойства	Модуль Юнга	E	Па	Характеризует жёсткость материала и его сопротивление упругой деформации
	Коэффициент Пуассона	ν	б/р	Описывает поперечную деформацию материала при продольной нагрузке
Прочность и разрушение	Предел текучести	σ_y	Па	Порог напряжения, после которого начинается необратимая пластическая деформация
	Предел прочности	σ_{uts}	Па	Критическое напряжение, при котором происходит зарождение и рост трещин, приводящих к разрушению
	Коэффициент упрочнения	K	б/р	Моделирует увеличение прочности материала в процессе его пластической деформации
Контактное взаимодействие	Коэффициент упругости (восстановления)	e	б/р	Определяет долю кинетической энергии, сохраняемой после отскока
	Коэффициент адгезии	k_a	б/р	Задаёт силу сцепления тел, позволяя моделировать эффект слипания при контакте
Вязкоупругие и термические эффекты	Скорость релаксации	τ	с	Характеризует временную зависимость спада внутренних напряжений
	Температурные эффекты	T	К	Учитывает влияние температуры (например, от трения) на свойства материала и его поведение

Для этого каждое тело наделено набором физических свойств, определяющих его реакцию на внешнее воздействие. Ключевые параметры, используемые в модели, представлены в таблице.

При превышении предела текучести тело начинает пластически деформироваться, а при достижении порога разрушения происходит его фрагментация. Основы этого процесса лежат в области механики разрушения (Anderson, 2005).

Для реализации описанной функциональности был применён ряд вычислительных методов и обеспечена высокая степень конфигурации симуляции. С целью оптимизации процесса обнаружения столкновений, что является одной из наиболее требовательных к ресурсам задач, используется пространственная дискретизация, позволяющая избежать полного перебора всех пар тел на каждом шаге. Разрешение контактов реализовано на основе импульсного метода с соблюдением законов сохранения энергии и импульса. Интерактивность обеспечивается за счёт механизма трассировки лучей (*англ.* Ray Casting) для точного выбора объектов курсором мыши в трёхмерном пространстве и их последующего анализа.

Гибкость симулятора достигается за счёт наличия более 95 настраиваемых параметров, условно разделённых на несколько групп. Пользователь может задавать начальные условия системы: от количества тел до их распределения, начальных скоростей и положений. Физическая модель позволяет детально настраивать свойства каждого материала, включая полный спектр упругих, прочностных и вязких характеристик. Управление точностью и производительностью осуществляется через изменение основного шага времени и количества промежуточных итераций физического расчёта на один кадр визуализации. Визуальная составляющая также обладает широкими возможностями кастомизации, включая переключение режимов отрисовки траекторий, включение визуализации сеток напряжений и изменение параметров освещения. Такая детализация настроек превращает программный комплекс в мощный инструмент для проведения вычислительных экспериментов.

Возможности разработанного комплекса позволяют моделировать сложные и наглядные сценарии. Ниже представлены материалы вида модели (рис. 1–5) и статистики коэффициентов, взятые во время симуляций (рис. 6–9).



Рис. 1. Представление общего вида движком

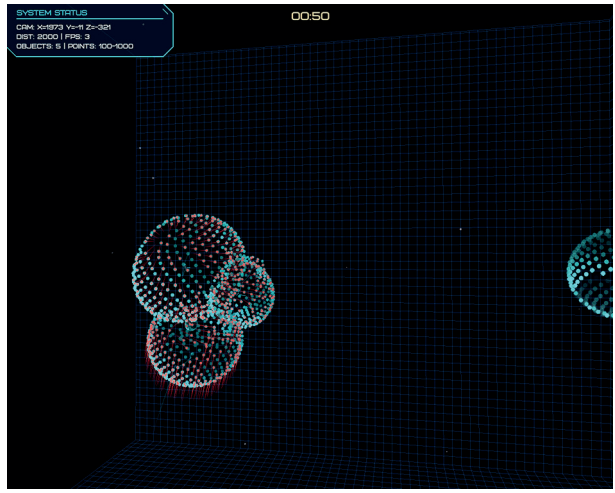


Рис. 2. Слияние нескольких тел

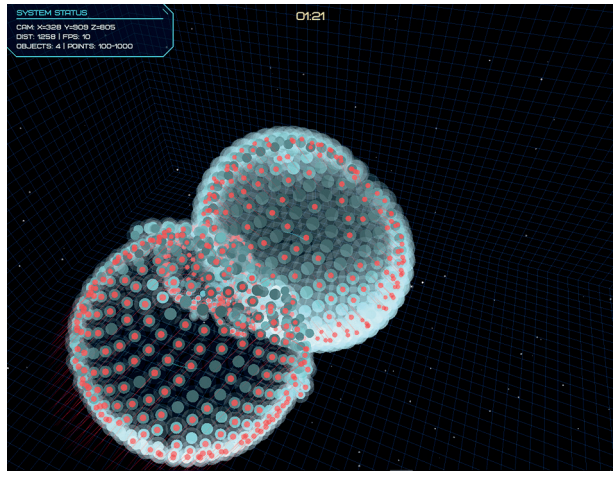


Рис. 3. Расчёт деформации тел при столкновении

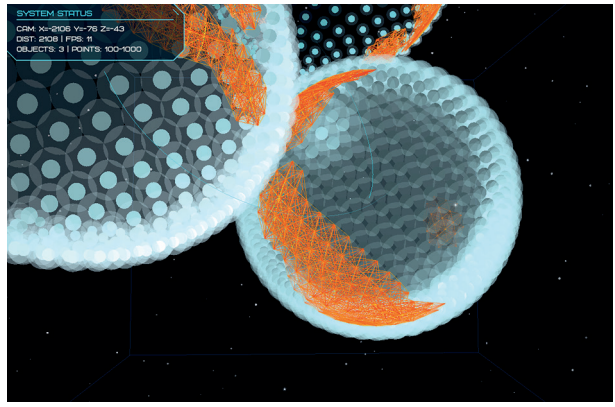


Рис. 4. Узкая сетка напряжений по касанию поверхности

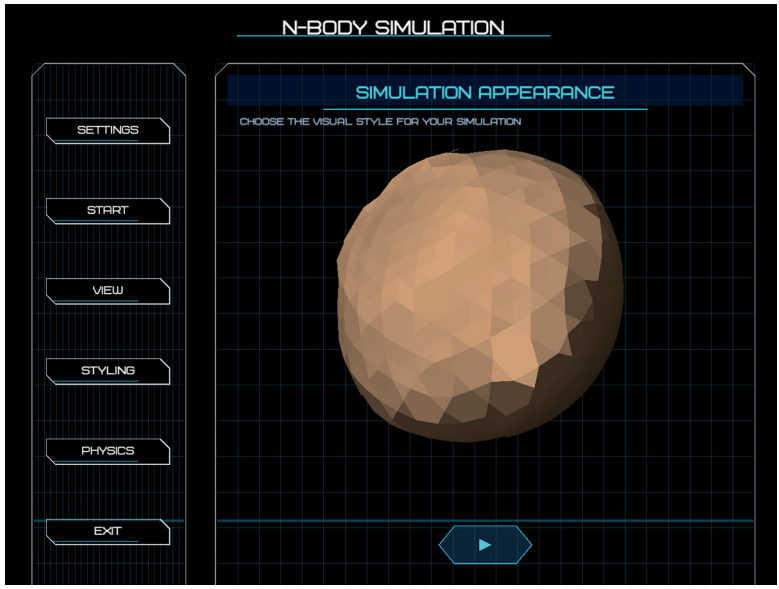


Рис. 5. Вид меню симуляции для лёгкой настройки

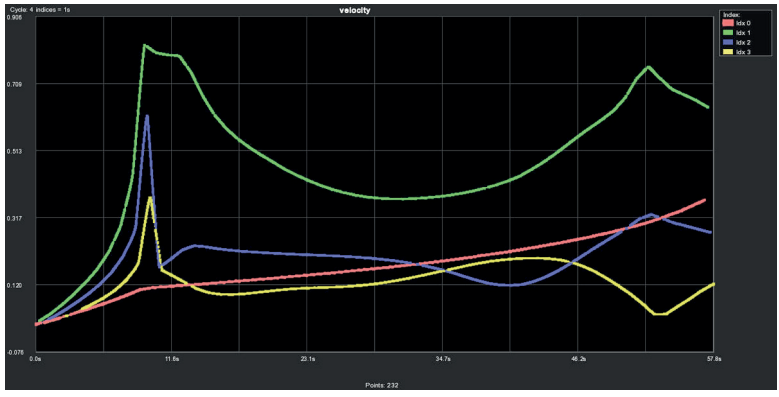


Рис. 6. Статистика изменения скорости (velocity) от времени, конфигурация 1

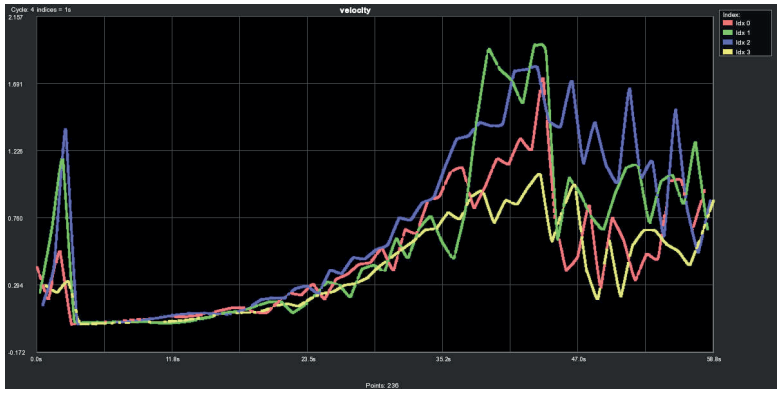


Рис. 7. Статистика изменения скорости (*англ.* velocity) от времени, конфигурация 2

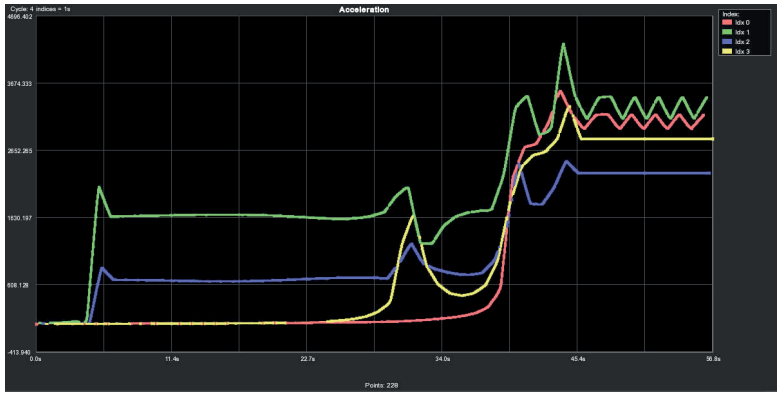


Рис. 8. Статистика изменения ускорения от времени, конфигурация 1

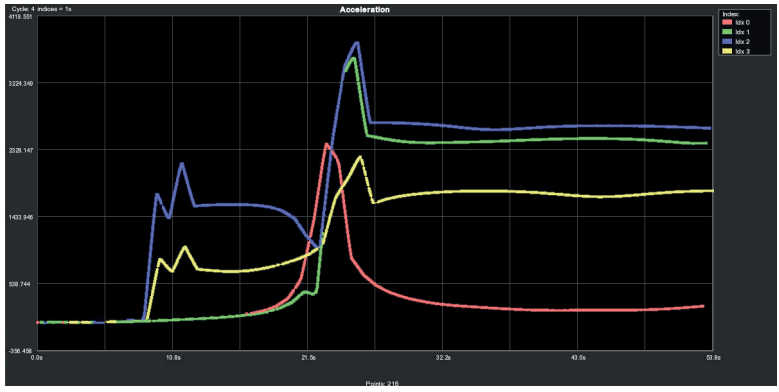


Рис. 9. Статистика изменения ускорения от времени, конфигурация 2

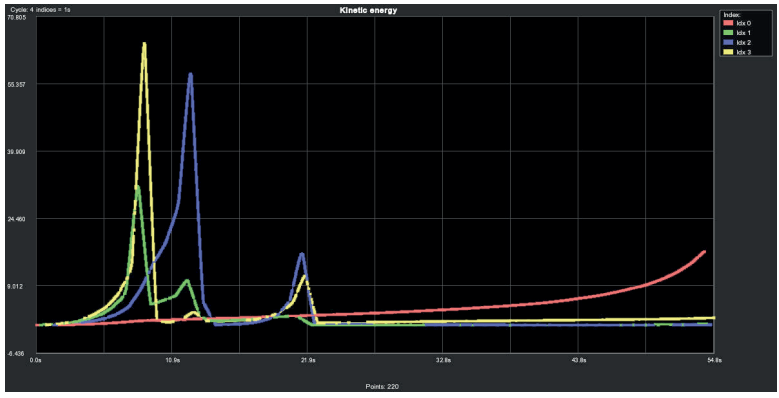


Рис. 10. Статистика изменения кинетический энергии от времени

В ходе работы был создан и апробирован программный комплекс для симуляции гравитационной задачи N тел с уникальной моделью деформации и разрушения. Разработанный движок показал высокую производительность и физическую достоверность результатов. Он является универсальным инструментом, который

может быть использован как в образовательном процессе для демонстрации сложных физических явлений, так и в исследовательских целях для изучения динамики многотельных систем на стыке небесной механики и физики материалов.

ЛИТЕРАТУРА

Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 743 с.

Aarseth S. J. Gravitational N-Body Simulations: Tools and Algorithms. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003. 24 p.

Anderson T. L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2005. 640 p. https://doi.org/10.1201/9781420058215.

Gregory J. Game Engine Architecture. 3rd ed. Boca Raton: A K Peters/CRC Press, 2018. 1240 p.

Verlet L. Computer 'experiments' on classical fluids. I. Thermodynamical properties of Lennard-Jones molecules // Physical Review. 1967. V. 159. No. 1. P. 98–103. https://doi.org/10.1103/PhysRev.159.98.

CONSOLE-BASED SIMULATION OF THE *N*-BODY PROBLEM WITH MATERIAL FAILURE MODELING AND DYNAMIC SYSTEMS ANALYSIS

S. A. Medvedev

School No. 444, Moscow, Russia

The article presents the development of a high-precision computer simulation for interactive modeling of the N-body problem. Originally conceived as an educational tool, the project has evolved into a full-fledged scientific platform due to its high physical accuracy. A key feature of the model is the comprehensive treatment of collision physics, including elastic and plastic deformation, viscoelastic behavior, material failure, and adhesion. The core is a custom-built engine written in C^{++}, employing the Velocity Verlet integration method and OpenMP technology for scalable computations. The deformation model incorporates a wide range of material parameters, such as Young's modulus and yield strength, as well as hardening and thermal effects. As a result, a virtual laboratory has been created that enables accurate simulation of complex dynamic scenarios. The developed system is a universal tool that opens up new opportunities for studying multi-body systems at the intersection of computational astrophysics and material mechanics.

Keywords: N-body problem, computer simulation, computational physics, celestial mechanics, deformable solid mechanics, numerical integration, Velocity Verlet, material failure, viscoelasticity, adhesion, physics engine, OpenMP

Medvedev Semyon Alekseevich — student, 9th grade, blockmaster2009s@gmail.com

УДК 629.7.05 DOI: 10.21046/KMU-2025-268-274

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ПО СОЛНЦУ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ СВЕРХМАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Д. О. Мельников, А. О. Николаев, С. Н. Семенович

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Разработаны и экспериментально протестированы одноосные алгоритмы определения ориентации, основанные на использовании датчиков интенсивности света и гироскопа. Проведён сравнительный анализ результатов тестирования различных алгоритмов, в ходе которого был выбран наиболее эффективный. Экспериментально подтверждена работоспособность разработанных алгоритмов и количественно оценено качество их функционирования.

Ключевые слова: алгоритмы определения ориентации, наноспутник, одноосная ориентация, датчики интенсивности света

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей данной работы являлось определение угла поворота лабораторного наноспутника вокруг оси Z относительно направления на Солнце, роль которого в лабораторных условиях выполнял стационарный прожектор. На корпусе наноспутника установлены четыре датчика интенсивности света BH-1750, размещённые по одному по центру каждой боковой грани. На основании показаний этих датчиков рассчитывается зенитный угол между нормалью к плоскости датчика и направлением на источник освещения.

Поскольку на каждой стороне спутника размещён только один датчик интенсивности света, алгоритму определения углового положения необходимо не только вычислять зенитный угол, но и определить, с какой стороны поступает освещение. Поскольку определить направление источника только по данным от датчиков освещённости невозможно, в алгоритм добавлены данные с гироскопа, позволяющие отслеживать направление вращения спутника. Алгоритм анализа, используя текущие и предыдущие значения освещённости, а также направление углового смещения, способен восстановить относительное положение источника света. Однако с учётом особенностей диаграммы направленности датчиков BH-1750 при приближении источника освещения к положению, перпендикулярному плоскости фотодетектора, изменение угла приводит к незначительному изменению измеренной интенсивности, что создаёт область с пониженной чувствительностью и высокой чувствительностью к шуму (Камоцкий, 2020).

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОРИЕНТАЦИИ

В начальном алгоритме определения ориентации было решено выделить три различных состояния, в которых может находится спутник.

Мельников Дмитрий Олегович — стажёр младшего научного сотрудника факультета радиофизики и компьютерных технологий, dmelnikau03@yandex.ru
Николаев Алексей Олегович — младший научный сотрудник факультета радиофизики и компьютерных технологий, lesha.nikolaev.2000@mail.ru
Семенович Сергей Николаевич — заведующий кафедрой факультета радиофизики и компьютерных технологий, кандидат технических наук, semenovich@bsu.by

1. Если освещено два солнечных датчика, а их расположение на спутнике известно, то по их номерам определяется сторона для основного датчика (у которого выше показатель интенсивности света).
2. Если присутствует высокий уровень интенсивности только для одного датчика, но угол поворота ещё не приблизился к границе (±5° от точки максимальной освещённости), то алгоритм решает, что освещение пока находится на той же стороне, что и прошлый раз.
3. Если датчик находится в состоянии перпендикулярности источнику света, то лепесток определяется исходя из значений гироскопа и предыдущих значений с солнечного датчика.

Расчёт направления по гироскопу используется в довольно широкой зоне, так как если взять зону уже, то при быстром вращении спутник может её проскочить и тогда алгоритм не определит, что спутник повернулся другую сторону датчика, и будет рассчитывать по прошлой, пока спутник не повернётся в зону освещённости двух датчиков.

Как видно на рис. 1, есть четыре зоны (это зоны максимальной освещённости для каждого датчика), где видны значительные колебания рассчитанных углов. Это объясняется тем, что в околопиковой области на один градус поворота спутника приходится меньшее изменение освещённости, из-за чего шум датчика сильнее влияет на работу алгоритма. В терминах вычислительной математики задача определения угла плохо обусловлена при углах, близких к 0.

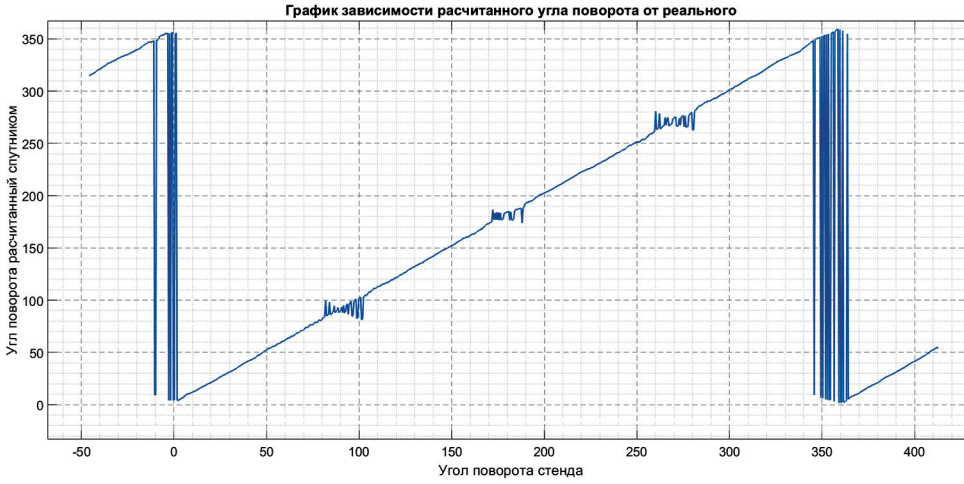


Рис. 1. Определение ориентации по начальному алгоритму

Из-за такой погрешности в показаниях новое значение, которое должно быть больше предыдущего, может считаться меньше и алгоритм определения ориентации использует для вычисления другой лепесток. Это происходит, пока датчик находится в зоне максимальной освещённости — из-за этого в таких областях показания нестабильны.

Алгоритм определения ориентации с использованием порогового значения

Далее был проведён анализ зашумлённости датчика интенсивности света. Было рассчитано СКО (среднеквадратическое отклонение) шума, равняющееся 160 лк.

Чтобы избавится от колебаний в зоне нуля градусов, было решено ввести пороговое значение. Оно используется следующим образом: при получении новых данных с солнечных датчиков, если основной датчик не поменялся и разница между предыдущим значением и новым не превышает порогового значения, то при расчёте алгоритм использует старые данные. Чтобы введённое пороговое значение работало, оно должно равняться или быть больше СКО шума, чтобы убрать ошибку солнечных датчиков и алгоритм определения текущего положения работал правильно.

Для начала был поставлен порог, равный СКО, т. е. 160 лк. На рис. 2 видно, что количество перескоков на неправильный лепесток при расчёте ориентации уменьшилось, но появились небольшие пологие участки — это моменты, когда значение не превышало пороговое. При таком подходе в допороговой области зоны максимального освещения дребезг был уменьшен ценой снижения чувствительности датчика.

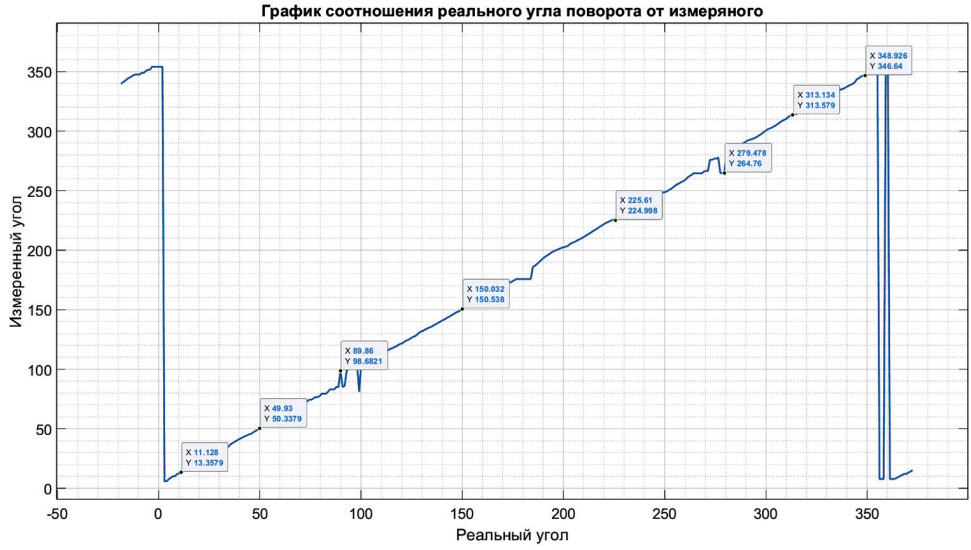


Рис. 2. Расчёт угла по алгоритму с пороговым значением в 160 лк

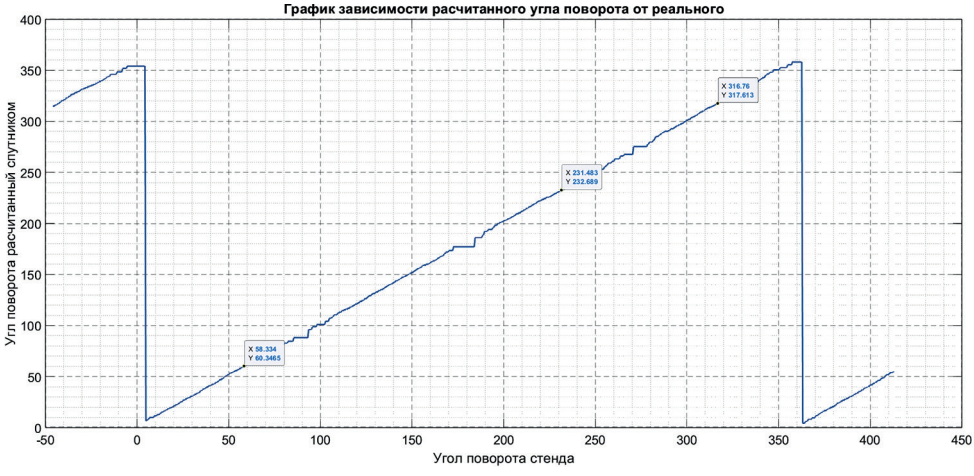


Рис. 3. Расчёт угла по алгоритму с пороговым значением в 400 лк

Далее постепенно поднимался порог, дребезг полностью исчез только при пороге в 400 лк (рис. 3). На графике это видно — больше нет резких скачков, но появились длинные ступеньки. Благодаря большому порогу был убран дребезг из зоны засвета, но из-за того, что в зоне засвета малое изменение интенсивности соответствует большому изменению угла, получаем просто слепую зону, примерно ±5–10°, что является существенным недостатком данного алгоритма.

Пороговое значение в сочетании с гироскопом

Чтобы убрать длинные ступеньки, было решено в момент, когда значение не превышает порог, рассчитывать угол по показаниям гироскопа. Как видно на рис. 4, график сильно сгладился, но у этого способа есть недостаток. Если алгоритм доверяет гироскопу на любом отрезке, когда значение не превышает пороговое, то при покое спутника алгоритм будет рассчитывать смещение на основе шумов гироскопа, и показания будут постепенно смещаться из-за накопления ошибок.

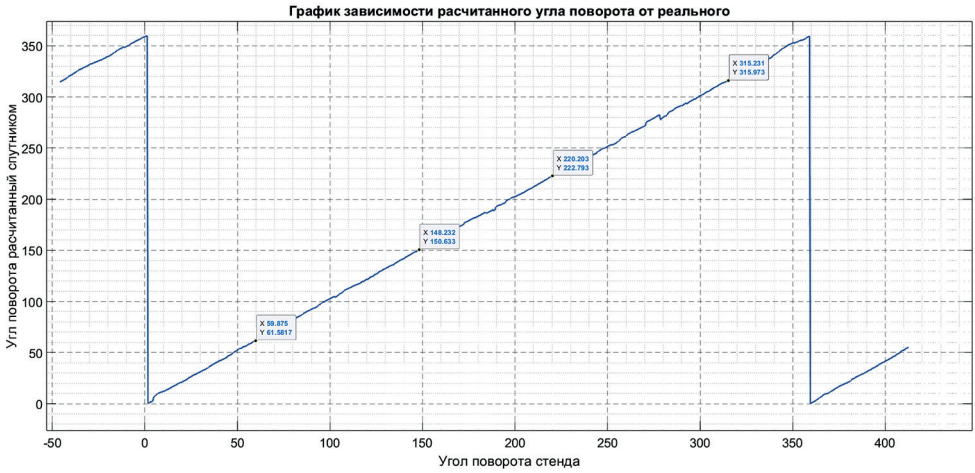


Рис. 4. Расчёт угла по алгоритму с пороговым значением и гироскопом

Использование гироскопа только при максимальной освещённости

Поэтому, чтобы уменьшить влияние ошибок гироскопа на наши измерения, было принято решение использовать расчёт по гироскопу только при смене четверти. Идея в том, что алгоритм сравнивает прошлое и текущее значение, и если они находятся в разных четвертях, это означает, что спутник либо сменил четверть, либо ошибочно перескочили на другой лепесток. Так же можно сравнивать текущий угол с углом, рассчитанным по гироскопу, но чтобы сократить количество расчётов, было решено остановится на первом способе.

Как видно на рис. 5, в данном алгоритме убраны перескоки и уменьшено использование гироскопа, но остались неровности на графике. Они из-за того, что в зоне пика освещённости при ориентировании по солнечным датчикам, когда алгоритм не ошибается с четвертью, он всё равно имеет большие отклонения от истинного значения из-за зашумлённости солнечных датчиков (задача плохо обусловлена в этой области).

Поэтому было принято решение, что в зоне пика освещённости алгоритм расчёта полностью переходит на входные данные от гироскопа. Хотя у него и есть накопление ошибок, за короткое время они не превысят ошибки датчиков Солнца.

В итоге при работе алгоритма ориентации получаются небольшие переходы, связанные с отклонением показания солнечного датчика от истинного значения перед переходом на гироскоп (рис. 6), а весь остальной график остаётся гладким, что свидетельствует о качественной работе алгоритма.

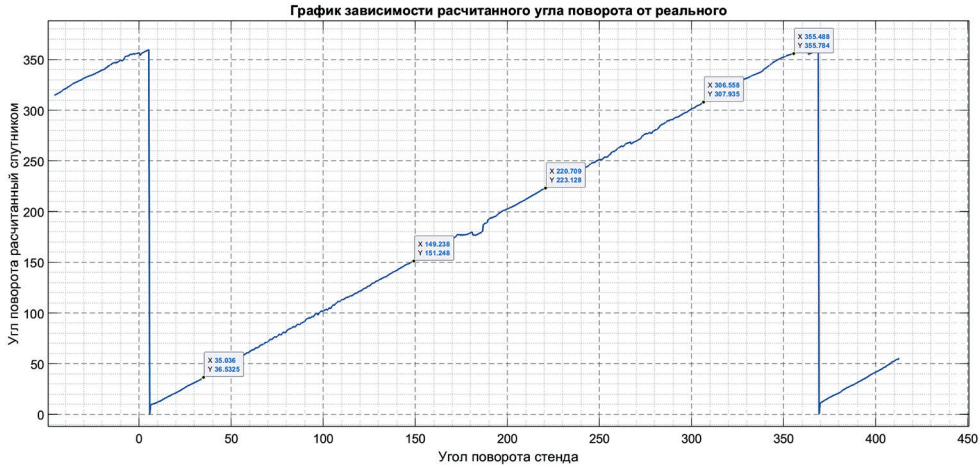


Рис. 5. Расчёт угла по алгоритму гироскопа при смене четверти

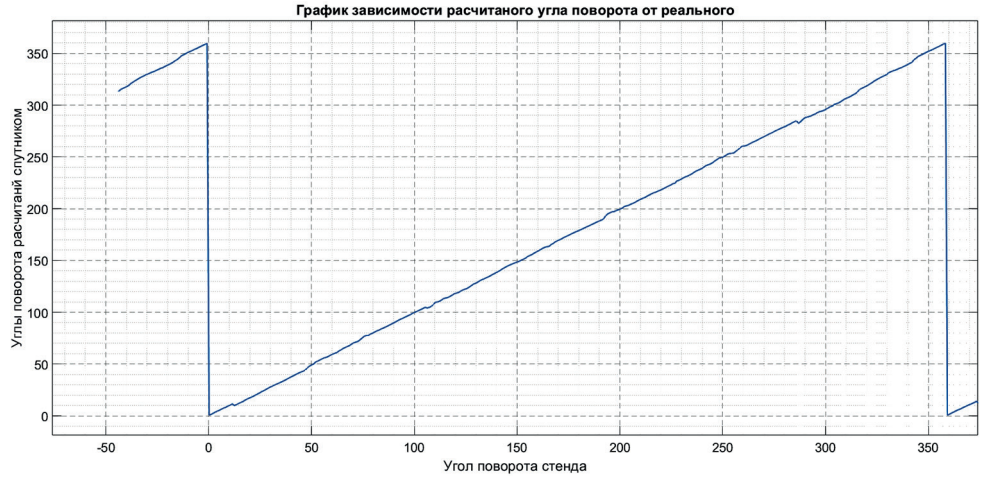


Рис. 6. Расчёт угла по алгоритму гироскопа при высокой интенсивности света

На рис. 7 показана ошибка алгоритма; из этих значений видно, что максимальное отклонение от истинного значения составляет 3,5°, а СКО составляет 1,2°, что является отличным показателем для нашей системы.

Также алгоритм определения ориентации при отсутствии интенсивности освещённости выше порогового значения всех датчиков, например, если некое тело заслонит освещение от Солнца, перейдёт в формат расчёта ориентации только по гироскопу, но перед этим, если свет от Солнца пропадёт не сразу, возможны ошибки в показаниях. Как только свет появится и будут освещены два датчика, спутник сразу восстановит истинное значение своей ориентации.

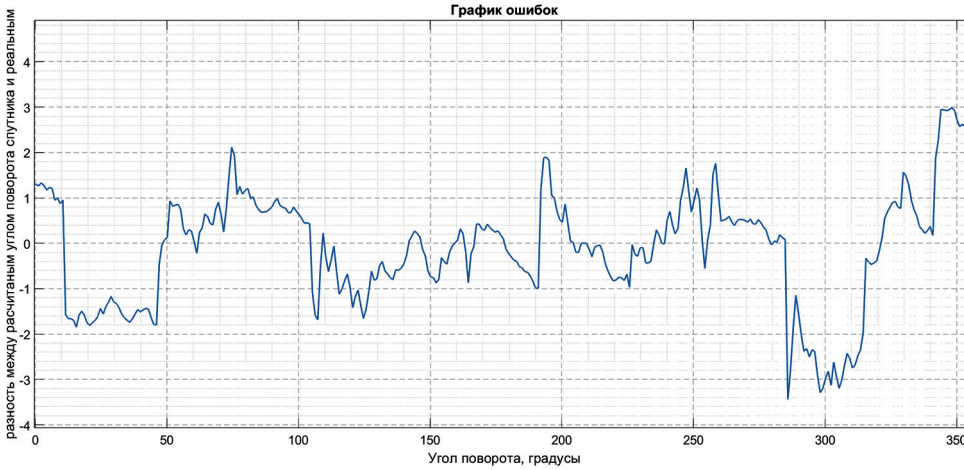


Рис. 7. Ошибка определения ориентации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований были разработаны и реализованы алгоритмы работы с солнечными датчиками, позволяющие определять ориентацию наноспутника относительно направления на источник света в условиях лабораторных испытаний. Проведён анализ особенностей работы датчиков интенсивности света BH-1750, включая их диаграмму направленности и чувствительность к шумам в области пиковой освещённости. Выявлены ограничения использования исключительно данных солнечных датчиков для определения азимутального угла, что обусловило необходимость интеграции гироскопа в алгоритм ориентации. Экспериментально подтверждена эффективность комбинированного подхода, при котором в зоне пиковых значений освещённости ориентация определяется по данным гироскопа, что позволяет снизить влияние шумов и обеспечить высокую точность вычислений. Проведённые испытания показали стабильную работу алгоритма и подтвердили возможность его применения для одноосного определения ориентации наноспутника. Таким образом, поставленные задачи по созданию надёжной системы ориентации на основе солнечных датчиков и гироскопа успешно решены.

ЛИТЕРАТУРА

Камоцкий А.А. Разработка электронного макета датчика направления на Солнце: дис. 2020. С. 48–54.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ALGORITHMS FOR DETERMINING ORIENTATION BY THE SUN OF AN EDUCATIONAL MODEL OF AN ULTRA-SMALL SPACECRAFT

D. O. Melnikov, A. O. Nikolaev, S. N. Semenovich

Belarusian State University Minsk, Belarus

Uniaxial orientation detection algorithms based on the use of light intensity sensors and a gyroscope have been developed and experimentally tested. A comparative analysis of the results of testing various algorithms was carried out, during which the most effective one was selected. The operability of the developed algorithms has been experimentally confirmed and the quality of their functioning has been quantified.

Keywords: orientation detection algorithms, nanosatellite, uniaxial orientation, light intensity sensors

Melnikov Dmitry Olegovich — trainee of junior researcher, dmelnikau03@yandex.ru
Nikolaev Alexey Olegovich — junior researcher, lesha.nikolaev.2000@mail.ru
Semenovich Sergey Nikolfevich — head of the department, candidate of engineering sciences, semenovich@bsu.by

УДК: 521.313; 524.387 DOI: 10.21046/KMU-2025-275-282

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

Д. А. Мельниченко [1], ***А. С. Горбан*** [2]

[1] **Школа № 1158, Москва, Россия**
[2] **Институт космических исследований РАН, Москва, Россия**

Показаны траектории движения шарика в искусственно созданном пространстве под влиянием гравитационного поля, а также выявлена зависимость формы траектории от первоначального запаса потенциальной энергии шарика. Были изучены параметры и траектории движения нейтронных звёзд в двойных системах. Получено, что орбиты нейтронной звезды в системе Cen X-3 и Her X-1 имеют форму окружности, в то время как Vela X-1 имеет чуть сплюснутую форму из-за сравнительно небольшого эксцентриситета ~0,08. Анализ кривых блеска позволил определить орбитальные периоды нейтронных звёзд в указанных системах, что достоверно сходится с полученными ранее результатами.

Ключевые слова: движение в гравитационном поле, рентгеновские двойные звёздные системы, орбитальное движение, периодичность, Cen X-3, Her X-1, Vela X-1

В настоящей работе исследуется и демонстрируется движение тела в гравитационном поле в зависимости от меняющихся параметров системы, а также показывается применимость теории на основе реальных космических объектов.

Исследование движения тел в гравитационных полях имеет глубокие научные результаты, описанные в работах учёных различных эпох (Исаак..., 1989). Что касается теоретической части исследования, законы Ньютона и Кеплера до сих пор используются в современных работах, например, NASA использует эти законы для планирования траекторий космических аппаратов (Bhattacharyya, Nityananda, 2008), также законы используются для определения параметров двойных звёздных систем и при изучении взаимодействия компонентов двойных систем (Orellana, Romero, 2005).

В практическом применении особое внимание уделялось визуализации орбитальных движений, например, М. Д. Ореллана и Г. Е. Ромеро в статье (Orellana, Romero, 2005), демонстрируют изображение орбитального движения нейтронной звезды, входящей в состав рентгеновской двойной системы, описывая, как меняется физика системы за счёт вращения нейтронной звезды и переноса вещества между компаньонами системы.

Ещё одним ярким примером использования компьютерного моделирования гравитационных систем является известный N-body код С. Дж. Аарсета (Aarseth, 2003), который моделирует взаимодействие систем с различным количеством компонентов и их параметров, примерами таких систем могут быть шаровые скопления, состоящие из миллионов звёзд. А определение параметров двойных звёздных систем позволяет углублённо изучать космические объекты; например, в статье А. Гонзалез-Галан с коллегами (González-Galán et al., 2014) с помощью исследуемых параметров были получены выводы, предполагающие возможную эволюцию такого типа систем, что является очень важным результатом для дальнейших исследований (https://gammaray.msfc.nasa.gov/gbm/science/pulsars.html 2024).

В ходе исследования были выявлены несколько направлений, требующих дальнейшей разработки. В практическом плане установлено, что необходимо создание установки, на которой можно наглядно увидеть движение тела в гра-

Мельниченко Дмитрий — ученик 7-го класса, meldima2011@mail.ru
Горбан Алёна Сергеевна — инженер ИКИ РАН, магистр физико-математических наук

витационном поле, а также важно создание более реалистичных компьютерных моделей орбитального движения двойных систем, которые также демонстрируют процессы, происходящие между реальными космическими объектами.

В рамках исследования траектории движения тел в гравитационном поле использована научная литература, которая включает теоретические работы по классической механике и гравитационному взаимодействию, материалы о законах Кеплера и законах Ньютона и их применении в астрономии, научные статьи по динамике двойных звёздных систем (Исаак..., 1989; Привалов, 1966; Струве и др., 1967; Черепащук, 2013; Orellana, Romero, 2005; Shirke et al., 2021]. Также использовались данные наблюдений за двойными звёздами, результаты измерения орбитальных периодов (https://maxi.riken.jp/top/lc.html), специализированные базы данных астрономических наблюдений (https://www.python.org). В методическом аспекте были изучены научно-методологические пособия по обработке астрономических данных, инструкции по использованию программного обеспечения для анализа орбит (Roy, 2004) и публикации об исследовании двойных звёздных систем (Привалов, 1966; Aarseth, 2003; Diez et al., 2023; Orellana, Romero, 2005; Podsiadlowski et al., 2002).

Экспериментальная часть работы включала в себя создание установки для исследования движения тела в гравитационном поле. Фотография установки приведена на рис. 1. Установка состояла из картонной коробки, в которой сделан вырез по центру одной из боковых сторон коробки. В виде самого гравитационного поля мы использовали плотную и упругую ткань, натянув её на коробку и закрепив с помощью металлических кнопок по краям коробки.

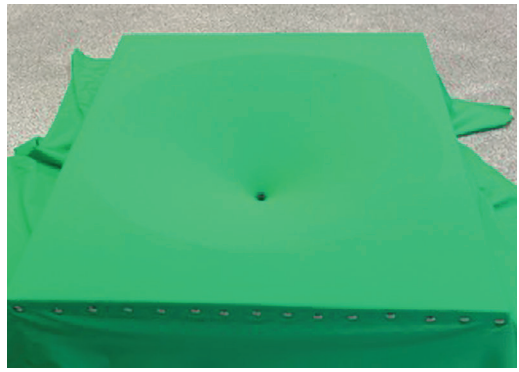


Рис. 1. Фото экспериментальной коробки

Для искривления ткани использовался магнит и металлический болтик, который служил для того, чтобы прижимать ткань ко дну коробки, тем самым задавая искривлённость пространства-времени гравитационного поля. Магнит был закреплён на скотч.

В качестве второго объекта мы использовали маленький металлический шарик, который запускали с помощью пусковой установки (силой трения пренебрегаем). Она состояла из продолговатой трубки и ножек, с помощью которых можно было удобно замерять высоту запуска шарика. Траекторию шарика запечатлели с помощью телефона, который лежал на подставке и снимал в замедленной съёмке движение шарика.

Опыты заключались в том, что шарик запускался из пусковой установки и этот процесс записывался на видео для выявления его траектории. Затем это видео раскладывалось на кадры и склеивалось в траекторию. Когда были получе-

ны все изображения орбит, их проанализировали и получили некоторую информацию, которая представлена ниже.

Изображения траектории орбит и их типов в зависимости от высоты трубки представлены на рис. 2. На рис. 2*е* с высотой трубки 2 см мы видим достаточно вытянутую орбиту, которая проходит очень близко к болтику, а центр смещён достаточно далеко от него. На рис. 2*г*, которое показывает траекторию запуска шарика из трубки высотой 6 см, орбита получилась в немного шире предыдущих орбит, но длина не увеличилась, и центр установки стал ближе к центру орбиты. На рис. 2*в* с высотой трубки 8 см, мы видим, что по сравнению с предыдущим рис. 2*г* она получилась более округлой и широкой, и центр установки оказался практически по центру орбиты. На рис. 2*б* с высотой трубки 10 см мы заметили, что различий с рис. 2*в*, где шарик выпускался из трубки высотой 8 см, практически нет, за исключением того, что шарик двигался быстрее и орбита стала чуть более широкая. На рис. 2*а* с высотой трубки 15 см, шарик не образовал эллиптическую орбиту, а вылетел за пределы установки по гиперболической траектории.

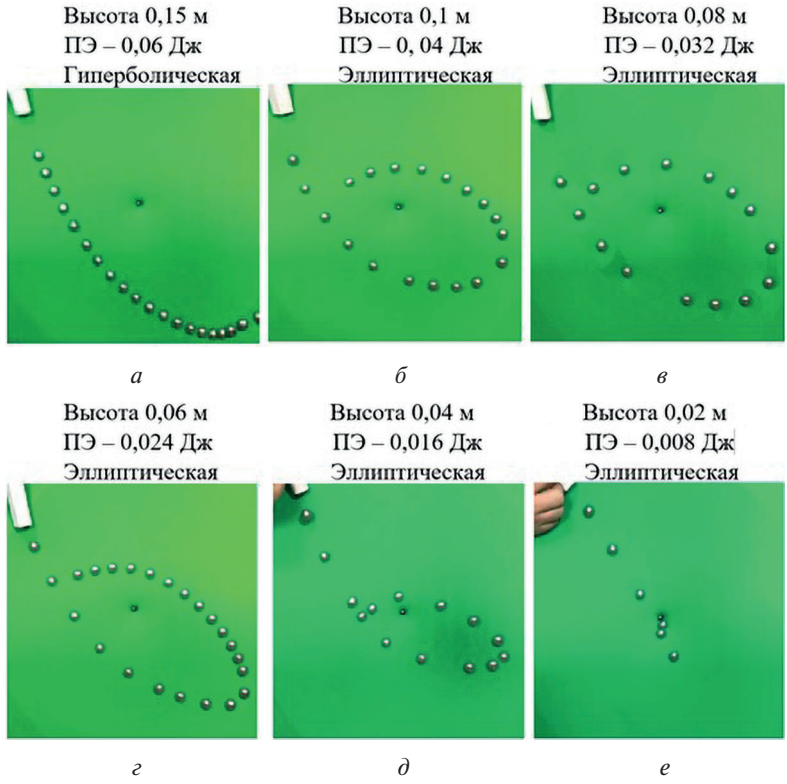


Рис. 2. Траектории полёта шарика в зависимости от высоты трубки и потенциальной энергии шарика

Таким образом, была построена установка с помощью которой можно исследовать движение тела в гравитационном поле. Также было выяснено, что с увеличением высоты и соответственно потенциальной энергии шарика E ($E = mgh$, где m — масса тела; g — ускорение свободного падения; h — высота), наша траектория значительно изменялась из более узкой эллиптической орбиты с небольшой полуосью в более широкую и вытянутую. Также была рассчитана максимальная по-

тенциальная энергия, с которой шарик больше не двигался по эллиптической траектории, демонстрируя нам гиперболическое движение в гравитационном поле.

В практической части работы исследовались три двойных системы: Cen X-3, Her X-1, Vela X-1. Параметры двойных систем представлены в таблице.

Орбитальные параметры рентгеновских двойных систем

Двойная система	Орбитальный период, дни		Эксцентриситет	Большая полуось, м	Долгота периастра, град
	из литературы	полученный в ходе работы			
Cen X-3	2,08	~2,0–2,1	0	$1{,}16919 \cdot 10^{10}$	0
Her X-1	1,70	~1,6–1,8		$3{,}897302 \cdot 10^{9}$	
Vela X-1	8,96	~8,6–9,0	0,08	$3{,}38765 \cdot 10^{10}$	162,33

Cen X-3 — рентгеновский пульсар с периодом 4,84 с. Первый открытый рентгеновский пульсар и третий рентгеновский источник, обнаруженный в созвездии Центавра. Система состоит из нейтронной звезды, вращающейся вокруг массивного голубого сверхгиганта спектрального класса O. Со сверхгиганта на нейтронную звезду из-за сильного звёздного ветра происходит аккреция вещества, что приводит к образованию рентгеновского излучения (Podsiadlowski et al., 2002).

Her X-1 — рентгеновская двойная, впервые исследованная спутником Uhuru. Состоит из нейтронной звезды, на которую происходит аккреция вещества с оптической звезды (HZ Her) массой около двух масс Солнца, вероятно, вследствие заполнения звездой полости Роша. Источник обладает сложной переменностью, пульсации с периодом 1,24 с связана с вращением нейтронной звезды, затмения каждые 1,70 дней показывают орбитальный период двойной звезды, также наблюдаются вариации с периодом 35 дней, ассоциируемые с прецессией аккреционного диска (Diez et al., 2023).

Vela X-1 — массивная рентгеновская двойная система, состоящая из пульсара и оптической звезды — сверхгиганта HD 77581 (или же GP Vel). Она расположена в созвездии Парусов на расстоянии около 6200 световых лет от Солнца. Система Vela X-1 является затменно-переменной: примерно раз в девять дней интенсивность рентгеновского излучения уменьшается из-за того, что оптическая звезда заслоняет пульсар при движении по орбите. Известно всего семь таких затменно-переменных рентгеновских систем. Они интересны тем, что позволяют непосредственно измерить орбитальный период системы. Согласно измерениям, пульсар Vela X-1 является одной из самых массивных нейтронных звёзд, открытых на данный момент. Он имеет массу не менее $1{,}88 \pm 0{,}13$ солнечных масс (Привалов, 1966).

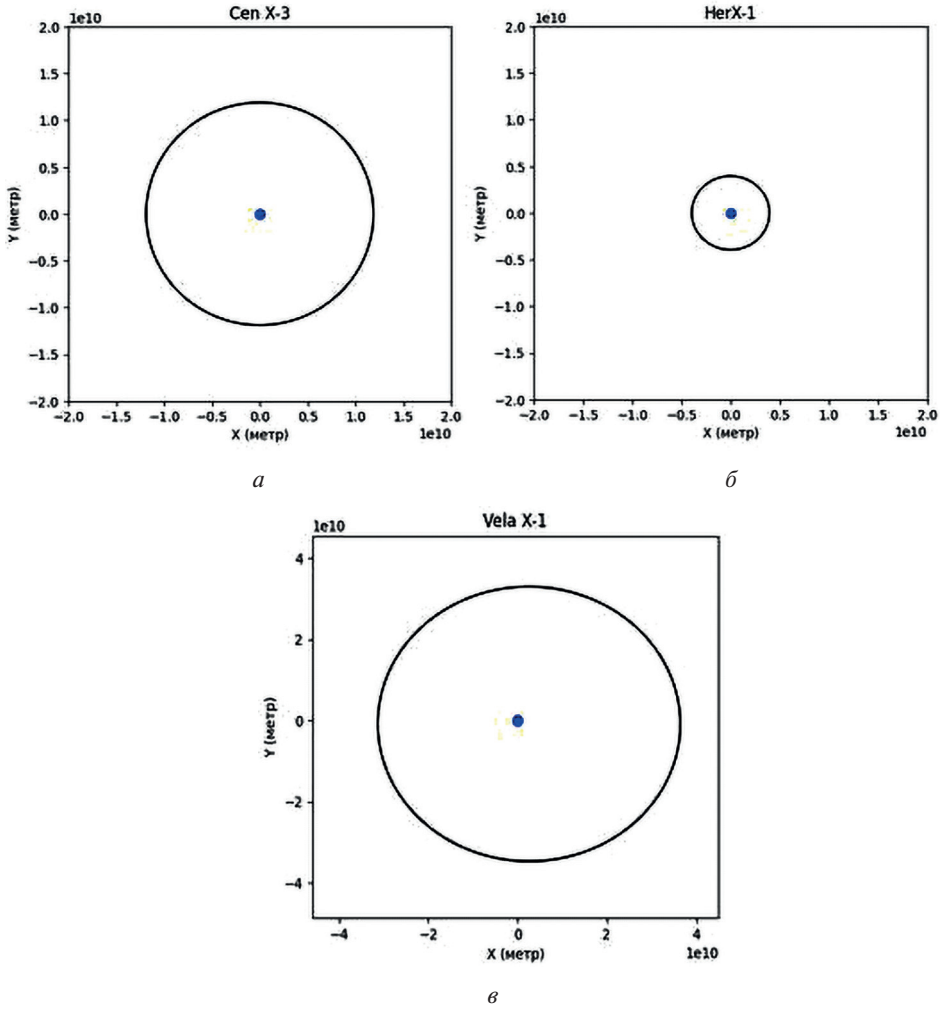
По известным орбитальным параметрам (Привалов, 1966; Diez et al., 2023; Podsiadlowski et al., 2002), а также зная, что их форма эллиптическая, с использованием параметрических уравнений для построения эллиптических орбит нейтронных звёзд (González-Galán et al., 2014)

$$\begin{cases} x = a\cos t, \\ y = b\sin t, \end{cases} 0 \leqslant t \leqslant 2\pi,$$

были получены модели орбитального движения нейтронной звезды в этих системах (рис. 3).

Исходя из параметров системы и полученных моделей орбит, можно сделать вывод, что орбиты нейтронной звезды в системе Cen X-3 и Her X-1 имеют форму

окружности, в то время как Vela X-1 имеет чуть сплюснутую форму из-за сравнительно небольшого эксцентриситета ~0,08, тем не менее, в центре орбит располагаются массивные оптические компаньоны.



а *б*

в

Рис. 3. Модели орбит двойных систем: *а* — Cen X-3; *б* — Her X-1; *в* — Vela X-1

Также в ходе работы были исследованы кривые блеска данных систем. Построены изображения кривых блеска за всё время наблюдения инструментом MAXI (*англ.* Monitor of All-sky X-ray Image), данные прихода фотонов от систем детектировались каждые 1,5 ч, что удобно для поиска коротких орбитальных периодов. Так как все три системы являются затменными, то по виду кривой блеска очень легко обнаружить периодическое движение нейтронной звезды вокруг компаньона. Таким образом, был осуществлён поиск орбитальных периодов двойных систем Cen X-3, Her X-1, Vela X-1. Полученные результаты сошлись с данными из литературы (Привалов, 1966; Diez et al., 2023; Podsiadlowski et al., 2002) и представлены в таблице и на рис. 4–6. По изображениям видно, что растущий поток фотонов в какой-то момент падает до нуля и такое повторяется с определённым

периодом, соответствующим каждой системе, это говорит о том, что нейтронная звезда затмевается своим компаньоном и в это время прибор не регистрирует от неё рентгеновского излучения. Как только нейтронная звезда выходит из тени своего оптического компаньона, рентгеновский поток начинает снова возрастать.

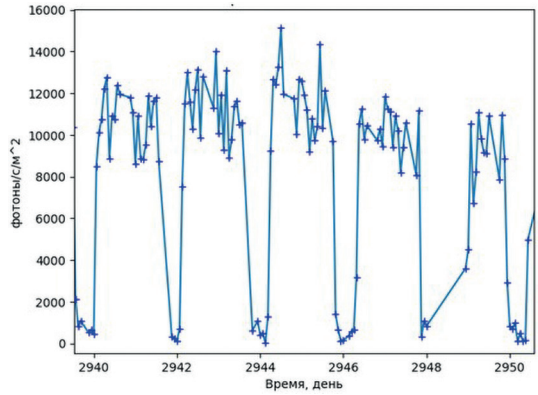


Рис. 4. Кривая блеска двойной системы Cen X-3 по данным инструмента MAXI, построена на ограниченном участке, для демонстрации периодического движения

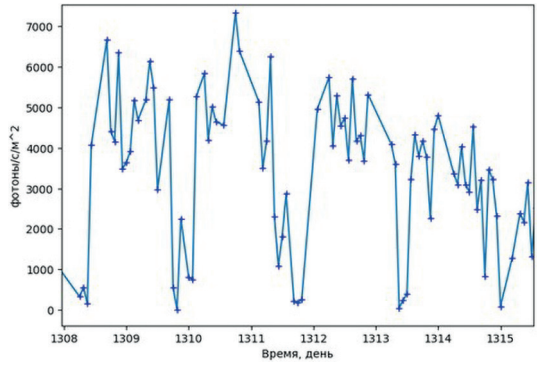


Рис. 5. Кривая блеска двойной системы Her X-1 по данным инструмента MAXI, построена на ограниченном участке, для демонстрации периодического движения

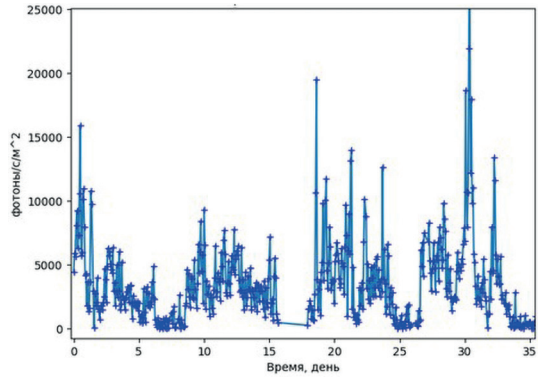


Рис. 6. Кривая блеска двойной системы Vela X-1 по данным инструмента MAXI, построена на ограниченном участке, для демонстрации периодического движения

Таким образом, была проделана масштабная работа по изучению движения объектов в гравитационном поле, в частности:

1) собрана экспериментальная установка,
2) она позволила наглядно исследовать траектории движения шарика в искусственном гравитационном поле;
3) было получено, что в зависимости от первоначальной потенциальной энергии шарика (которая задавалась высотой пусковой установки) его траектория движения может значительно изменяться, принимая форму эллипса или гиперболы, когда шарик вылетал за пределы ограниченного коробкой пространства;
4) были изучены параметры и траектории движения нейтронных звёзд для трёх рентгеновских двойных систем;
5) было получено, что орбиты нейтронной звезды в системе Cen X-3 и Her X-1 имеют форму окружности, в то время как Vela X-1 имеет чуть сплюснутую форму из-за сравнительно небольшого эксцентриситета ~0,08;
6) в качестве упражнения был также проведён поиск периодического движения по данным кривых блеска, полученных инструментом MAXI за всё время наблюдения этих систем. Полученные значения периодов сошлись с данными, взятыми из литературы. Эти результаты в дальнейшем помогут наглядно изучать движение тел в гравитационном поле, а также моделировать это движение.

ЛИТЕРАТУРА

Исаак Ньютон: Математические начала натуральной философии / пер. с лат. А. Н. Крылова. М.: Наука, 1989. 688 с.

Привалов И. И. Аналитическая геометрия. М.: Наука, 1966. 272 с.

Струве О., *Линдс Б.*, *Пилланс Э.* Элементарная астрономия. 2-е изд. М.: Наука, 1967.

Черепащук А. М. Тесные двойные звезды. Часть 1. М: Физматлит, 2013. 560 с.

Aarseth S. J. Gravitational N-body Simulations: Tools and Algorithms. Cambridge University Press, 2003. https://doi.org/10.1017/CBO9780511535246.

Bhattacharyya B., *Nityananda R.* Determination of the orbital parameters of binary pulsars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. 2008. V. 387. P. 273–278 http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13213.x.

Diez C. M., *Grinberg V.*, *Fürst F. et al.* Observing the onset of the accretion wake in Vela X-1 // Astronomy and Astrophysics. 2023. V. 74. Article. A147. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245708.

González-Galán A., *Negueruela I.*, *Castro N.et al.* Astrophysical parameters and orbital solution of the peculiar X-ray transient IGR J00370+6122 // Astronomy and Astrophysics. 2014. Article A131. 14 p. http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201423554.

Orellana M., *Romero G. E.* Gamma-Ray Emission from Be/X-ray Binaries // Astrophysics Space Science. 2005. V. 297. P. 167–178. https://doi.org/10.1007/s10509-005-7618-6.

Podsiadlowski Ph., *Rappaport S.*, *Pfahl E. D.* Evolutionary Sequences for Low- and Intermediate-Mass X-Ray Binaries // The Astrophysical J. 2002. V. 565. P. 1107–1133. https://doi.org/10.1086/324686.

Roy A. E. Orbital Motion // Taylor and Francis. 2004. 544 p. https://doi.org/10.1201/9780367806620.

Shirke P., *Bala S.*, *Roy J. et al.* A new measurement of the spin and orbital parameters of the high mass X-ray binary Centaurus X-3 using AstroSat // J Astrophysics and Astronomy. 2021. V. 42. Article 58. https://doi.org/10.1007/s12036-021-09710-w.

INVESTIGATION OF BODY TRAJECTORIES IN A GRAVITATIONAL FIELD

D. A. Melnichenko [1], ***A.S. Gorban*** [2]

[1] **School No. 1158, Moscow, Russia**
[2] **Space Research Institute RAS, Moscow, Russia**

The trajectories of the ball movement in an artificially created space under the influence of a gravitational field are shown and the dependence of the shape of the trajectory on the initial reserve of potential energy of the ball is revealed. The parameters and trajectories of neutron stars in binary systems were studied. It was found that the orbits of the neutron star in the Cen X-3 and its X-1 systems have a round shape, while Vela X-1 has a slightly oblate shape due to a relatively small eccentricity of ~0.08. The analysis of the light curves made it possible to determine the rotation periods of neutron stars in these systems, which is reliably consistent with the previously obtained results.

Keywords: motion in the gravitational field, X-ray binary star systems, orbital motion, periodicity, Cen X-3, Her X-1, Vela X-1

Melnichenko — 7th grade student, meldima2011@mail.ru
Gorban Alena Sergeevna — magister of physical and mathematical sciences

УДК 520.84 DOI: 10.21046/KMU-2025-283-291

ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «ДРИАДА»: ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

А. В. Назарова, А. А. Федорова, А. Ю. Трохимовский

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Проведена оценка чувствительности спектрометра высокого разрешения ближнего инфракрасного диапазона «Дриада» для измерений содержания таких парниковых газов, как углекислый газ (CO_2) и метан (CH_4). Измерения будут проводиться в полосах 1,58 и 1,6 мкм CO_2 и 1,64 мкм CH_4. Предполагаемые значения разрешающей силы прибора варьировались от 10 000 до 25 000. Для оценки чувствительности использовалась модель LBLRTM (*англ*. Line-by-Line Radiative Transfer Model), предназначенная для расчёта спектров пропускания атмосферы Земли в широком спектральном диапазоне. Чувствительность прибора для $R = [10\,000; 25\,000]$ лежит в диапазоне от 0,5 до 4,3 % или от 2 до 18 ppm для CO_2, и от 0,5 до 3,4 % или от 10 до 62 ppb для CH_4. Также были проанализированы различия в спектроскопических параметрах исследуемых газов для используемой в алгоритме LBLRTM (*англ*. Line-By-Line Radiative Transfer Model) спектроскопической базы данных колебательно-вращательных переходов молекул HITRAN2012 (*англ*. an acronym for High Resolution Transmission) и последней версии HITRAN2020. Планируется разработка собственного алгоритма переноса излучения в атмосфере с использованием спектроскопии HITRAN2020 с адаптацией алгоритмов применяемых для спектрометров СПИКАМ ИК (инфракрасный) и ACS NIR (*англ*. Atmospheric Chemistry Suite Near-Infrared), работающих на орбите Марса.

Ключевые слова: спектрометр высокого разрешения, чувствительность, парниковые газы, дистанционные измерения Земли

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемый на Земле парниковый эффект тесно связан с содержанием в атмосфере таких газов, как углекислый (CO_2) и метан (CH_4). Одним из источников является хозяйственная деятельность человека, что приводит к увеличению среднего уровня концентрации газов. В настоящее время концентрация парниковых газов (ПГ) антропогенного происхождения в атмосфере Земли возрастает с каждым годом. Увеличение объёмов выбросов, связанных с деятельностью человека, привело к текущему содержанию парниковых газов, по данным NOAA; CO_2 на март 2024 г. — 423,4 ppm (*англ*. parts per million, отношения частей на миллион), на март 2025 г. — 426,4 ppm (https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html); CH_4 на февраль 2024 г. — 1925.99 ppb (*англ*. parts per billion, отношения частей на миллиард), на февраль 2025 г. — 1933.97 ppb (https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/). Из-за влияния, оказываемого на окружающую среду, возникла необходимость в контроле концентрации выбросов основных парниковых газов и поиска мест их происхождения. Помимо наземных сетей измерения для отслеживания изменений состава атмосферы необходимы спутники и приборы для дистанционного мониторинга парниковых газов. Наиболее эффективным методом, решающим эту задачу, является спектральный анализ солнечного света, отражённого от поверхности в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне. В качестве инструмента дистанционного мониторинга используются спектрометры высокого спектрального

Назарова Анастасия Витальевна — инженер, аспирантка, acya-cop@yandex.ru
Федорова Анна Александровна — ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией, кандидат физико-математических наук
Трохимовский Александр Юрьевич — главный специалист, кандидат физико-математических наук

разрешения. Среди предыдущих космических экспериментов, осуществлявших измерение концентрации парниковых газов, такие: GOSAT (*англ.* Greenhouse Gases Observing Satellite) (Kasuya et al., 2009), OCO-2 (*англ.* Orbiting Carbon Observatory 2) (Crisp, 2015), TanSat (Wang et al., 2014), TROPOMI (CH_4) (*англ.*Tropospheric Ozone-Monitoring Instrument) (de Vries et al., 2012). В ИКИ РАН в 2009 г. был разработан спектрометр РУСАЛКА (РУчной Спектральный АнаЛизатор Компонентов Атмосферы) (Кораблев и др., 2011) для наблюдения ПГ космонавтами с борта Международной космической станции (МКС).

Опыт предыдущих миссий и эксперимента РУСАЛКА использовался при формировании требований к будущим приборам для космического мониторинга

К эксперименту «Дриада» (Трохимовский и др., 2022) предъявляются следующие требования:

- высокая спектральная разрешающая сила: для разрешения отдельных линий поглощения парниковых газов в ближнем ИК-диапазоне требуется разрешающая сила ($R = \lambda/\Delta\lambda$, отношение длины волны к наименьшей разности длин волн двух монохроматических спектральных линий, при которой спектральный прибор их ещё разделяет) не менее 20000;
- высокая чувствительность (отношение сигнал/шум (*англ.* signal-to-noise ratio — SNR)) в основных спектральных каналах, обеспечивающих измерение CO_2 и CH_4;
- широкий динамический диапазон, достаточный для наблюдений как участков поверхности с низкой отражающей способностью, так и солнечного блика, отражённого от поверхности воды;
- регистрация поглощения молекулярного кислорода O_2 в полосе 0,76 мкм с разрешающей силой не менее 170 00 одновременно с измерениями и CO_2 и CH_4;
- одновременные измерения в нескольких спектральных участках видимого диапазона спектра для определения типа и содержания аэрозоля;
- измерения в одной из насыщенных полос водяного пара для определения высот и характеристик перистых облаков.
- полосы поглощения парниковых газов и водяного пара лежат в ближнем диапазоне 1,4–1,67 мкм, который будет наблюдаться спектрометром, что позволит регистрировать поглощение CO_2 в полосах 1,58 и 1,6 мкм и CH_4 в полосе 1,65 мкм.

РАСЧЁТ СПЕКТРОВ НА БАЗЕ МОДЕЛИ LBLRTM

В данной работе в качестве базовой модели переноса излучения была взята модель переноса излучения в атмосфере Земли LBLRTM (*англ.* Line-by-line Radiative Transfer Model) (Clough et al., 2005). В качестве спектроскопической информации используется база данных колебательно-вращательных переходов молекул HITRAN2012 (Rothman et al., 2013), включая коэффициент сдвига давления, температурную зависимость полуширины и коэффициент собственного уширения водяного пара. Форма линии Фойгта рассчитывается на всех уровнях атмосферы и служит основой для формы линии LBLRTM. Также учитывается континуум водяного пара с собственным и столкновительным уширением, модель MT_CKD. В качестве солнечного спектра используется модель (Kurucz, 1992). Моделирование проводилось в спектральном диапазоне от 5600 до 7400 $см^{-1}$, что соответствует 1,35–1,79 мкм, включающем полосы поглощения интересующих нас молекул. Моделирование производится для случая надирных наблюдений в ближнем ИК-диапазоне, когда последовательно считается нисходящий поток к поверхности, отражение от неё и восходящий поток к наблюдателю. Отражение

от поверхности считается ламбертовым. Альбедо берётся для поверхности моря. В коде LBLRTM также учитывается рэлеевское рассеяние. Расчёты выполнены для различных среднеклиматических профилей температуры (модель AFGL) (Anderson et al., 1986). В ходе работы варьировались значения концентрации газов.

Был проведён расчёт спектров пропускания атмосферы Земли с учётом поглощения молекул CO_2, CH_4 и H_2O. Вычисления проводились как для всех молекул в выбранном диапазоне, так и для каждой молекулы отдельно. Относительное содержание газов взято 410 ppm для CO_2, 1900 ppb для CH_4. Результаты представлены на рис. 1, где представлен монохроматический спектр отражённого солнечного излучения с учётом поглощения молекул CO_2, CH_4, H_2O и солнечный спектр (*а*) и монохроматический спектр пропускания атмосферы (*б*).

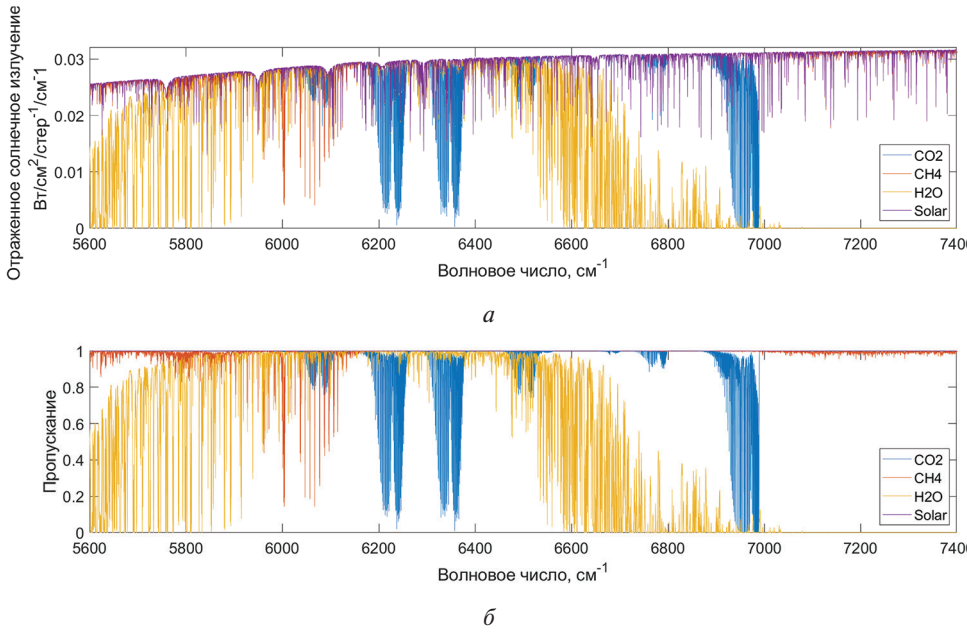


Рис. 1. Монохроматический спектр для молекул CO_2 (синяя кривая), CH_4 (красная кривая), H_2O (жёлтая кривая) и солнечный спектр (фиолетовая кривая): *а* — отражённого солнечного излучения; *б* — пропускания атмосферы

Оценка чувствительности проводилась по нескольким сильным линиям углекислого газа и метана, предполагая вариации отношение сигнала к шуму спектрометра, варьирующееся от 50 до 200.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ОЦЕНКЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Полученные спектры пропускания атмосферы Земли могут быть использованы для исследования чувствительности прибора при заданных параметрах спектрального разрешения и отношения сигнал/шум. Для исследования чувствительности эксперимента необходимо провести свёртку полученных спектров монохроматического излучения со спектральным разрешением прибора. Поскольку в списке требований к параметрам эксперимента «Дриада» указано значение разрешающей силы не менее 20 000, при выполнении расчётов этот параметр варьировался

от 10 000 до 25 000. В качестве аппаратной функции прибора была взята гауссова функция. Пример свёртки монохроматического спектра пропускания атмосферы Земли с $R = 20\,000$ представлен на рис. 2.

На рис. 3 представлена чувствительность для CO_2 и CH_4 в количественном (ppm) (рис. 3*а*, 4*а*) и процентном (рис. 3*б*, 4*б*) виде.

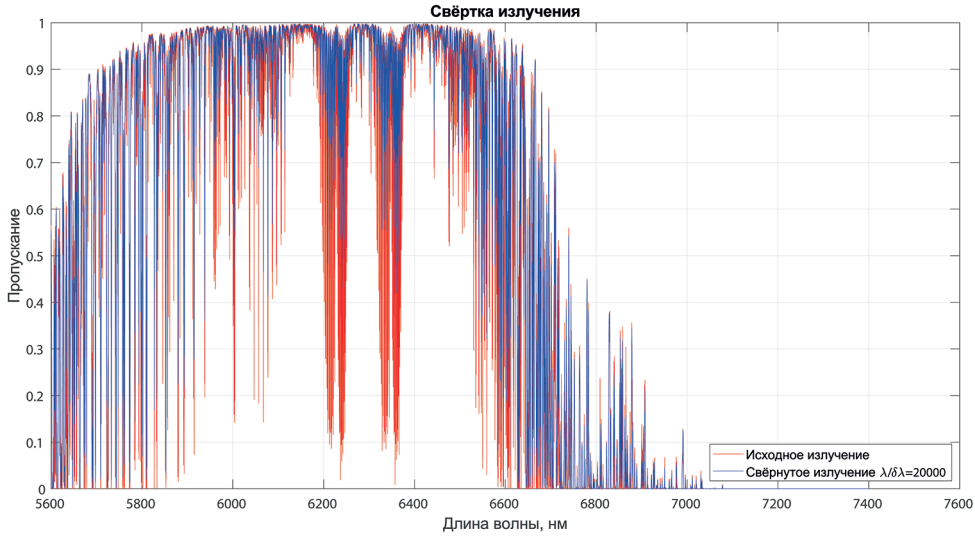
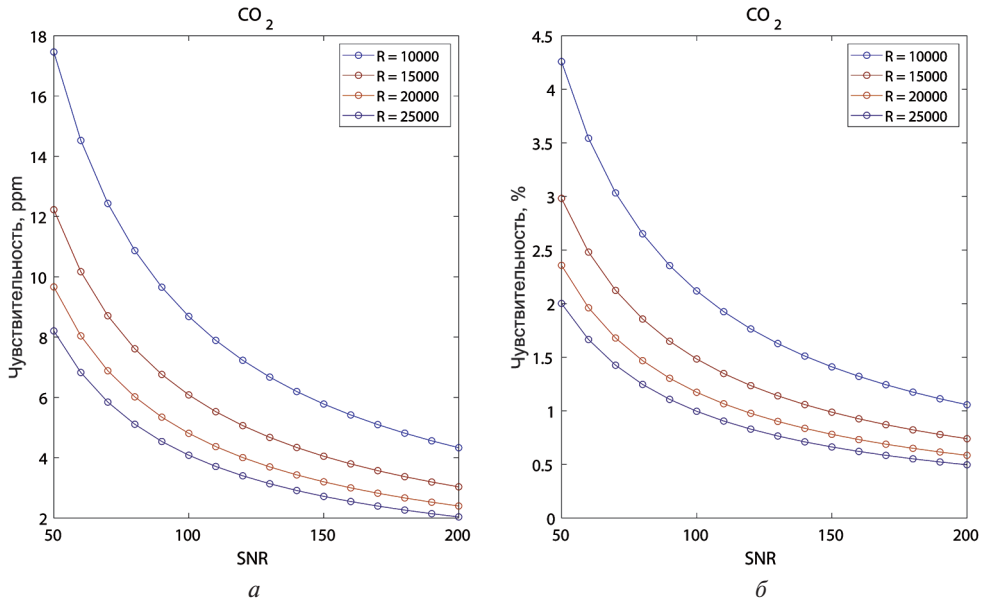


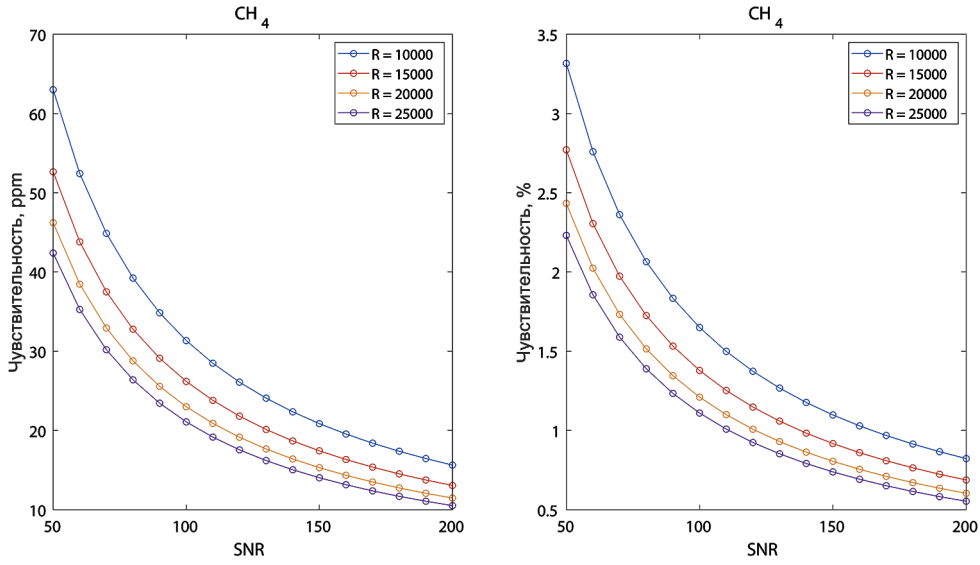
Рис. 2 Монохроматический спектр пропускания атмосферы Земли в надирной геометрии (солнечный зенитный угол равен 30°) с учётом поглощения молекул CO_2, CH_4, H_2O (красная кривая) и свёртка с аппаратной функцией для $R = 20\,000$ (синяя кривая)



а *б*

Рис. 3 Чувствительность CO_2 от соотношения сигнал/шум для $R = 10\,000$ (синяя кривая); 15 000 (красная кривая); 20 000 (жёлтая кривая); 25 000(фиолетовая кривая): *а* — в количественном виде; *б* — в процентном виде

Результаты, полученные для углекислого газа, показывают, что чувствительность прибора изменяется от 2 до 18 ppm или от 0,5 до 4,3 % для CO_2 в зависимости от разрешающей силы и соотношения сигнал/шум. С увеличением разрешающей силы от 10 000 до 25 000 чувствительность меняется от 6 до 2,8 ppm для SNR = 150, или от 1,5 до 0,75 %, а при $R = 20\,000$ и увеличении SNR от 50 до 200 — от 9,8 до 2,4 ppm, или от 2,4 до 0,6 %.



а *б*

Рис. 4. Чувствительность CH_4 от соотношения сигнал-шум для R = 10 000 (синяя кривая); 15 000 (красная кривая); 20 000 (жёлтая кривая); 25 000(фиолетовая кривая): *а* — в количественном виде; *б* — в процентном виде

Чувствительность прибора для молекулы CH_4 лежит в диапазоне от 10 до 62 ppb или от 0,5 до 3,4 %. С увеличением разрешающей силы от 10 000 до 25 000 значение чувствительности меняется от 25 до 15 ppb для SNR = 150, или от 1,3 до 0,75 %, а при $R = 20\,000$ и увеличении SNR от 50 до 200 — от 46 до 11 ppb, или от 2,49 до 0,6 %.

Требование к чувствительности для CO_2 составляет 0,5 % (Chedin et al., 2003), по полученным результатам можно сделать вывод, что выполнение данного требования достигается при значениях не менее $R = 25\,000$ с учётом возможных вариаций отношения сигнал/шум.

СРАВНЕНИЕ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ

Оценки чувствительности, представленные в предыдущей главе, проводились на основе модели переноса излучения LBLRTM, где в качестве спектроскопической базы данных используется HITRAN 2012 г. (Rothman et al., 2013). В настоящей момент последней версией этой базы является HITRAN 2020 г. (Gordon et al., 2022). Поэтому нами было выполнено сравнение коэффициентов поглощения исследуемых парниковых газов в выбранном спектральном диапазоне двух версий — HITRAN2012 и HITRAN2020. Далее приведены изменения в процентном виде коэффициентов поглощения исследуемых молекул ПГ для этих спектроско-

пических баз данных при заданных параметрах давления $P = 1$ атм и температуры $T = 300$ K: CO_2 (рис. 5), CH_4 (рис. 6), а также коэффициенты поглощения H_2O для HITRAN2012 и HITRAN2020 (рис. 7).

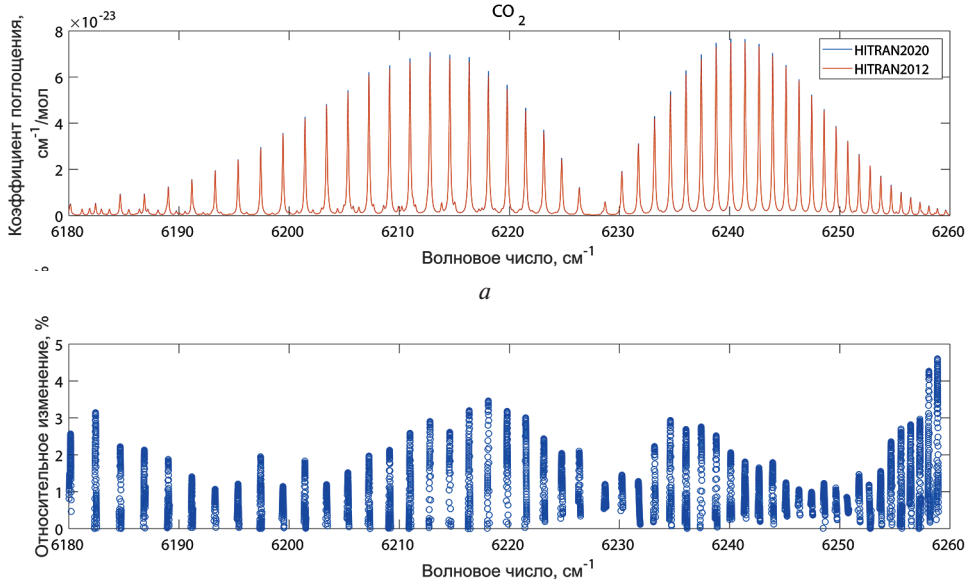


Рис. 5. Коэффициент поглощения молекулы CO_2 HITRAN2012 (красная кривая) и HITRAN2020 (синяя кривая) (*а*); относительное изменение коэффициента CO_2 поглощения для сильных линий (в %) (*б*)

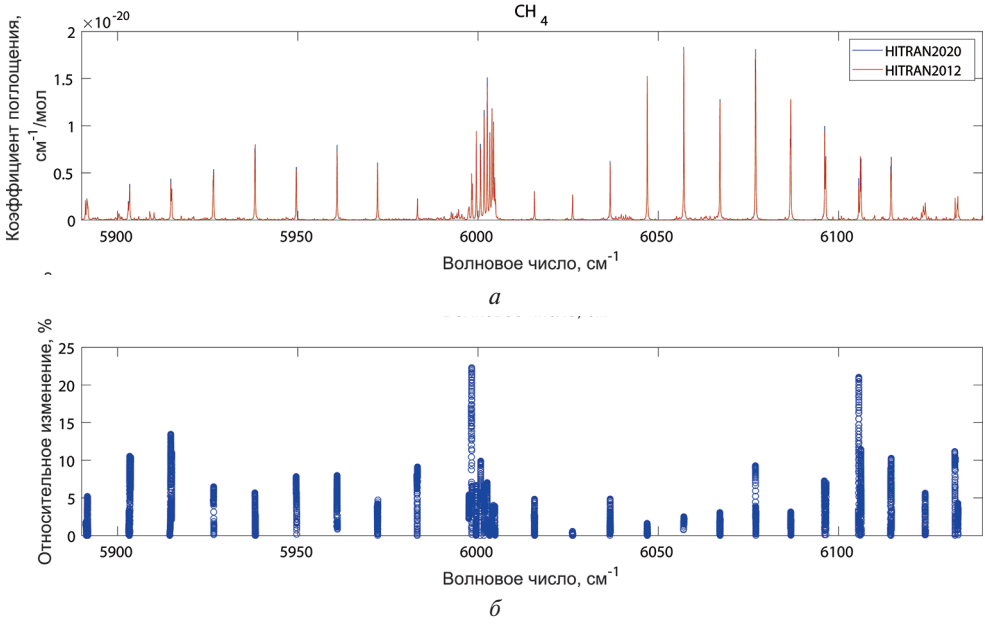


Рис. 6. Коэффициент поглощения молекулы CH_4 HITRAN2012 (красная кривая) (*а*) и HITRAN2020 (синяя кривая); относительное изменение коэффициента поглощения CH_4 для сильных линий (в %) (*б*)

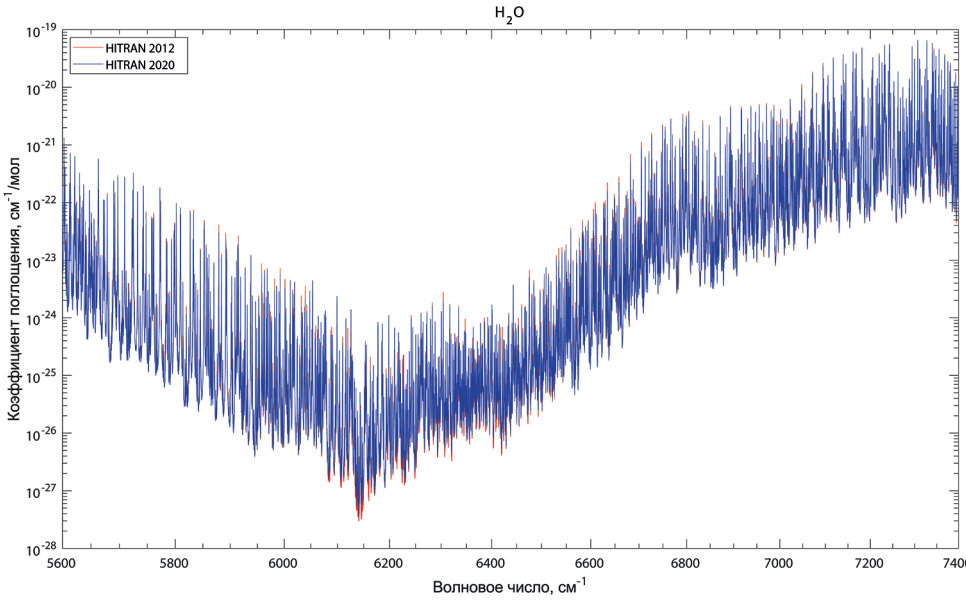


Рис. 7. Коэффициенты поглощения H_2O для HITRAN2012 (красная кривая) и HITRAN2020 (синяя кривая)

Различия между базами данных достигают 4,6 % для CO_2 в диапазоне сильных линий от 5890 до 6140 $см^{-1}$ и 22 % для CH_4 в диапазоне сильных линий от 6180 до 6260 $см^{-1}$. Тот факт, что доступная версия модели LBLRTM включает устаревшую версию спектроскопии и не учитывает многократного рассеяния излучения на аэрозолях, приводит к необходимости уйти от модели LBLRTM, и перейти к разработке собственного алгоритма переноса излучения в ближнем ИК-диапазоне. Алгоритм разрабатывается на базе существующей модели переноса излучения, разработанной для ACS NIR и СПИКАМ ИК (Fedorova et al., 2020; Trokhimovskiy et al., 2015).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент «Дриада» планируется для дистанционных измерений атмосферных парниковых газов с орбиты искусственного спутника Земли в ближнем инфракрасном диапазоне для измерения содержания углекислого газа (в полосах 1,58 и 1,6 мкм), метана (в полосе 1,65 мкм), водяного пара и детектирования перистых облаков. Точность измерения прибора должна составлять не менее 0,5 % для значений относительного содержания парниковых газов. Для исследования чувствительности была использована модель переноса излучения LBLRTM для расчёта монохроматического спектра пропускания атмосферы для молекул CO_2, CH_4 и H_2O. В результате было получено, что чувствительность прибора для $R = [10000; 25000]$ лежит в диапазоне от 0,5 до 4,3 % или от 2 до 18 ppm для CO_2, и от 0,5 до 3,4 % или от 10 до 62 ppb для CH_4, что соответствует требованиям к чувствительности для значений $R = 25\,000$. Однако спектроскопия LBLRTM устарела для нашего спектрального диапазона, относительное изменение сечения поглощения в сильных линиях составляет до 4,6 % для CO_2 и до 22 % для CH_4, что может привести к ошибке определения содержания. Кроме того, в LBLRTM не включено решение уравнения переноса с учётом многократного рассеяния.

На базе алгоритмов восстановления содержания водяного пара по наблюдениям марсианской атмосферы в ближнем инфракрасном диапазоне для эксперимента СПИКАМ ИК (Trokhimovskiy et al., 2015) миссии «Марс-Экспресс» и эксперимента ACS NIR (Korablev et al., 2019) миссии «ЭкзоМарс Trace Gas Orbiter» создаётся собственный алгоритм переноса излучения, включающий многократное рассеяние и последнюю версию HITRAN2020.

ЛИТЕРАТУРА

Кораблев О. И., *Трохимовский А. Ю.*, *Виноградов И. И. и др.* Прибор РУСАЛКА для измерения содержания углекислого газа и метана в атмосфере с борта Международной космической станции // Оптический журн. 2011. Т. 78. № 5. С. 44–58.

Трохимовский А. Ю., *Кораблев О. И.*, *Иванов Ю. С. и др.* Инфракрасный канал научной аппаратуры «Дриада» для измерения содержания парниковых газов из космоса // Современ. проблемы дистанцион. зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 50–60. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-50-60.

Anderson G. P., *Clough S. A.*, *Kneizys F. X. et al.* AFGL atmospheric constituent profiles (0.120 km). 1986. 43 p.

Chédin A., *Saunders R.*, *Hollingsworth A. et al.* The feasibility of monitoring CO_2 from high-resolution infrared sounders // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2003. V. 108. Iss. D2. https://doi.org/10.1029/2001JD001443.

Clough S. A., *Shephard M. W.*, *Mlawer E. J. et al.* Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2005. V. 91. Iss 2. P. 233–244. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2004.05.058.

Crisp D. Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) // Earth observing systems XX. SPIE, 2015. V. 9607. Article 960702. https://doi.org/10.1117/12.2187291.

de Vries J., *Hoogeveen R.*, *Voors R. et al.* Technology evolution of the TROPOMI instrument // 2012 IEEE Intern/ Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2012. P. 2876–2879. DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6350726.

Fedorova A. A., *Montmessin F.*, *Korablev O. et al.* Stormy water on Mars: The distribution and saturation of atmospheric water during the dusty season // Science. 2020. V. 367. Iss. 6475. P. 297–300. DOI: 10.1126/science.aay9.

Gordon I. E., *Rothman L. S.*, *Hargreaves R. J. et al.* The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2022. V. 277. Article 107949. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107949.

Kasuya M., *Nakajima M.*, *Hamazaki T.* Greenhouse gases observing satellite (GOSAT) program overview and its development status // Trans. Japan Soc. Aeronautical and Space Sciences. Space Technology Japan. 2009. V. 7. Iss. ists26. Article To_4_5-To_4_10.

Korablev O., *Vandaele A. C.*, *Montmessin F. et al.* No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations // Nature. 2019. V. 568. Iss. 7753. P. 517–520.

Kurucz R. L. Model atmospheres for population synthesis // The Stellar Populations of Galaxies: Proc. 149th Symp. Intern. Astronomical Union. Cambridge University Press, 1992. V. 149. P. 225–232.

Rothman L. S., *Gordon I. E.*, *Babikov Y. et al.* The HITRAN2012 molecular spectroscopic database // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2013. V. 130. P. 4–50. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.07.002.

Trokhimovskiy A., *Fedorova A.*, *Korablev O. et al.* Mars' water vapor mapping by the SPICAM IR spectrometer: Five Martian years of observations // Icarus. 2015. V. 251. P. 50–64. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.10.007.

Wang Q., *Yang Z. D.*, *Bi Y. M.* Spectral parameters and signal-to-noise ratio requirement for TANSAT hyper spectral remote sensor of atmospheric CO_2 // Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation V. 9259. 2014. P. 351–366. https://doi.org/10.1117/12.2067572.

MEASUREMENTS OF GREENHOUSE GASES' CONCENTRATION IN EARTH'S ATMOSPHERE BY EXPERIMENT DRIADA: SENSITIVITY'S ESTIMATION

A. V. Nazarova, A. A. Fedorova, A. Yu. Trokhimovskiy

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

The sensitivity of the high-resolution near-infrared spectrometer Driada was evaluated for measuring the content of greenhouse gases such as carbon dioxide (CO_2) and methane (CH_4). Measurements will be conducted in the 1.58 and 1.6 μm CO_2 bands and the 1.64 μm CH_4 band. The estimated resolution of the instrument ranged from 10,000 to 25,000. The LBLRTM (Line-by-Line Radiative Transfer Model) was used to assess the sensitivity. This model is designed to calculate the transmission spectra of the Earth's atmosphere over a wide spectral range. The sensitivity of the device for R = [10000; 25000] ranges from 0.5 to 4.3 % or from 2 to 18 ppm for CO_2, and from 0.5 to 3.4 % or from 10 to 62 ppb for CH_4. The differences in the spectroscopic parameters of the gases under study were also analyzed for the spectroscopic database of vibrational-rotational transitions of molecules HITRAN2012 used in the LBLRTM algorithm and the latest version of HITRAN2020. It is planned to develop an algorithm for radiation transfer in the atmosphere using HITRAN2020 spectroscopy, adapting the algorithms used for SPICAM IR spectrometers and ACS NIR (Atmospheric Chemistry Suite Near-Infrared), operating in Mars orbit.

Keywords: high resolution spectrometer, sensitivity, greenhouse gases, remote, Earth measurements

Nazarova Anastasiia Vitalevna — engineer, postgraduate, acya-cop@yandex.ru
Fedorova Anna Aleksandrovna — leading researcher, head of the laboratory, candidate of physical and mathematical sciences
Trokhimovskiy Aleksandr Yurevich — main specialist, candidate of physical and mathematical sciences

УДК 004.415.2:524.354.4 DOI: 10.21046/KMU-2025-292-298

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДА РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЛЬСАРА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В БОРТОВОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

А. А. Новикова [1], ***М. В. Бунтов*** [1], ***М. А. Заева*** [2]

[1] **Институт космических исследований РАН, Москва, Россия**
[2] **Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт), Москва, Россия**

Представлены результаты разработки программно-алгоритмического обеспечения для отечественного радиационно-стойкого микропроцессора 1892ВМ12АТ, которое позволяет провести оценку периода рентгеновского пульсара при помощи метода наложения эпох. В качестве исходных данных для проверки алгоритма взята серия времён прибытия фотонов (события) от хорошо известного рентгеновского пульсара Crab, зарегистрированная телескопом ART-XC орбитальной обсерватории «Спектр-РГ».

Ключевые слова: космическая навигация, критерий Пирсона, оценка периода, программирование микропроцессоров, рентгеновские пульсары, наложение эпох, язык С

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение за рентгеновскими пульсарами может предоставить полезную навигационную информацию космическим аппаратам. Пульсары обладают стабильным, предсказуемым поведением и могут быть однозначно идентифицированы по форме профиля сигнала, поэтому они могут рассматриваться в качестве основы для создания навигационной системы в дальнем космическом пространстве. Ключевыми методами навигации при помощи пульсаров являются оценка периода вращения и восстановление профиля импульса. Для выполнения такого алгоритма потребуется использование высокопроизводительного процессора, который обеспечивал бы выполнение точных вычислений при экстремальных условиях в космосе. В данной работе выбран радиационно-стойкий микропроцессор 1892ВМ12АТ.

МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Метод наложения эпох

В настоящее время для нахождения периода вращения рентгеновского пульсара применяется наложение эпох. При наложении эпох данные сначала складываются по модулю пробного периода и затем объединяются, а для проверки восстановленного профиля используется критерий χ^2 Пирсона (Song et al., 2023).

Метод наложения эпох для поиска периодических сигналов особенно полезен при рентгеновских астрономических наблюдениях по ряду причин. К ним относятся более высокая чувствительность к несинусоидальным формам импульсов, характерным для рентгеновских пульсаров. Кроме того, наложение эпох обеспечивает простой подход к обработке пробелов, которые регулярно появляются в спутниковых данных. Таким образом, отслеживается не только количество со-

Новикова Анастасия Андреевна — инженер, магистрант, anovikova@cosmos.ru
Бунтов Михаил Владимирович — начальник лаборатории
Заева Маргарита Анатольевна — доцент, кандидат технических наук

бытий, помещённых в каждый бин фазы импульса, но и фактическое время интеграции на бин фазы (Leahy et al., 1983).

Учитывая большие расстояния в космическом пространстве и, следовательно, низкий поток рентгеновского излучения пульсара, пульсар не может быть обнаружен по регулярно распределённым импульсам. В этом случае космический аппарат может зарегистрировать лишь серию событий в течение экспозиции, которая длится от t_0 до t_f (Wang et al., 2023). Следует отметить, что событие указывает не только на прибытие рентгеновского фотона от пульсара, но также, возможно, на прибытие фотона от рентгеновского фонового излучения, космических частиц и туманности, окружающей пульсар. Когда зарегистрировано M событий, их можно обозначить как $\{t_i\}_{i=1}^{M}$, где t_i обозначает время прибытия i-го события.

Когда период сигнала пульсара известен и равен P, то эмпирический профиль может быть восстановлен из $\{t_i\}_{i=1}^{M}$. Этот метод восстановления называется наложением эпох. Предполагая, что экспозиция $[t_0, t_f]$ содержит N периодов, наложение эпох состоит из трёх шагов (рис. 1):

1) деление i-го ($i = 1, 2, ..., N$) периода на N_b временных интервалов (бинов), каждый из которых имеет длительность $T_b = P/N_b$;
2) события, попадающие в j-й бин последних периодов, складываются обратно в j-й бин первого периода;
3) подсчёты событий в каждом бине нормализуются.

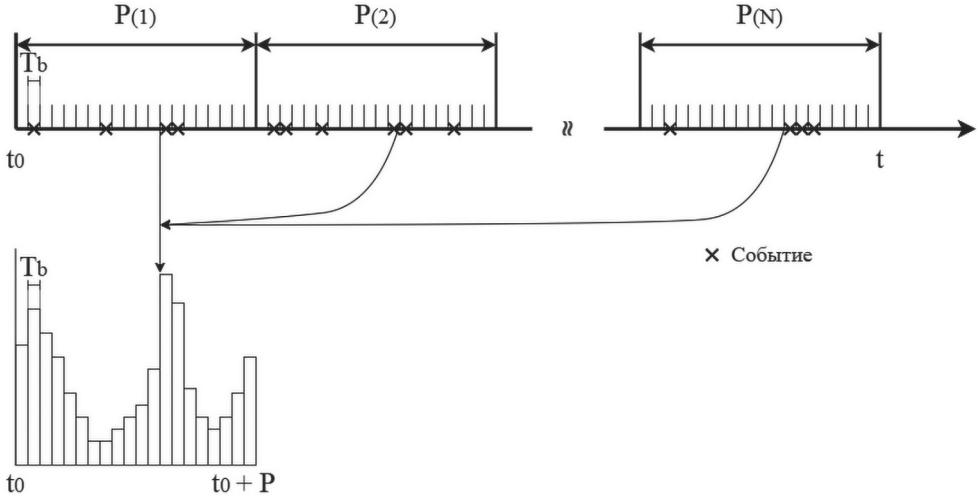


Рис. 1. Процедура наложения эпох

Аналогично можно провести наложение эпох, разбивая период на фазовые бины, следовательно, по оси абсцисс будет фаза сигнала.

Для того чтобы найти период пульсара для каждого пробного периода из выбранного диапазона периодов строится гистограмма распределения нормализованного количества фотонов по фазовым бинам и проводится тест Пирсона на принадлежность полученного распределения к равномерному. Вдали от наилучшего периода распределение будет выглядеть как равномерное. Для наилучшего периода значение критерия χ^2 Пирсона будет максимальным, и гипотеза о равномерности распределения не будет выполняться (Leahy et al., 1983). Итерационная процедура поиска периода представлена на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма поиска периода при помощи метода наложения эпох

Встраиваемая система

Так как для выполнения алгоритма навигации требуется автономная система, которая могла бы выполнять вычисления на борту космического аппарата, необходимо использование вычислительных систем, подходящих для работы в экстремальных условиях. В первую очередь необходимо обеспечить радиационную стойкость такой системы. Для этих целей может подойти радиационно-стойкий микропроцессор архитектуры MIPS32 1892ВМ12АТ.

Микропроцессор 1892ВМ12АТ имеет тактовую частоту 100 МГц, он установлен на исследовательской плате. На плате содержатся узлы преобразования питания, монитора питания, генератор, ОЗУ (оперативное запоминающее устройство), ПЗУ (постоянное запоминающее устройство), колодка для установки энергонезависимой флеш-памяти NAND Flash в корпусе TSOP48 (*англ.* Thin Small Outline Package) по стандарту ONFI (*англ.* Open NAND Flash Interface), драйвер RS232. На плате установлены соединители с шагом 2,54 мм для интерфейсов SPI (*англ.* Serial Peripheral Interface), GPIO (*англ.* General-Purpose Input/Output) и шины памяти, а также интерфейс SpaceWire.

В качестве исходных данных алгоритма поиска периода выступают времена регистрации фотонов. Времена событий имеет тип double, который занимает 8 байт в памяти. Минимально возможное количество времён (событий) для корректной оценки периода равно 100 тыс. Тогда для хранения 100 тыс. чисел типа double потребуется 781,25 Кбайт памяти. На плате с данным микропроцессором располагается четыре микросхемы ОЗУ, каждая по 512 Кбайт, что является достаточным для работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве исходных данных для проверки алгоритма по поиску периода взята серия времён регистрации фотонов от рентгеновского пульсара Crab с периодом $P = 0{,}03382535$ с, зарегистрированная телескопом ART-XC орбитальной

обсерватории «Спектр-РГ» (Павлинский и др., 2022; Сюняев и др., 2022). Темп счёта событий от источника составляет примерно 300 событий/с, а от шума — 0,01 событий/с. Следовательно, на каждые 30 тыс. событий от источника приходится 1 событие от шума.

Разработан и отлажен алгоритм, который позволяет производить наложение эпох для временного ряда событий. Исходными данными являются суммарное количество событий, пробный период и количество временных или фазовых бинов. На рис. 3 показан результат наложения эпох с разбиением на фазовые бины для данных с телескопа.

Перед выполнением алгоритма на микропроцессоре проведён поиск периода для 900 тыс. событий с телескопа в интервале пробных периодов [0,03382; 0,03383] с с шагом 1 нс на персональном компьютере. Время экспозиции, необходимое для того чтобы зарегистрировать такое количество событий с телескопа, составляет 56,24 мин.

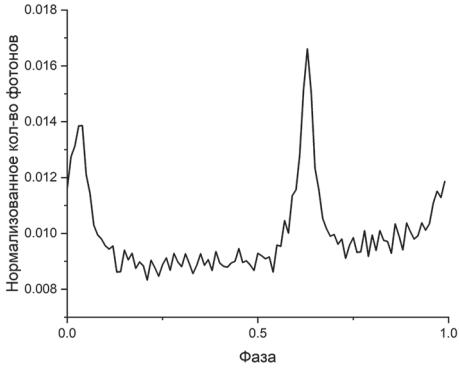


Рис. 3. Результат наложения эпох для данных с телескопа

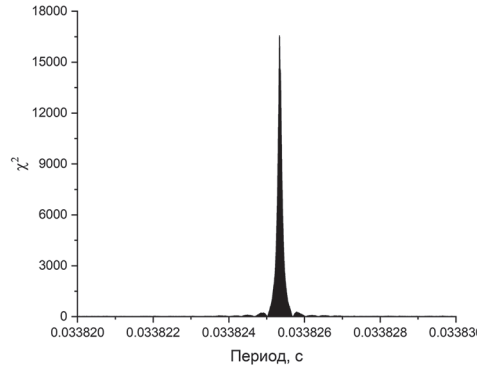


Рис. 4. Зависимость критерия Пирсона от пробного периода для данных с телескопа

Полученные результаты представлены на рис. 4. Форма зависимости имеет вид sinc-функции в квадрате, что соответствует теории (Leahy et al., 1983), причём с явно выраженными вторичными лепестками благодаря малому количеству шума. Восстановленный сигнал с наилучшим периодом $P = 0{,}033825341$ с представлен на рис. 5. Для визуальной оценки построенного периодического профиля период должен быть найден минимум с точностью $\delta = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ %, и полученный период соответствует этому критерию.

Также необходимо объяснить причину, по которой для поиска периода были выбраны определённые интервалы, которые близки к наилучшему значению периода. Предполагается, что космический аппарат движется по установленной заранее траектории, и имеется представление о примерном его местонахождении, соответственно, заранее известны космические объекты, находящиеся поблизости. Благодаря наличию базы данных пульсаров, в которой содержится информация о профилях импульсов и периодах пульсаров, можно выбирать диапазон периода, близкий к эталонному.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда данные зашумлены. События, зарегистрированные телескопом от пульсара Crab, исходят от сильного источника. С учётом того, что на каждые 30 тыс. событий приходится 1 шумовое событие, то для 900 тыс. событий будет всего 30 событий от шума. Предполагается, что влияние такого количества шума на итоговый результат нахождения периода минимально.

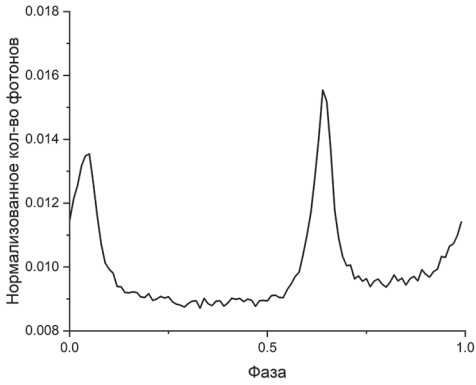


Рис. 5. Восстановленный сигнал с периодом P = 0,033825341 с

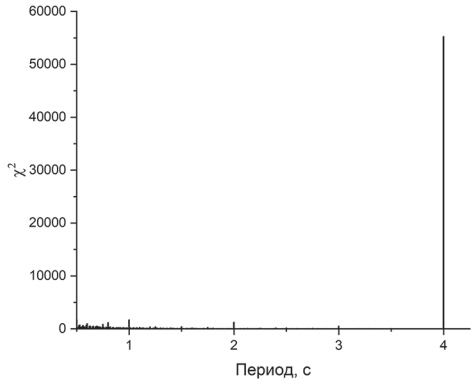


Рис. 6. Зависимость критерия Пирсона от пробного периода для сгенерированных данных с равновероятным шумом для 100 тыс. событий

Для того чтобы оценить влияние шума на нахождение периода слабого источника рентгеновского излучения, была сгенерирована временная последовательность событий с темпом 0,1 событий/с от функции вида $y(t) = \sin(\pi t) + \sin(3\pi t) + 2$. Также сгенерированы времена событий от шума и помещены в последовательность событий от источника. Рассмотрен случай, когда вероятность возникновения события от шума и от источника одинакова.

В этом случае на графике зависимости критерия Пирсона от значения пробного периода (рис. 6) можно заметить, что пик, соответствующий первой гармонике, заметно уменьшился по сравнению с результатами поиска периода для не зашумлённых данных (рис. 7), однако отчётливо заметен пик для второй гармоники.

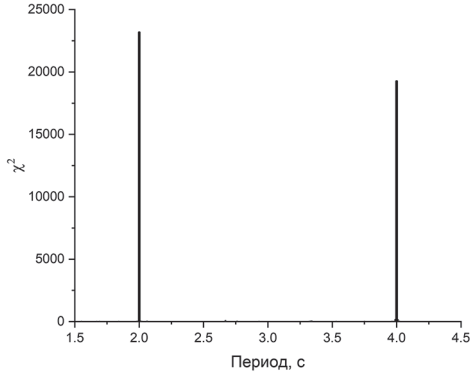


Рис. 7. Зависимость критерия Пирсона от пробного периода для сгенерированных данных

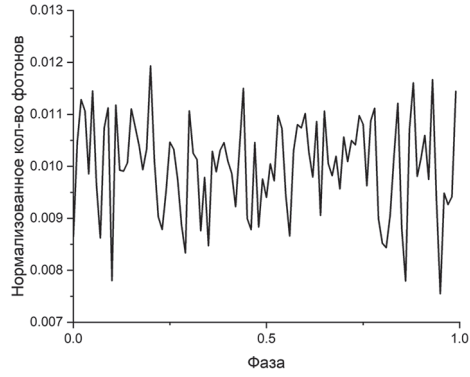


Рис. 8. Восстановленный сигнал сгенерированных данных с равновероятным шумом для 100 тыс. событий для первой гармоники

Из-за шума не удаётся визуально оценить наличие периодического сигнала (рис. 8). Для второй гармоники можно оценить наличие сигнала, но можно заметить, что восстановленный сигнал (рис. 9) значительно зашумлён по сравнению с исходным (рис. 10).

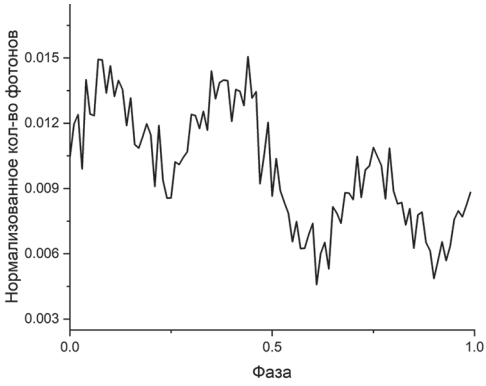


Рис. 9. Восстановленный сигнал сгенерированных данных с равновероятным шумом для 100 тыс. событий для второй гармоники

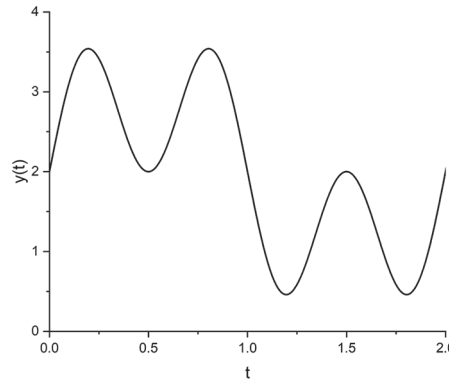


Рис. 10. Исходный сгенерированный сигнал

Разработано и отлажено программно-алгоритмическое обеспечение для радиационно-стойкого микропроцессора 1892ВМ12АТ, которое позволяет провести поиск периода рентгеновского пульсара при помощи метода наложения эпох.

Проведена оценка периода рентгеновского пульсара Crab в интервале [0,03382, 0,03383] с и с шагом $1 \cdot 10^{-8}$ с на микропроцессоре, используя 47 тыс. событий. Времена регистрации событий передаются в виде текстового файла при помощи интерфейса UART (*англ.* Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) и записываются в SRAM (*англ.* Static Random Access Memory). Найденный период составил $P_1 = 0{,}03382533$ с (рис. 11), что близко к теоретическому значению $P_0 = 0{,}03382535$ с. Для визуальной оценки построенного периодического профиля период должен быть найден минимум с точностью до шестого знака, и полученное значение соответствует этому критерию.

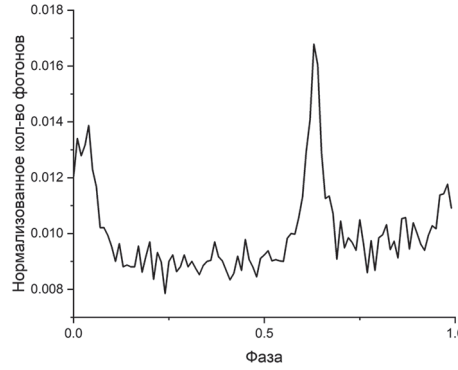


Рис. 11. Восстановленный сигнал с периодом P = 0,03382533 с

Также проведена оценка среднего времени выполнения одного программного цикла $\tau_1 = 1{,}14$ с, который включает в себя наложение эпох, вычисление ожидаемого значения для критерия Пирсона, тест Пирсона и инкрементирование периода. Выполнено усовершенствование алгоритма посредством использования в вычислениях исключительно целых чисел, что позволило сократить среднее время выполнения одного цикла в ~1,6 раз, $\tau_1 = 0{,}72$ с, период при этом составил $P_2 = 0{,}03382523$ с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм показал свою работоспособность и может рассматриваться для использования в перспективном космическом эксперименте по рентгеновской навигации.

ЛИТЕРАТУРА

Павлинский М., *Ткаченко А.*, *Левин В. et al.* Телескоп ART-XC на борту обсерватории СРГ // Письма в Астроном. журн. 2022. Т. 48. № 5. С. 357–390.

Сюняев Р., *Арефьев В.*, *Бабышкин В. et al.* Космическая обсерватория СПЕКТР-РГ: её телескопы и первые научные результаты // Письма в Астроном. журн. 2022. Т. 48. № 5. С. 301–356.

Leahy D. W., *Elsner R. F. et al.* On searches for pulsed emission with application to four globular cluster X-ray sources // The Astrophysical J. 1983. No. 266. P. 160–170.

Song M., *Wang Y.*, *Zheng W. et al.* Fast period estimation of X-ray pulsar signals using an improved fast folding algorithm // Chinese J. Aeronautics. 2023. V. 36. Iss. 10. P. 309–316. https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.01.007.

Wang Y., *Zheng W.*, *Zhang S. et al.* Review of X-ray pulsar spacecraft autonomous navigation // Chinese J. Aeronautics. 2023. V. 36. Iss. 10. P. 44–63. https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.03.002.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR DETERMINING THE PERIOD OF AN X-RAY PULSAR FOR USE IN AN ON-BOARD COMPUTING DEVICE OF A SPACE EXPERIMENT

A. A. Novikova [1], ***M. V. Buntov*** [1], ***M. A. Zaeva*** [2]

[1] **Space Research Institute RAS, Moscow, Russia**
[2] **National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) Moscow, Russia**

The results of the development of software and algorithmic support for the radiation-resistant microprocessor 1892VM12AT are presented, which allows estimating the period of an X-ray pulsar using the epoch folding method. As the initial data for testing the algorithm, a series of photon arrival times (events) from the well-known X-ray pulsar Crab, recorded by the ART-XC telescope of the Spektr-RG orbital observatory, were taken.

Keywords: space navigation, Pearson criterion, period estimation, microprocessor programming, x-ray pulsars, epoch folding, C language

Novikova Anastasia Andreevna — engineer, master's student, anovikova@cosmos.ru
Buntov Mikhail Vladimirovich — head of the laboratory
Zaeva Margarita Anatolyevna — associate professor, candidate of engineering sciences

УДК 551.513 DOI: 10.21046/KMU-2025-299-307

РЕКОРДНО НИЗКИЕ ЗНАЧЕНИЯ ПЛОЩАДИ АРКТИЧЕСКИХ МОРСКИХ ЛЬДОВ В СЕНТЯБРЕ В ПЕРИОД 1980–2020 гг. ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ И ДАННЫМ МОДЕЛЕЙ CMIP6

В. А. Романенко [1,2], ***В. А. Семенов*** [1,3]

[1] **Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва, Россия**
[2] **Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия**
[3] **Институт географии РАН, Москва, Россия**

Исследованы изменения площади морских льдов в Арктике по данным ансамблей моделей CMIP6, а также по данным реанализа ERA5, использующего спутниковые данные для 1980–2020 гг. Анализируются факторы, влияющие на формирование рекордно низких значений площади морских льдов в сентябре 2012 г. в указанный период, и аналогичные минимумы в данных моделях климата в указанный период. Показано, что минимум площади льда в сентябре 2012 г. был связан с циклонической аномалией атмосферной циркуляции в предшествующем августе, которая за счёт влияния как динамических, так и термодинамических факторов привела к аномально сильному таянию льда. Аналогичные минимумы площади льда в ансамбле моделей климата CMIP6 в целом имеют схожую с аномалией 2012 г. пространственную структуру и также связаны с циклонической циркуляцией в августе. В работе исследуется влияние различных компонент теплового баланса на формирование аномально низких значений площади морских льдов в сентябре.

Ключевые слова: арктический морской лёд, модели климата, ансамбль моделей CMIP6, реанализ ERA5, климат Арктики, изменения климата, потоки тепла

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия рост приповерхностной температуры в Арктике превышает темпы глобального потепления более чем в три раза. Это явление получило название Арктического усиления (см. напр., (Латонин и др., 2020)). В самой Арктике наиболее сильный рост температуры отмечается в начале XXI в. в Баренцевом море (Lind et al., 2018). Предполагается, что потепление и увеличение притока тёплых атлантических вод могут привести к переходу к новому режиму стратификации вод в море, который будет способствовать ещё более сильному нагреву и устойчивому безлёдному режиму (Lind et al., 2018). Значительное тепло поступает в акватории Северного Ледовитого океана (СЛО) из Атлантики. Согласно эмпирическим оценкам для современного периода, атлантическими водами через западную границу Баренцева моря приносится около 70 ТВт тепла. При этом вынос океанического тепла через северную и восточную часть моря в пределах неопределённости близок к нулю. Практически всё поступающее в море океаническое тепло реализуется в виде турбулентных и радиационных потоков тепла. В зимнее время турбулентные потоки составляют более 30 % общих потерь тепла из океана в атмосферу.

Такой интенсивный нагрев атмосферы в холодное время года над западной половиной СЛО, где наблюдается наиболее быстрый рост температуры верхнего слоя океана вследствие увеличения поступления тёплой атлантической воды и ускоренного таяния ледяного покрова, величина которого связана с площадью

Романенко Виктор Александрович — младший научный сотрудник, vromanenko@ifaian.ru
Семенов Владимир Анатольевич — доктор физико-математических наук, академик РАН, директор ИФА РАН, vasemenov@ifaran.ru

морских льдов, температурой воды и скоростью ветра, оказывает существенное влияние на региональные и крупномасштабные процессы в атмосфере, участвуя в ряде важных обратных связей, в том числе приводя к ускоренным изменениям климата в Арктике (Alexeev et al., 2017; Bengtsson et al., 2004; Schlichtholtz, 2019).

Существует множество климатических моделей, с помощью которых изучается динамика ледяного покрова и её изменчивость в прошлом и будущем. Наиболее известные из них входят в проект CMIP (*англ.* Coupled Model Intercomparison Project). Результаты их моделирования рассматриваются в различных работах. Например, В. А. Семенов с коллегами (Semenov et al., 2010), анализируя результаты моделей CMIP3, предложил объяснение ускорения роста приповерхностной температуры Северного полушария за 1980–2000 гг., заключающееся в естественной климатической изменчивости Северной Атлантики, которая может приводить к потеплению, составляющему половину от величины наблюдаемого тренда. Стоит отметить, что более новые версии МОЦА (модель общей циркуляции атмосферы) лучше воспроизводят различные климатические характеристики, включая концентрацию морского льда (КМЛ).

Площадь ледяного покрова в Арктике продолжает активно уменьшаться в течение последних десятилетий, однако данное уменьшение не совсем линейно, в отдельные годы площадь льда обновляла рекордные минимумы, как, например, в 2007, 2012, 2020 гг.

В сентябре 2012 г. наблюдался абсолютный минимум площади морского льда в Арктике за период спутниковых наблюдений с 1979 г., а также, возможно, с начала XX в. В тот год площадь составила всего 2,8 млн км^2, а протяжённость — 3,4 млн км. С тех пор это значение оставалось рекордно малым. Исследования причин такой аномалии указывают на роль изменчивости атмосферной циркуляции.

Многие авторы пришли к выводу, что в августе 2012 г. над Арктикой бушевал мощный глубокий циклон, который в течение месяца перемещался из районов Восточно-Сибирского моря через район Северного полюса к канадской Арктике. Этот циклон значительно повлиял на таяние ледяного покрова в Арктике. В работе (Zhang, 2013) рассматривается влияние действия циклона на скорость таяния льда. Скорость таяния льда и уменьшения площади ледяного покрова возросла в период действия циклона 6–12 августа примерно в два раза, и, согласно спутниковым снимкам, площадь льда стала заметна меньше, чем в среднем за август 2002–2012 гг. Однако автор отмечает, что даже если бы не было того мощного циклона, то минимум площади льда в сентябре 2012 г. сохранился бы всё равно. В цитируемой работе, а также в публикации (Lukovich et al., 2021) рассматриваются механизмы влияния циклонического образования на сокращение ледяного покрова. В статье (Lukovich et al., 2021) рассматриваются циклоны в Арктике в августе 2012 и 2016 гг. Сделан вывод о том, что в 2012 г. наибольший вклад в таяние ледяного покрова больше вносили термодинамические процессы, что исследуется в данной работе, в 2016 г. — как термодинамические, так и динамические в районах кромки льда. К интересным результатам приходят авторы исследования (Francis, Wu, 2020). В этой работе сентябрьский минимум арктического льда в сентябре 2012 г. рассматривается в контексте синоптических и климатических изменений за последние годы. Используя ЕОФ-анализ (*англ.* Empirical Orthogonal Function) атмосферного давления и анализ временных рядов протяжённости морского льда, авторы приходят к выводу, что ежегодно площадь льда приближается к рекордно низкому значению сентября 2012 г., однако всё ещё не достигая её, максимально приблизившись к ней в 2020 г. Причиной этого стало формирование низкого давления над регионом, которое приводит к увеличению облачности, снижению инсоляции и ветрам, способствующим расширению ледяного покрова.

В настоящем исследовании изучены характеристики арктического морского льда по данным климатических моделей проекта CMIP6 и по данным реанали-

за ERA5 (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis 5). Рассмотрена КМЛ за различные десятилетия и её тренд. Изучена аномалия различных метеорологических переменных в сентябре для лет с минимальной площадью льда моделей CMIP6 по отношению к среднему за сентябрь 1980–2020 гг. и оценено их возможное влияние на резкое сокращение площади льда в Арктике в годы её минимума.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе использованы среднемесячные данные для различных месяцев по концентрации льда из архива CEDA (*англ.* Centre for Environmental Data Analysis) (https://data.ceda.ac.uk/badc/cmip6/data/) проекта CMIP6 (35 моделей) для всей территории Арктики за период 1980–2020 гг., а также данные реанализа ERA5 за период 1980–2020 гг. за те же месяцы (https://www.copernicus.eu/en). Для дальнейших вычислений данные всех климатических моделей переинтерполированы в единую гауссову сетку 360×180°, и путём умножения на площадь ячеек сетки концентрация морского льда преобразована в площадь.

В качестве характеристик арктического морского льда в работе представлены временные ряды и годовые ходы её площади как по данным CMIP6, так и по данным ERA5. Также изучены годовые ходы различных компонент теплового баланса и проанализировано влияние их аномалии в летние месяцы на степень сокращения ледяного покрова в годы его минимума.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Наибольшая КМЛ в Арктике (рис. 1) наблюдается в восточно-сибирском и североамериканском секторах, где отсутствует отепляющее влияние тёплых течений, а, например, в районах Гренландии и Канадского Арктического архипелага протекают ветви холодного Трансарктического течения, там ледяной покров наблюдается даже в сентябре. В Норвежском, Баренцевом и Карском морях в результате действия тёплого течения Гольфстрим и его различных ветвей КМЛ минимальна, либо вовсе отсутствует как в сентябре, так и в марте. К востоку от Баренцева моря КМЛ зимой резко увеличивается, так как архипелаг Новая Земля становится естественной преградой на пути следования в Карское море тёплого Мурманского течения. Модели показывают заметное снижение КМЛ в течение последних десятилетий. Наиболее заметно это сокращение в сентябре, когда значительная часть окраинных морей освободится ото льда во втором десятилетии XXI в. по отношению к периоду 1981–1990 гг.

Как отмечалось выше, наименьшая площадь льда в Арктике за всю историю наблюдений была достигнута в сентябре 2012 г. Поскольку циклон, действующий в августе, имел траекторию, простирающуюся через восточный сектор Арктики в сторону Канады, наибольшая отрицательная аномалия ледяного покрова была отмечена в районе, границы которого можно обозначить как 72–80° с. ш. и 153° в. д. – 150° з. д. Годовой ход площади льда в данном секторе демонстрирует резкое её сокращение до практически безлёдной поверхности в сентябре 2012 г., в то время как средняя за 1980–2020 гг. составляет порядка 700 000 км^2. Наибольшая аномалия площади льда приходится как раз на август. Аномалия температуры поверхности океана демонстрирует значительные положительные величины, начиная с сентября 2012 г., когда данная акватория освободилась ото льда (рис. 2).

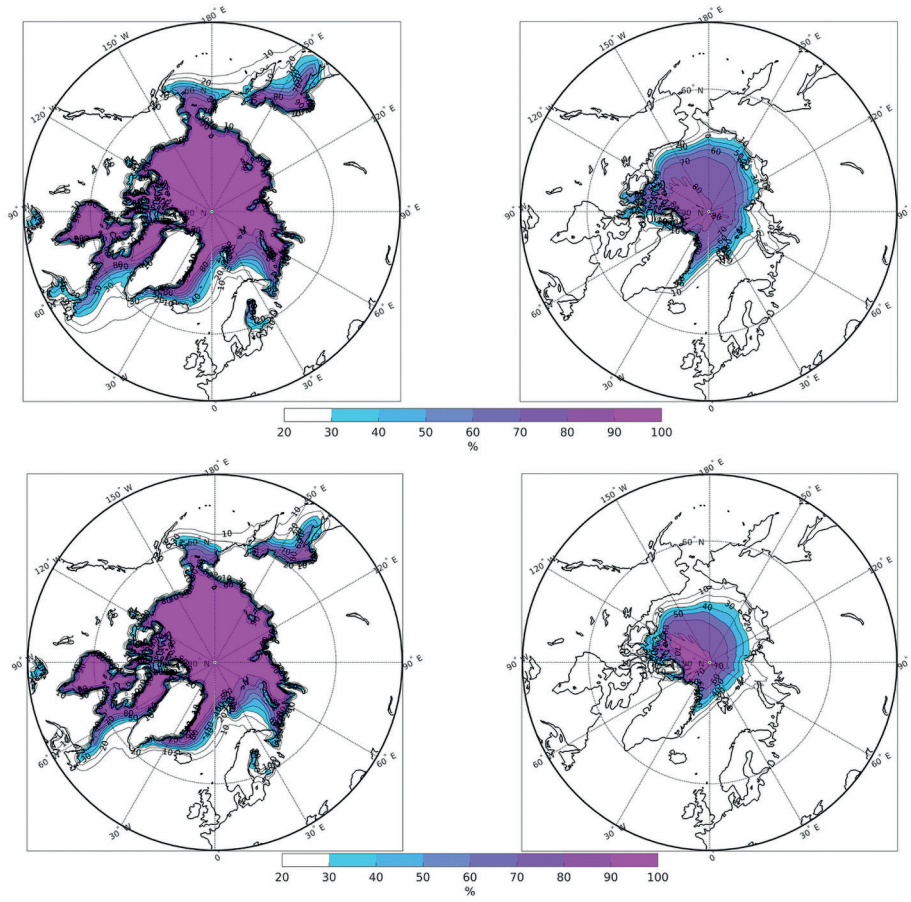


Рис. 1. Среднеансамблевая концентрация льда в марте (*слева*) и в сентябре (*справа*). 1981–1990 гг. (*сверху*); 2011–2020 гг. (*снизу*)

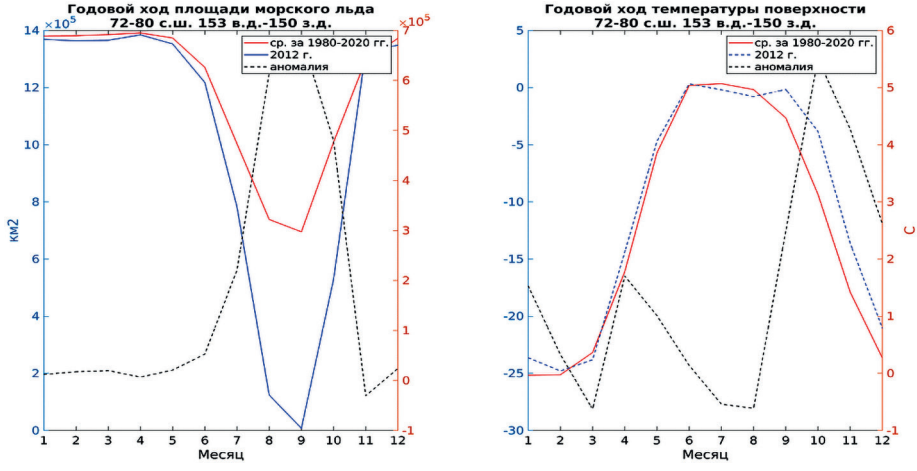


Рис. 2. Годовой ход площади морского льда (*слева*) и ТПО (*справа*) в восточно-сибирском секторе Арктики

Рассмотрим влияние аномалий тепловых потоков на резкое таяние льда в Арктике в месяцы, предшествующие сентябрю 2012 г. Стоит учесть, что в ERA5 положительный знак принят за нисходящее направление потока, а отрицательный — за восходящее. В августе 2012 г., когда в Арктике активно действовал циклон, в восточно-сибирском секторе наблюдалась значительная отрицательная аномалия коротковолновых потоков, небольшая положительная аномалия нисходящего длинноволнового потока и небольшая отрицательная аномалия восходящего длинноволнового потока. Потоки явного и скрытого тепла показывают больший вклад нисходящего потока из атмосферы к поверхности океана. В июле распределение аномалий схожее. Анализ распределения аномалий полных радиационных потоков в сравнении с условиями ясного неба показывает значительно меньшую аномалию всех компонент радиационных потоков при ясном небе по сравнению с обычными условиями, что говорит о возможном усиленном влиянии облачного покрова на радиационные условия, который связан с действием глубокого циклона в центральном и восточном районах Арктики в августе 2012 г.

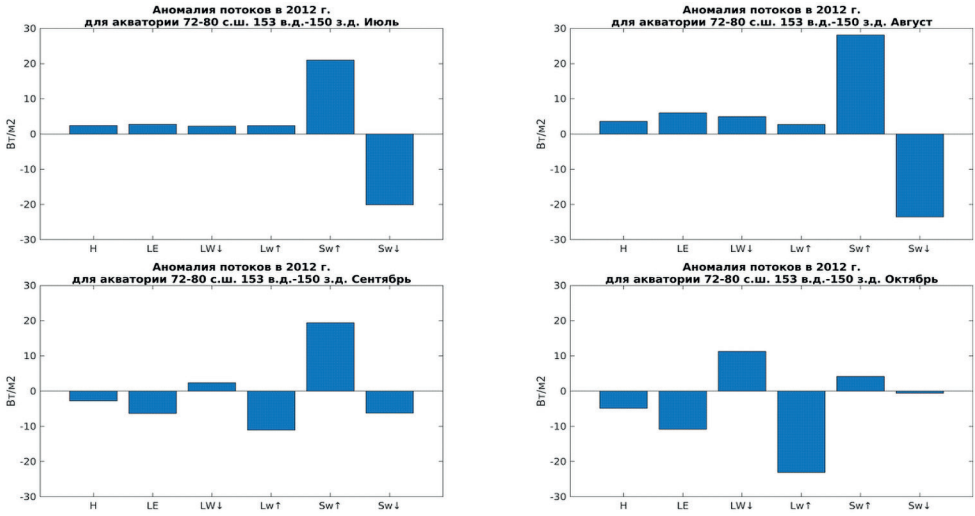


Рис. 3. Аномалии тепловых потоков в восточно-сибирском секторе Арктики за июль – октябрь 2012 г. относительно средних величин за 1980–2020 гг.

На рис. 4 представлены композитные аномалии КМЛ (в %) в сентябре и приземного давления (в гПа) в августе для лет с максимальной отрицательной аномалией площади льда в сентябре в моделях CMIP6 и в реанализе ERA5 за период 1980–2020 гг. Можно видеть, что и для климатических моделей, и для реанализа наибольшие аномалии КМЛ характерны для Сибирской Арктики, где большую часть времени существовал циклон в августе 2012 г. Этим же акваториям соответствуют области аномально низкого атмосферного давления, которые обуславливают наличие циклона, и для модельной выборки, согласно одновыборочному критерию Стьюдента, имеют значимость 0,05.

Рассмотрим теперь композитные аномалии радиационных потоков при обычных условиях и в условиях ясного неба (рис. 5). Как мы можем видеть, пространственная структура аномалий потоков при ясном небе повторяет таковую при обычных условиях, при этом аномалии нисходящего коротковолнового потока выражены гораздо слабее (рис. 5*а*, *в*). Между аномалиями длинноволновых потоков, как и между аномалиями восходящего коротковолнового потока,

разницы практически нет. Всё это может свидетельствовать о более значительном радиационном воздействии облачности в августе 2012 г. по сравнению с таковым в среднем за август 1980–2020 гг., что говорит об усиленном влиянии облачности вследствие действия глубокого циклона в тот год.

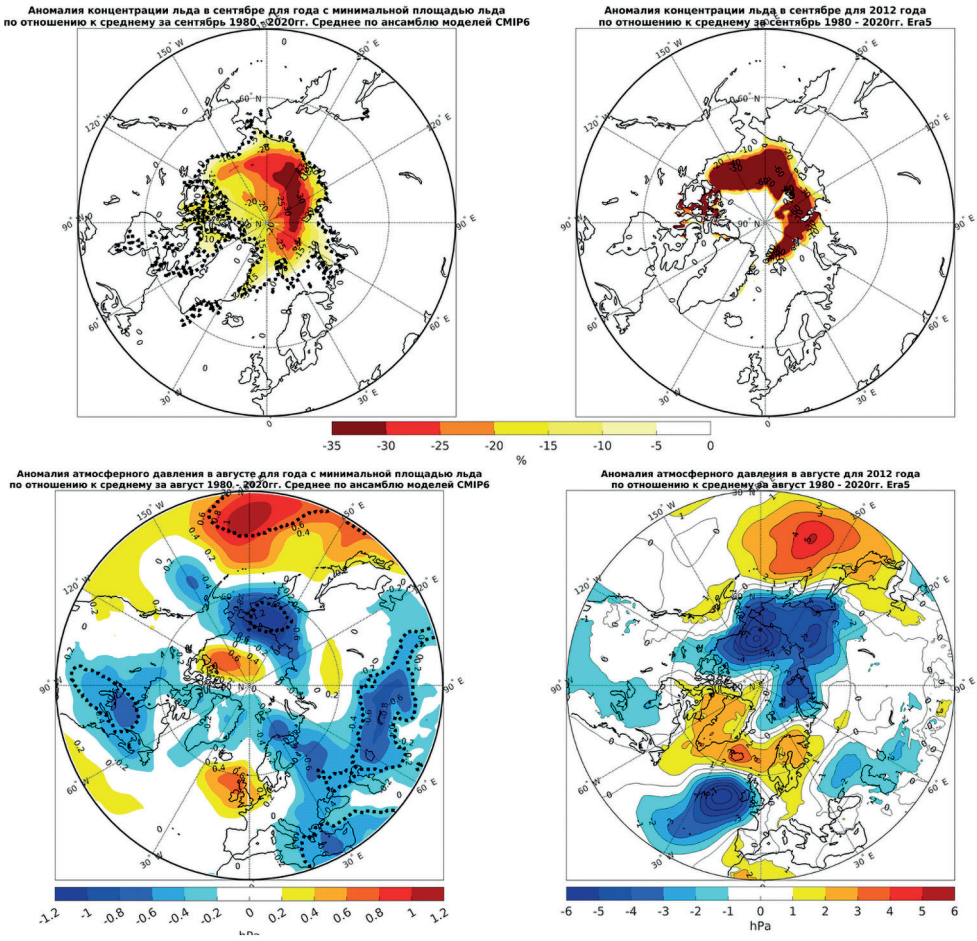


Рис. 4. Композитная аномалия КМЛ (в %) в августе для лет с максимальной отрицательной аномалией площади льда в сентябре в моделях CMIP6 за период 1980–2020 гг. (*сверху слева*). Композитная аномалия КМЛ (в %) в сентябре 2012 г. к среднему за сентябрь 1980–2020 гг. по данным ERA5 (*сверху справа*). Композитная аномалия давления (в гПа) в августе для лет с максимальной отрицательной аномалией площади льда в сентябре в моделях CMIP6 за период 1980–2020 гг. (*снизу слева*). Композитная аномалия давления (в гПа) в августе для 2012 г. (максимальная отрицательная аномалия площади морского льда) по отношению к среднему за сентябрь 1980–2020 гг. для реанализа ERA5 (*снизу справа*). Пунктиром выделены области с 0,05-значимостью областей экстремальных аномалий давления

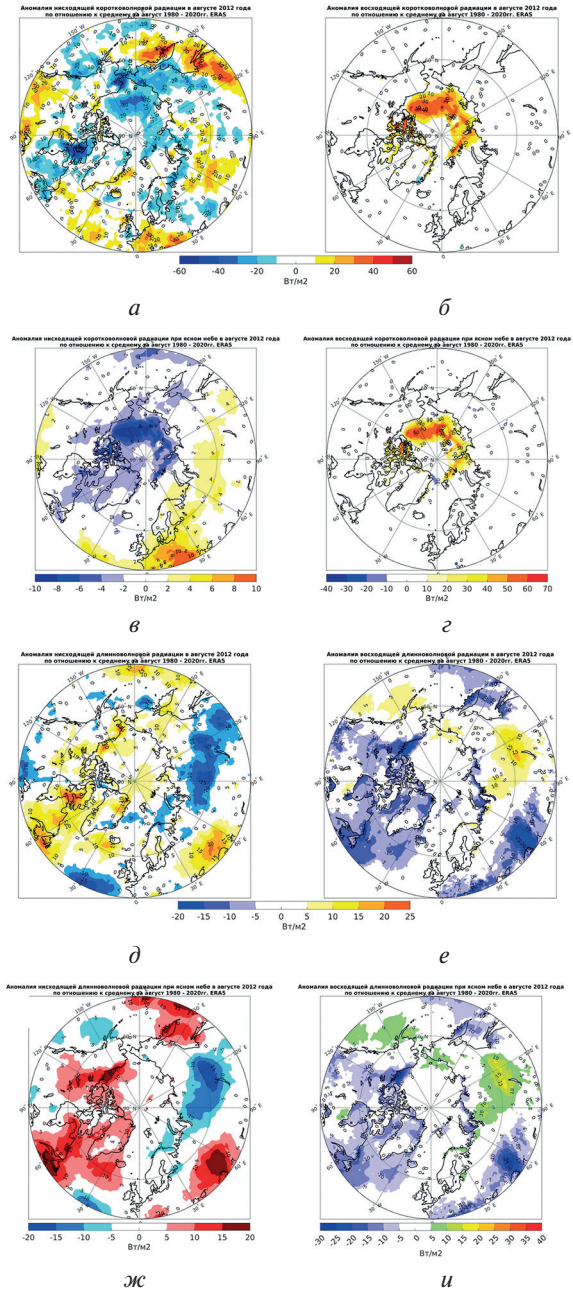


Рис. 5. Композитная аномалия нисходящей и восходящей коротковолновой радиации (в Вт/м^2) (*а*, *б*) в августе для 2012 г. (максимальная отрицательная аномалия площади морского льда) по отношению к среднему за сентябрь 1980–2020 гг. для реанализа ERA5. Композитная аномалия нисходящей и восходящей коротковолновой радиации в условиях ясного неба (в Вт/м^2) (*в*, *г*) в августе для 2012 г. Композитная аномалия нисходящей и восходящей длинноволновой радиации (в Вт/м^2) (*д*, *е*) в августе для 2012 г. по отношению к среднему за сентябрь 1980–2020 гг. для реанализа ERA5. Композитная аномалия нисходящей и восходящей длинноволновой радиации в условиях ясного неба (в Вт/м^2) (*ж*, *и*) в августе для 2012 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Площадь ледяного покрова в Арктике неуклонно снижается в течение последних десятилетий. Это снижение сопровождалось рядом сильных отрицательных аномалий площади льда. Минимум площади льда в сентябре 2012 г. был рекордным за время инструментальных наблюдений. Ему предшествовала циклоническая аномалия атмосферной циркуляции в августе того же года. Климатические модели в среднем по ансамблю CMIP6 воспроизводят похожее распределение аномалии приземного давления в августе в годы минимумов площади льда в Арктике каждой модели с диполем в центральной Арктике, где области пониженного давления соответствуют районы с наибольшей отрицательной аномалией площади ледяного покрова, а высокого — акватории канадской Арктики.

ЛИТЕРАТУРА

Латонин М. М., *Башмачников И. Л.*, *Бобылев Л. П.* Явление арктического усиления и его движущие механизмы // Фундам. и приклад. геофизика. 2020. Т. 13. № 3. С. 3–19. https://doi.org/10.7868/S2073667320030016.

Alekseev G., *Kuzmina S.* Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming // Intern. J. Climatology. 2019. V. 39(8). P. 3582–3592. https://doi.org/ 10.21513/2410-8758-2016-1-43-63.

Bengtsson L., *Semenov V.*, *Johannessen O. M.* The Early Twentieth Century Warming in the Arctic. A Possible Mechanism // J. of Climate. 2004. V. 17. Iss. 20. P. 4045–4057. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C4045:TETWIT%3E2.0.CO;2.

Francis J., *Wu B.* Why has no new record-minimum Arctic sea-ice extent occurred since September 2012? // Environmental Research Letters. 2020. V. 15. Iss. 11. Article 114034. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc047.

Lind S., *Ingvaldsen R.*, *Furevik T.* Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // Nature Climate Change. 2018. V. 8. P. 634–639. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0205-y.

Lukovich J., *Stroeve J. C.*, *Crawford A. et al.* Summer Extreme Cyclone Impacts on Arctic Sea Ice // J. Climate. 2021. V. 34. Iss. 12. P. 4817–4834. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0925.1.

Schlichtholz P. Subsurface ocean flywheel of coupled climate variability in the Barents Sea hotspot of global warming // Scientific Reports. 2019. V. 9. Article 13692. 16 p. https://doi.org/10.1038/s41598-019-49965-6.

Semenov V., *Latif M.*, *Dommenget D. et al.* The Impact of North Atlantic–Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature // J. Climate. 2010. V. 23. Iss. 21. P. 5668–5677. https://doi.org/10.1175/2010JCLI3347.1.

Zhang J. et al. The impact of an intense summer cyclone on 2012 Arctic sea ice retreat // Geophysical Research Leterrs. 2013. V. 40. Iss. 4. P. 720–726. https://doi.org/10.1002/grl.50190.

RECORD LOW SEPTEMBER ARCTIC SEA ICE ANOMALIES IN 1980–2020 PERIOD FROM OBSERVATIONS AND CMIP6 CLIMATE MODEL ENSEMBLE

V. A. Romanenko [1,2], ***V. A. Semenov*** [1,3]

[1] **A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow, Russia**
[2] **Research Computing Center Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian**
[3] **Institute of Geography RAS, Moscow, Russia**

Changes in the area of sea ice in the Arctic have been studied according to ensembles of CMIP6 models, as well as according to ERA5 reanalysis using satellite data for the period 1980–2020. The factors influencing the formation of record low values of sea ice area in September 2012 during the specified period and similar minima in these climate models during the specified period are analyzed. It is shown that the minimum area of ice in September 2012 was associated with a cyclonic anomaly of atmospheric circulation in the previous August, which, due to the influence of both dynamic and thermodynamic factors, led to an abnormally strong melting of ice. Similar ice area minima in the ensemble of CMIP 6 climate models generally have a spatial structure similar to the 2012 anomaly, and are also associated with cyclonic circulation in August. The paper examines the influence of various components of the thermal balance on the formation of abnormally low sea ice area values in September.

Keywords: Arctic sea ice, climate models, ensemble of models CMIP6, ERA5 reanalysis, Arctic climate, climate changes, heat fluxes

Romanenko Victor Aleksandrovich — junior researcher, vromanenko@ifaran.ru
Semenov Vladimir Anatolevich — doctor of physical and mathematical sciences, academician RAS, director IFA, vasemenov@ifaran.ru

УДК 520.6; 523.3 DOI: 10.21046/KMU-2025-308-320

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРА ПО ГЛУБИНЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ В КРАТЕРЕ ГЕЙЛ ПО ДАННЫМ ПРИБОРОВ ДАН И APXS

А. Э. Романова, М. Л. Литвак, И. Г. Митрофанов, М. В. Дьячкова, Д. И. Лисов, С. Ю. Никифоров

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Представлены результаты анализа распределения хлора на поверхности и в приповерхностном слое осадочных пород в марсианском кратере Гейл, которые исследовал марсоход Curiosity, основываясь на измерениях, проведённых с помощью российской научной аппаратуры ДАН (динамическое альбедо нейтронов) и спектрометра APXS (*англ.* Alpha Particle X-ray Spectrometer). Распределение хлора рассматривалось как возможный маркер процессов, игравших существенную роль на разных стадиях эволюции марсианского климата. Было обнаружено, что окрестность и основание горы осадочных пород (*англ.* Mount Sharp) с речными и озёрными отложениями, а также более высокие и молодые участки, характеризующиеся переходом к отложениям гидратированных сульфатов, могут иметь однородное распределение хлора по глубине (до 50 см). В то же время районы, находящиеся между этим двумя группами, где были обнаружены отложения гематитов и глин, демонстрируют резкую неоднородность с более высокой концентрацией хлора на самой поверхности. Это может указывать, что в одном случае доминировал один и тоже источник переноса хлора, возможно связанный с активностью грунтовых вод, а в другом таких источников могло быть несколько, включая эоловые отложения, грунтовые воды и протекание жидкой воды на поверхности.

Ключевые слова: содержание хлора в реголите, геологические области, кратер Гейл, Марс, марсоход Curiosity, динамическое альбедо нейтронов.

ВВЕДЕНИЕ

Содержание хлора в марсианской поверхности является важным параметром, анализируя который можно оценить роль различных геологических процессов в эволюции Марса. Считается, что концентрация хлора в верхнем слое марсианского грунта могла контролироваться за счёт вулканических извержений, эоловых отложений (перенос ветром песчаных и полевых частиц), водной (на поверхности и под поверхностью) и гидротермальной активностью. Дж. М. Келлер с коллегами (Keller et al., 2007) на основе анализа данных гамма-спектрометра GRS (*англ.* Gamma Rays Spectrometer) на борту орбитального аппарата НАСА Mars Odyssey заключил, что распределение хлора по поверхности Марса сильно неоднородно, а перепад между максимальным и минимальным значением достигает четырёх раз. Наибольшие значения наблюдаются на экваторе в районе, к западу от вулканического нагорья Фарсида, где находится формация Борозды Медузы (*лат.* Sulcus Medusae). Известно, что марсианская пыль имеет высокое содержание

Романова Анастасия Эдуардовна — лаборант
Литвак Максим Леонидович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, litvak@iki.rssi.ru
Митрофанов Игорь Георгиевич — заведующий отделом, доктор физико-математических наук
Дьячкова Майя Викторовна — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук
Лисов Денис Игоревич — старший научный сотрудник
Никифоров Сергей Юрьевич — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

хлора и серы (Berger et al., 2016) и характеризуется определённым соотношением их концентрации. Эти химические маркеры очень близки к тому, что наблюдается в формации Борозды Медузы, поэтому Л. Ойха с коллегами (Ojha et al., 2018) даже предположил, что эта формация, которая могла сформироваться в результате вулканической активности, является основным источником марсианской пыли. Кроме этого, в исследовании (Keller et al., 2007) также установлено, что между содержанием хлора и водорода существует положительная корреляция. Учитывая, что водород может входить в состав молекулы воды, а хлориды очень хорошо растворяются в воде, можно предположить, что в прошлую эпоху, когда по поверхности Марса текла жидкая вода, водная и гидротермальная активность оказали существенное влияние на перераспределение хлора между различными регионами Марса.

Кратер Гейл (*англ*. Gale crater) (137,8° в. д., 5,4° ю. ш., диаметр 150 км, возраст 3,55–3,8 млрд лет), где уже более 12 лет проводит наблюдения марсоход НАСА Curiosity (Grotzinger et al., 2012), согласно орбитальным наблюдениями также расположен в районе с повышенным содержанием хлора (Keller et al., 2007). В центре кратера находится большая гора Эолида (*лат*. Aeolis Mons; неофициально известна как гора Шарпа, *англ*. Mount Sharp) (высота 5 км) осадочных отложений, по которой взбирается марсоход (Vasavada, 2022). На борту марсохода установлены приборы динамическое альбедо нейтронов (ДАН) и рентгеновский спектрометр APXS (*англ*. Alpha Particle X-ray Spectrometer), которые могут оценивать содержание хлора вдоль трассы движения марсохода (Grotzinger et al., 2012, Mitrofanov et al., 2012). За всё время наблюдений марсоход проехал более 35 км и побывал в различных геологических областях, имеющих разное происхождение и возраст (Vasavada, 2022). Большое количество измерений и разнообразие геологических областей позволяет проследить, как менялась морфология и геохимия поверхности по мере высыхания древнего озера, которое существовало в кратере Гейл в раннюю марсианскую эпоху (Grozinger et al., 2015), используя хлор и его распределение по глубине в качестве одного из маркеров таких процессов. Для этого в представленной работе была изучена корреляция между поверхностным хлором, который измеряет прибор APXS и объёмным хлором, который можно оценить из данных прибора ДАН, а сопоставление проводилось для разных геологических областей/осадочных отложений.

В качестве основных целей предлагаемого исследования были сформулированы следующие:

1. Сопоставить распределения химического хлора, оценённого по данным ДАН и APXS для каждой геологической области, которую проехал марсоход, и разделить их на две категории: а) где распределение поверхностного хлора (APXS) и объёмного хлора (ДАН) статистически совпадают, и б) где это распределение сильно различаются. Это позволит выделить области с однородным распределением хлора по глубине.
2. Выявить локальные районы, где по наблюдениям ДАН и APXS обнаруживаются высокие значения хлора, что может указывать на большое количество солей, принесённых грунтовыми водами.

ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ

Научная аппаратура ДАН

Прибор ДАН состоит из двух блоков: блока нейтронных детекторов и управляющей электроники ДАН-ДЭ и блока импульсного нейтронного генератора ДАН-ИНГ. Основная цель эксперимента — это измерение концентрации водорода (в виде водного эквивалента) и нейтронно-поглощающих элементов в верхнем

слое (до 50 см) поверхности Марса (Litvak et al., 2008; Mitrofanov et al., 2012). В активном режиме работы блок ДАН-ИНГ излучает короткие (1 мкс) нейтронные импульсы с частотой 10 Гц, облучая быстрыми нейтронами поверхность под марсоходом. В результате облучения быстрые нейтроны взаимодействуют с ядрами основных породообразующих элементов и теряют свою энергию до эпитепловых и тепловых значений. Часть нейтронов вылетает обратно с поверхности и регистрируется блоком ДАН-ДЭ в виде временного отклика с характерной длительностью в сотни микросекунд, начало которого соответствует моменту нейтронного импульса. Собственно эти временные профили и называются динамическим альбедо нейтронов. На их форму и амплитуду существенное влияние оказывает наличие в грунте Марса водорода (вода) и нейтронно-поглощающих элементов. С точки зрения соотношения средней концентрации в грунте и величины сечения поглощения доминирующим фактором, влияющим на поглощение тепловых нейтронов, как раз является хлор (Mitrofanov et al., 2014). Используя модельно-зависимую обработку измерений ДАН, можно оценить концентрацию так называемого эквивалентного хлора (Mitrofanov et al., 2014). Она получается из численного моделирования эксперимента, в которое заложен средний химический состав грунта в картере Гейл, а в качестве свободного параметра используется содержание хлора. Подгоняя модель под измерения, можно найти оптимальное значение концентрации хлора, при которой предсказания и измерения сойдутся. Если в окрестности, где проводились измерения, химический состав грунта совпадает со средним составом, который использовался в численной модели, то найденное оптимальное значение будет давать истинную концентрацию хлора. Если химический состав различается, то в найденную оптимальную концентрацию хлора войдёт отклонение от средней концентрации других поглощающих элементов, прежде всего железа, второго по значимости элемента после хлора, вносящего существенный вклад в макроскопическое сечение поглощения марсианского грунта. Поэтому найденная оптимальная модельная концентрация хлора называется эквивалентной за счёт учёта добавок от других поглощающих элементов. Зная или предполагая истинный химический состав грунта в данной точке траверса марсохода (например, из данных прибора APXS), можно от эквивалентного хлора перейти к химическому (истинному) хлору.

С помощью аппаратуры ДАН можно оценить объёмное содержание хлора, так как сигнал собирается с площадки с диаметром около 3 м и с глубины до 0,5 м, что соответствует нескольким тоннам вещества марсианского грунта (Litvak et al., 2016).

Научная аппаратура APXS

Прибор APXS — это спектрометр, предназначенный для определения химического состава поверхности Марса. Он установлен на руке-манипуляторе марсохода, которая во время измерений подносит его к исследуемому участку поверхности Марса (Gellert, Clark et al., 2015; Grotzinger et al., 2012). В ходе измерения исследуемая поверхность облучается α-частицами и рентгеновским излучением. Для этого в приборе используется радиоактивный источник кюрий-244 (^{244}Cm). В результате облучения атомы вещества переходят в возбуждённое состояние, а обратный переход в основное состояние сопровождается излучением фотонов строго заданной энерги, характерной для данного атома. Поэтому измеренный спектр содержит пики, соответствующие различным химическим элементам, а их интенсивность зависит от содержания этих элементов. Используя данный метод измерений можно определить содержание таких химических элементов как Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, Br (см. (Gellert et al., 2006)).

Поле зрения APXS имеет радиус 17 мм, а чувствительность по глубине не превышает 15 мкм. Таким образом, основной вклад в измерение даёт самый поверхностный слой. В некоторых случаях, чтобы добраться до основной породы, иссле-

дуемая поверхность сначала обрабатывается абразивной щёткой RAT (*англ.* Rock abrasive tool, см. (Grotzinger et al., 2012)), которая также установлена на руке-манипуляторе.

Методы

В работе (Litvak et al., 2023) проводилось сравнение измерений хлора по данным приборов ДАН и APXS. Было высказано предположение, что для некоторых геологических областей содержание поверхностного и объёмного хлора могут быть близки.

В нашем исследовании был продолжен анализ всех доступных активных измерений ДАН, включая те области, где были обнаружены большие залежи гидратированных сульфатов, и применены статистические критерии, чтобы сравнить распределение хлора, полученные по данным APXS и ДАН.

Из-за малого количества точек бурения (около 30) было невозможно судить, насколько данная модель применима для каждой геологической области, которую проехал марсоход.

В работе (Nikiforov et al., 2024) активные и пассивные измерения ДАН были распределены по стратиграфической колонке, представляющей вертикальную последовательность пород, которую проехал марсоход, взбираясь по горе осадочных отложений (гора Mount Sharp). Для каждой геологической области было получено распределение подповерхностного хлора и воды, а также приведены соответствующие оценки поверхностного хлора, полученные APXS. Из данных результатов следует, что для некоторых областей содержание поверхностного и объёмного хлора могут быть близки.

В нашем исследовании был продолжен анализ всех доступных измерений ДАН за счёт добавления новых геологических областей, принадлежащих формации Мирадор (*лат.* Mirador), где были обнаружены большие залежи гидратированных сульфатов, и применили статистические критерии, чтобы сравнить распределение хлора, полученное по данным APXS и ДАН.

Совокупность процедур обработки данных выглядит следующим образом.

1. На рис. 1 представлена стратиграфическая колонка, показывающая вертикальный срез маршрута, который проехал марсоход, поднимаясь по горе осадочных пород, размеченный на отдельные геологические группы, формации и члены формаций (горизонтальная ось) в соответствии с относительной высотой марсианского рельефа по данным измерений лазерного альтиметра MOLA (*англ.* Mars Orbiter Laser Altimeter) (вертикальная ось) (см. напр., (Fedo et al., 2022)). В нашем исследовании использовались границы отдельных членов формаций/геологических областей, выделяемых по специфической литологии (присутствию определённых типов осадочных пород), чтобы в пределах этих границ отобрать и потом сопоставить данные измерений приборов APXS и ДАН.
2. И. Г. Митрофанов с коллегами (Mitrofanov et al., 2022) предложил пиксельный анализ данных прибора ДАН. Территория, которую проехал марсоход Curiosity, начиная с места посадки, была покрыта географической сеткой, где каждый пиксель имеет фиксированный размер 3×3 м, что соответствует характерному пятну на подстилающей поверхности, с которого детекторы ДАН собирают основной сигнал. Для каждого пикселя были сделаны оценки подповерхностной воды и эквивалентного хлора. В таком подходе территория, которую проехал марсоход, может быть представлена в виде карты подповерхностной воды и эквивалентного хлора. В анализе мы использовали такую же сетку и продлили её на новые геологические области, принадлежащие формации Mirador, заполнив пикселы оценками эквивалентного хлора по данным измерений ДАН.

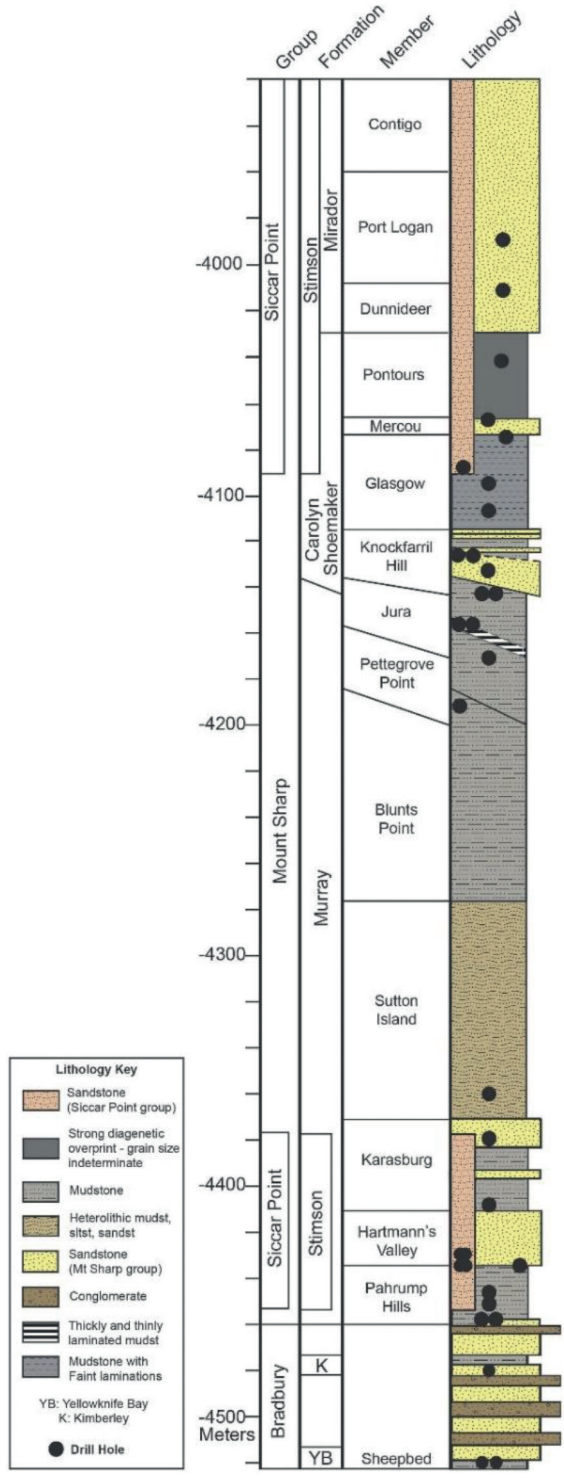


Рис. 1. Стратиграфическая колонка осадочных пород, исследованных в ходе миссии марсохода Curiosity (Fedo et al., 2022)

Таким образом, каждая геологическая область характеризовалась распределением эквивалентного хлора исходя из того, сколько пикселей с измерениями ДАН попали внутрь данной области. Количество отобранных пикселей для каждой геологической области представлено в таблице.

Результаты измерений приборов APXS и ДАН
в геологических областях кратера Гейл

Формация/область	**<Cl> мас.%**		***n***		**Вероятность, %**	
	APXS	**ДАН**	**APXS**	**ДАН**	**К-С**	**М-У**
Mirador/Chenapau	**2,00±0,25**	**1,41±0,07**	**93**	**77**	**5,87**	–
Mirador/Amapari	1,49±0,14	0,55±0,13	30	15	0,09	0,01
Mirador/Catrimani	**1,77±0,23**	**1,50±0,15**	**20**	**13**	**48,61**	**81,07**
Mirador/Contigo	**2,12±0,35**	**1,66±0,17**	**57**	**66**	**21,95**	–
Mirador/Port Logan	**1,07±0,06**	**0,88±0,08**	**29**	**26**	**0,47**	**2,04**
Mirador/Dunnideer	**1,47±0,52**	**1,04±0,06**	**17**	**17**	**24,50**	**35,23**
Carolyn Shoemaker/Pontours	**1,15±0,06**	**1,05±0,06**	**19**	**18**	**64,00**	**25,45**
Carolyn Shoemaker/Glasgow	**1,21±0,04**	**1,11±0,04**	**56**	**67**	**27,51**	–
Carolyn Shoemaker/Knockfarril Hill	1,35±0,04	0,94±0,03	62	48	0	
Murray/Jura	1,25±0,04	1,13±0,06	125	72	0,14	
Murray/Pettegrove Point	1,48±0,09	0,85±0,03	58	51	0	
Murray/Blunts Point	1,09±0,07	0,69±0,03	42	54		
Murray/Sutton Island	1,59±0,09	0,89±0,04	46	60		
Murray/Karasburg	**1,14±0,15**	**1,14±0,06**	**11**	**15**	**59,79**	**67,80**
Murray/Hartmann's Valley	**0,97±0,08**	**0,92±0,04**	**29**	**46**	**56,29**	–
Murray/Pahrump Hills	**0,85±0,09**	**0,83±0,09**	**21**	**13**	**79,40**	**80,41**
Bradbury	**0,98±0,05**	**0,97±0,03**	**78**	**212**	**92,47**	–
Sheepbed	1,32±0,06	0,74±0,10	24	14	0,02	0,01
Stimson	**1,29±0,07**	**1,16±0,05**	**92**	**79**	**38,30**	–

Примечание: <Cl> — среднее значение массовой доли хлора в данной геологической области; *n* — количество измерений каждого прибора в данной геологической области.

3. В отличие от ДАН измерения APXS носят точечный характер. Каждое место на поверхности, выбранное для измерений APXS, называется мишенью (*англ*. target) и имеет своё собственное название. Таким образом, распределение хлора в данной геологической области можно характеризовать как совокупность отдельных мишеней. Количество отобранных мишеней для каждой геологической области представлено в таблице.
4. В подразд. «Научная аппаратура ДАН» было сказано, что ДАН позволяет оценить только содержание эквивалентного хлора, т. е. величину, в которую замешана концентрация ядер других элементов, которые имеют большое сечение поглощения тепловых нейтронов. Чтобы перейти к оценке концентрации химического хлора использовался средний химический состав, полученный для данной геологической области из данных APXS. Используя средний химический состав и методику, предложенную в работах (Litvak

et al., 2023; Mitrofanov et al., 2014), концентрация эквивалентного хлора ДАН пересчитывалась в концентрацию химического хлора.

5. Таким образом, после выполнения п. 3 для каждой исследуемой геологической области были получены две выборки с концентрацией химического хлора из данных измерений приборов APXS и ДАН, к которым применялись статистические тесты, чтобы проверить гипотезу — принадлежат ли эти выборки одному и тому же распределению. Принадлежность выборок к одному и тому же распределению в данном случае означает, что поверхностный и объёмный хлор статистически совпадают, и поэтому можно предположить, что распределение хлора скорее всего однородно по глубине. В качестве основного статистического теста использовался непараметрический тест Колмогорова – Смирнова (К-С). В рамках этого теста можно получить вероятность того, что выборки взяты из одного и того же распределения. Дополнительно для геологических областей с малой статистикой (количество измерений в каждой выборке не превышает несколько десятков) был применён другой непараметрический тест — Манна – Уитни (М-У), который также позволяет определить вероятность принадлежности этих выборок к одному и тому же распределению. В таблице тоже приведены эти оценки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведённого анализа представлены в таблице. Всего было рассмотрено 18 геологических областей, принадлежащих четырём основным геологическим формациям и группам. В таблице названия геологических областей приведены в первой колонке и ранжированы по высоте места точно так же, как и в стратиграфической колонке, начиная с окрестности и основания горы Mount Sharp (группа Bradbury) и заканчивая самой верхней частью стратиграфической колонки, где расположена формация Mirador с отложениями гидратированных сульфатов.

При проведении статистических тестов использовался критерий доверительной вероятности. Если вероятность по одному (если использовался только К-С тест) или сразу по двум (если использовались К-С и М-У тесты) тестам превысила 5 %, то делался вывод, что выборка измерений APXS и выборка измерений ДАН принадлежат одному и тому же распределению. Для таких случаев мы считали, что поверхностный хлор, измеренный прибором APXS, и объёмный хлор, измеренный прибором ДАН, статистически совпадают. Эти случаи помечены в таблице полужирным начертанием.

Видно, что в этот список попали 10 областей: группа Bradbury, нижняя часть формации Murray (члены формации Pahrump Hills (холмы Парамп), Hartmann's Valley (Долина Хартмана) и Karasburg (Карасбург)), верхняя часть формации Carolyn Shoemaker (члены формации Glasgow (Глазго), Pontours (Понтурс)) и большая часть формации Mirador (Dunnideer (Даннидер), Contigo (Контиго), Catrimani (Катримани), Chenapau (Ченапау)) (см. рис. 1 и таблицу). В список также попала выделенная в отдельное рассмотрение эоловая формация Stimson (см. дискуссию ниже).

На рис. 2 показано распределение химического хлора по ДАН и APXS, в котором объединены группа Bradbury и нижняя часть формации Murray (Pahrump Hills, Hartmann's Valley, Karasburg). Фактически — это окрестность и нижняя часть горы Mount Sharp (см. рис. 1 и таблицу). Осадочные породы в Bradbury интерпретируются как свидетельство переноса донных отложений и их осаждения в речных системах (Vasavada, 2022). Геологические области, принадлежащие формации Murray, чаще всего соответствуют озёрным отложениям, но также содержат

участки, интерпретируемые как речные, речно-дельтовые и эоловые отложения (Stack et al., 2019; Fedo et al., 2019; Stein et al., 2018). Из рис. 2 хорошо видно, что в этой группе областей формы распределения поверхностного (APXS) и объёмного (ДАН) хлора довольно близки друг к другу, а вероятность их совпадения по K-C тесту составляет более 90 %. Это может указывать на общий источник происхождения хлора, возможно связанный с его переносом поверхностными и грунтовыми водами.

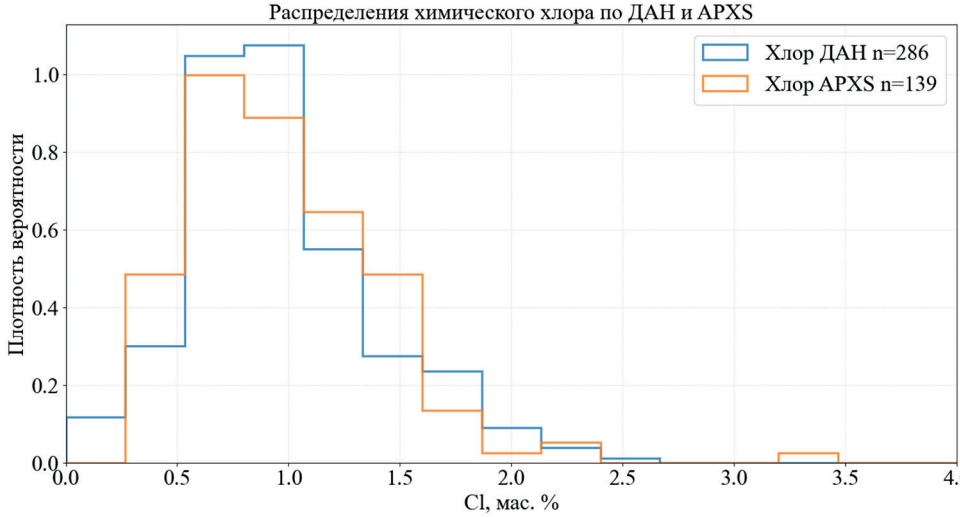


Рис. 2. Распределения химического хлора по ДАН и APXS в геологических областях: Bradbury, Pahrump Hills, Hartmann's Valley, Karasburg

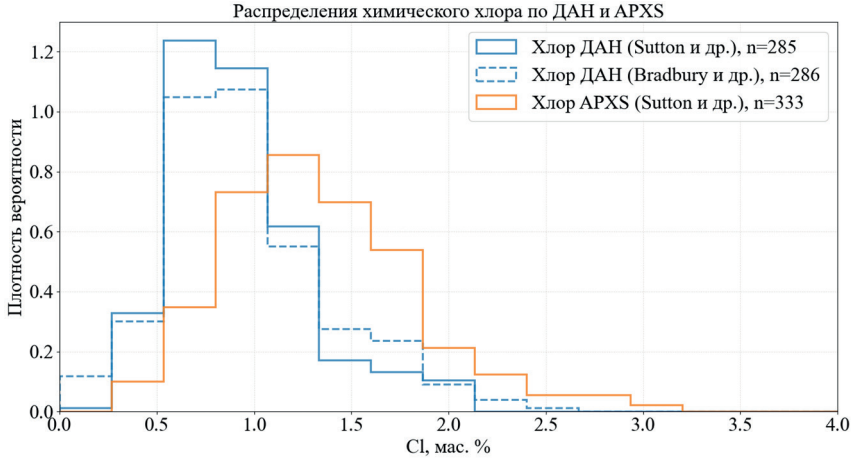


Рис. 3. Распределение химического хлора по ДАН и APXS в геологических областях: Sutton Island, Blunts Point, Pettegrove Point, Jura, Knockfarril Hill (сплошные линии) и распределение химического хлора по ДАН в Brudbury, Pahrump Hills, Hartmann's Valley и Karasburg (пунктирная линия)

На рис. 3, были объединены области из средней части стратиграфической колонки, в которых статистические тесты, наоборот, показали сильное различие

между измерениями ДАН и APXS. Это области, принадлежащие верхней части формации Murray и нижней части формации Carolyn Shoemaker (см. рис. 1 и таблицу). Одну из таких областей Sutton Island, судя по всему, можно рассматривать как территорию, где находилась береговая линия древнего озера. По мере продвижения марсохода вверх было отмечено, что возросла роль окислительных процессов, химического выветривания и диагенеза с образованием различных типов минералов (Vasavada, 2022), таких как гематиты и филлосиликаты (глины), что свидетельствует о значимой роли гидротермальной активности (Caravaca et al., 2022). Для этих областей измерения APXS показывают существенно большие (почти в два раза) значения концентрации хлора, по сравнению с оценками ДАН, что указывает на разный источник происхождения хлора на поверхности и на глубине. Здесь важно отметить, что распределение объёмного хлора практически совпадает (K-C тест даёт вероятность ~12 %) с распределением объёмного хлора в нижележащих Brudbury, Pahrump Hills, Hartmann's Valley и Karasburg (см. пунктирную линию на рис. 3).

На рис. 4 представлено объединение областей, вошедших в формацию Mirador (члены формации Dunnideer, Port Logan (Порт Логан), Contigo, Catrimani (см. рис. 1 и таблицу)). В этой формации идентифицируется смена глинистых отложений (филлосиликаты) на отложения гидратированных сульфатов, что свидетельствует о снижении активности воды и согласуется с предполагаемым глобальным переходом от более влажного климата, который частично характеризуется наличием филлосиликатов, к более сухому климату.

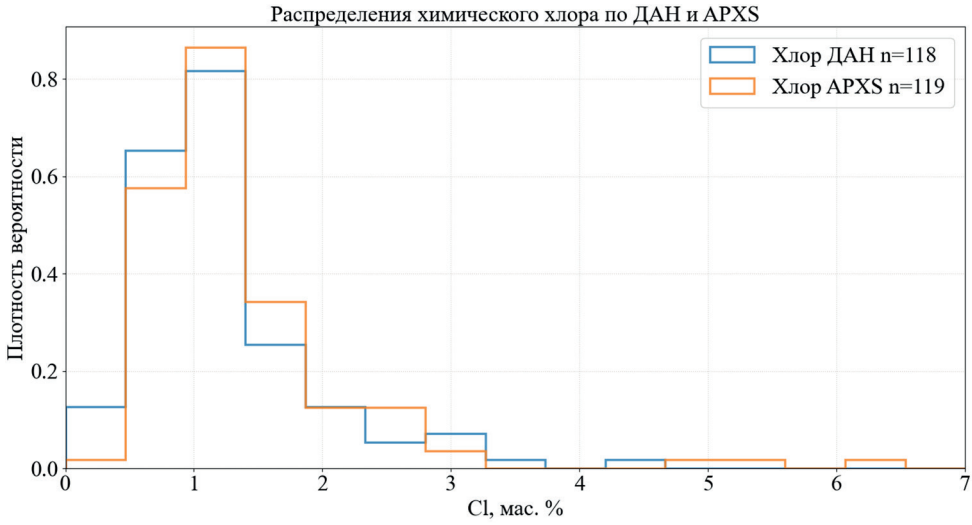


Рис. 4. Распределения химического хлора по ДАН и APXS в геологических областях: Dunnideer, Port Logan, Contigo, Catrimani

Для сохранения непрерывности по высоте, в этот список была также включена небольшая область Port Logan, которая формально не прошла критерий доверительной вероятности (вероятность совпадения всего около 2 %), но была близка к нему. На рис. 4 видно хорошее согласие между формами распределений APXS и ДАН, что подтверждается K-C тестом (вероятность совпадения составляет около 40 %). Важно отметить, что распределение имеет не симметричный вид и состоит из двух разных компонент. Первая и самая большая компонента (более 90 %

всех случаев) объединяет измерения концентрации хлора в диапазоне 0,5–3,0 %. Вторая компонента проявляется в виде длинного хвоста и содержит очень высокие значения концентрации хлора (>4 %) и по ДАН, и по APXS. Измерения аномально высокого хлора сосредоточены в узкой полосе высот (перепад высот меньше 20 м) в окрестности места бурения Canaima, где были впервые обнаружены полигидратированные сульфаты магния (минерал старкеит $MgSO_4 \times 4H_2O$, см. (Chipera et al., 2023)) и могут быть связаны с отложениями солей NaCl (O'Connell-Cooper et al., 2025), принесённых грунтовыми водами.

Особый интерес представляет то, что семь геологических областей, идентифицированных в этом исследовании как однородные с точки зрения распределения хлора по глубине, частично пересекаются с формацией Stimson. Это специфическая формация, встречающаяся практически вдоль всей стратиграфической колонки, представляет собой эоловые отложения, которые идентифицируются как остатки древних дюн (Banham et al., 2022). Для дальнейшего анализа по всей стратиграфической колонке были отобраны только те измерения APXS и ДАН, которые выполнены на участках поверхности, покрытой материалом, принадлежащим формации Stimson. Таких измерений оказалось приблизительно 10 % от измерений ДАН и APXS во всех геологических областях. Таким образом, формацию Stimson следует считать однородной в части распределения хлора по глубине. Причём области, классифицированные в данном исследовании как неоднородные, не имеют наложений формации Stimson.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты отражают сложную геохимическую историю марсианской поверхности, связанную с изменением климата Марса и его глобальным переходом от тёплых и влажных условий к холодным и засушливым.

Используя сравнительный анализ содержания объёмного и поверхностного хлора, полученного соответственно по данным измерений приборов ДАН и APXS, установленных на борту марсохода Curiosity, было обнаружено следующее:

1. Наиболее древние речные и озёрные осадочные отложения в ближайшей окрестности и в основании горы Mount Sharp, образовавшейся внутри кратера Гейл, характеризуются однородным распределением хлора по глубине в верхнем слое (на глубину до 0,5 м) марсианского грунта. Это хорошо согласуется с выводами С. Ю. Никифорова и коллег (Nikiforov et al., 2024), где для сравнения использовались только средние значения хлора для областей, пройденных марсоходом до момента вхождения в зону сульфатов.
2. Такой же вывод применим и к большей части относительно молодых осадочных пород, принадлежащих формации Mirador, где были обнаружены гидратированные сульфаты. Образование этих осадочных пород связывают с началом эпохи, когда климат на Марсе стал более холодным и сухим.
3. Среднее содержание хлора в формации Mirador значимо выше, чем для нижележащих осадочных пород. По-видимому, это связано с наложением по времени вулканической активности, вулканический пепел мог взаимодействовать с водой, образуя различные соединения, в том числе хлориды.
4. Часть пути марсохода Curiosity при подъёме по горе Mount Sharp, которая пролегала через верхнюю часть формации Murray и нижнюю часть формации Carolyn Shoemaker, характеризуется наличием береговой линии древнего озера и присутствием гематитов и филлосиликатов. Здесь хлор имеет неоднородное распределение по глубине с более высоким содержанием на поверхности, чем в приповерхностных слоях (см. также обсуждение в работе (Nikiforov et al., 2024)). Можно предположить, что это связано

с разными источниками/процессами, повлиявшими на распространение хлора в этой части стратиграфии.

5. В ходе изучения горы Mount Sharp в отдельную формацию, получившую название Stimson, были выделены эоловые отложения из перекрёстнослоистого серого песчаника. Из-за активного выветривания она на отдельных участках пересекается с другими формациями. В таких местах было показано, что поверхностный и объёмный хлор демонстрируют очень похожее распределение.

ЛИТЕРАТУРА

Banham S. G., *Gupta S.*, *Rubin D. M. et al.* Evidence for fluctuating wind in shaping an ancient Martian dune field: The Stimson formation at the Greenheugh pediment, Gale crater // J. Geophysical Research: Planets. 2022. V. 127. Iss. 9. Article e2021JE007023. DOI: 10.1029/2021JE007023.

Berger J. A., *Schmidt M. E.*, *Gellert R. et al.* A global Mars dust composition refined by the Alpha-Particle X-ray Spectrometer in Gale Crater // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. Iss. P. 67–75. https://doi.org/10.1002/2015GL066675.

Caravaca G., *Mangold N.*, *Dehouck E. et al.* From lake to river: Documenting an environmental transition across the Jura/Knockfarril Hill members boundary in the Glen Torridon region of Gale crater (Mars) // J. Geophysical Research: Planets. 2022. V. 127. Iss. 9. Article e2021JE007093. DOI: 10.1029/2021JE007093.

Chipera S. J., *Vaniman D. T.*, *Rampe E. B. et al.* Mineralogical investigation of Mg-sulfate at the Canaima drill site, Gale crater, Mars // J. Geophysical Research: Planets. 2023. V. 128. Iss. 11. Article e2023JE008041. DOI: 10.1029/2023JE008041.

Fedo C. M., *Grotzinger J. P.*, *Gupta S. et al.* Evidence for persistent, water-rich, lacustrine deposition preserved in the Murray formation, Gale crater: a depositional system suitable for sustained habitability // 9th Intern. Conf. Mars. 2019. Article 6308. LPI Contribution No. 2089.

Fedo C. M., *Bryk A. B.*, *Edgar L. A. et al.* Geology and stratigraphic correlation of the Murray and Carolyn Shoemaker formations across the Glen Torridon region, Gale crater, Mars // J. Geophysical Research: Planets. 2022. V. 127. Iss. 9. Article e2022JE007408. DOI: 10.1029/2022JE007408.

Gellert R., *Clark B. C.* In situ compositional measurements of rocks and soils with the Alpha Particle X-ray Spectrometer on NASA's Mars Rovers // Elements. 2015. V. 11. No. 1. P. 39–44. DOI: 10.2113/gselements.11.1.39.

Gellert R., *Rieder R.*, *Brückner J. et al.* Alpha Particle X-ray Spectrometer (APXS): Results from Gusev crater and calibration report // J. Geophysical Research: Planets. 2006. V. 111. Iss. E2. Article E02S05. DOI: 10.1029/2005JE002555.

Grotzinger J. P., *Crisp J.*, *Vasavada A. R. et al.* Mars Science Laboratory Mission and Science Investigation // Space Science Reviews. 2012. V. 170. No. 1–4. P. 5–56. DOI: 10.1007/s11214-012-9892-2.

Grotzinger J. P. Gupta S., *Malin M. C. et al.* Deposition, exhumation, and paleoclimate of an ancient lake deposit, Gale crater, Mars // Science. 2015. V. 350. Iss. 6257. DOI: 10.1126/science.aac7575.

Gwizd S., *Fedo C.*, *Grotzinger J. et al.* Evolution of a lake margin recorded in the Sutton Island member of the Murray formation, Gale crater, Mars // J. Geophysical Research: Planets. 2024. V. 129. Iss. 1. Article e2023JE007919. DOI: 10.1029/2023JE007919.

Keller J. M., *Boynton W. V.*, *Karunatillake S. et al.* Equatorial and midlatitude distribution of chlorine measured by Mars Odyssey GRS // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. Iss. E3. Article E03S08. DOI: 10.1029/2006JE002679.

Litvak M. L., *Mitrofanov I. G.*, *Barmakov Y. N. et al.* The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment for NASA's 2009 Mars Science Laboratory // Astrobiology. 2008. V. 8. No. 3. P. 605–612. DOI: 10.1089/ast.2007.0157.

Litvak M. L., *Mitrofanov I. G.*, *Varenikov A. B. et al.* Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment onboard NASA's Mars Science Laboratory // Space Science Reviews. 2012. V. 170. Iss. 1–4. P. 559–582. DOI: 10.1007/s11214-012-9924-y.

Litvak M. L., *Mitrofanov I. G.*, *Hardgrove C. et al.* Hydrogen and chlorine abundances in the Kimberley formation of Gale crater measured by the DAN instrument on board the Mars Science Laboratory Curiosity rover // J. Geophysical Research: Planets. 2016. V. 121. No. 5. P. 836–845. DOI: 10.1002/2015JE004960.

Litvak M. L., *Mitrofanov I. G.*, *Gellert R. et al.* Depth distribution of chlorine at Gale crater, Mars, as derived from the DAN and APXS experiments onboard the Curiosity rover // J. Geophysical Research: Planets. 2023. V. 128. Iss. 5. Article e2022JE007694. DOI: 10.1029/2022JE007694.

Mitrofanov I. G., *Litvak M. L.*, *Varenikov A. B. et al.* Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Experiment Onboard NASA's Mars Science Laboratory // Space Science Reviews. 2012. V 170. Iss. 1–4. P. 559–582. DOI: 10.1007/s11214-012-9924-y.

Mitrofanov I. G., *Litvak M. L.*, *Sanin A. B. et al.* Water and chlorine content in the Martian soil along the first 1900 m of the Curiosity rover traverse as estimated by the DAN instrument // J. Geophysical Research: Planets. 2014. V. 119. No. 7. P. 1579–1596. DOI: 10.1002/2013JE004553.

Mitrofanov I. G., *Nikiforov S. Y.*, *Djachkova M. V. et al.* Water and chlorine in the Martian subsurface along the traverse of NASA's Curiosity rover, Part I: DAN measurement profiles along the traverse // J. Geophysical Research: Planets. 2022. V. 127. No. 11. Article e2022JE007327. DOI: 10.1029/2022JE007327.

Nikiforov S. Y., *Djachkova M. V.*, *Gellert R. et al.* Water and chlorine in the Martian subsurface along the 27 km traverse of NASA's Curiosity rover according to DAN measurements: 2. Results for distinct geological regions // J. Geophysical Research: Planets. 2024. V. 129. Iss. 4. Article e2022JE007731. DOI: 10.1029/2022JE007731.

O'Connell-Cooper C. D., *Spray J. G.*, *Gellert R. et al.* Salty Mars — Na Enrichments associated with Cl, S, Mg, Ca in the Layered Sulfate unit, Gale crater, Mars: APXS Identification and Implications // 56th Lunar and Planetary Science Conference. 2025. Article 2801.

Ojha L., *Lewis K.*, *Karunatillake S.*, *Schmidt M.* The Medusae Fossae Formation as the single largest source of dust on Mars // Nature Communications. 2018. V. 9. Article 2867.

Stack K. M., *Grotzinger J. P.*, *Lamb M. P. et al.* Evidence for plunging river plume deposits in the Pahrump Hills member of the Murray formation, Gale crater, Mars // Sedimentology. 2019. V. 66. P. 1768–1802. DOI: 10.1111/sed.12558.

Stein N., *Grotzinger J. P.*, *Schieber J. et al.* Desiccation cracks provide evidence of lake drying on Mars, Sutton Island member, Murray formation, Gale Crater // Geology. 2018. V. 46. P. 515–518. DOI: 10.1130/G40005.1.

Vasavada A. R. Mission Overview and Scientific Contributions from the Mars Science Laboratory Curiosity Rover after Eight Years of Surface Operations // Space Science Reviews. 2022. V. 218. Iss. 3. Article 14. DOI: 10.1007/s11214-022-00882-7.

CHLORINE DEPTH DISTRIBUTION IN VARIOUS GEOLOGICAL REGIONS OF GALE CRATER ACCORDING TO DAN AND APXS DATA

A. E. Romanova, M. L. Litvak, I. G. Mitrofanov, M. V. Djachkova, D. I. Lisov, S.Yu. Nikiforov

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

The article presents the results of an analysis of chlorine distribution on the surface and in the subsurface layer of sedimentary rocks in Martian Gale Crater, as investigated by the Curiosity rover, based on measurements conducted using the Russian DAN instrument and the APXS spectrometer.

The chlorine distribution was considered as a possible marker of processes that played a significant role at different stages of Martian climate evolution. It was found that the vicinity and base of the sedimentary mountain (Mount Sharp) with fluvial and lacustrine deposits, as well as higher and younger areas characterized by a transition to hydrated sulfate deposits, may exhibit a uniform chlorine distribution with depth (down to 50 cm). Meanwhile, regions located between these two groups, where hematite and clay deposits were detected, show sharp heterogeneity with higher chlorine concentrations at the very surface. This may indicate that, in one case, a single transport source of chlorine dominated, possibly related to groundwater activity, while in the other, multiple sources could have been involved, including aeolian deposits, groundwater, and surface liquid water flow.

Keywords: chlorine in regolith, geological regions, Gale Crater, Mars, Curiosity rover, Dynamic Albedo of Neutrons

---

Romanova Anastasia Eduardovna — laboratory assistant
Litvak Maxim Leonidovich — head of laboratory, doctor of physical and mathematical sciences, litvak@iki.rssi.ru
Mitrofanov Igor Georgievich — head of department, doctor of physical and mathematical sciences
Djachkova Maya Viktorovna — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences
Lisov Denis Igorevich — senior researcher
Nikiforov Sergey Yurievich — senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences

УДК 629.7.022 DOI: 10.21046/KMU-2025-321-323

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АРАМИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТЕРМОДЕСТРУКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

А. Д. Рычкова, М. А. Аревков

Амурский государственный университет, Благовещенск, Россия

Проведена оценка возможности использования арамидных композиционных материалов на основе эпоксидной смолы в конструкциях отделяющихся элементов ракет-носителей. Рассматривается их способность к контролируемой термодеструкции, а также физические, механические и тепловые свойства. Проведена сравнительная характеристика подобных композитов по отношению к традиционным материалам. Цель исследования заключается в обосновании возможного применения арамидных композитных материалов в ракетно-космической технике с учётом их эксплуатационных характеристик и возможностей в области термодеструктивных процессов.

Ключевые слова: арамидные композиционные материалы, эпоксидная смола, ракетно-космическая техника, термодеструкция, отделяющиеся элементы, эксплуатационные характеристики

Развитие ракетно-космической техники сопровождается ростом требований к материалам, предназначенным для отделяющихся частей ракет-носителей. Эти элементы конструкции должны работать в условиях высоких температурных, динамических и аэродинамических нагрузок, обеспечивая надёжность операций и минимальное воздействие на окружающую среду. Традиционно для данных целей применяются металлические сплавы и углеродные композиты. Однако они имеют определённые ограничения, такие как высокая плотность и стоимость. В этом случае актуальность приобретают полимерные композиты с включением арамидных волокон. Арамидные композиционные материалы демонстрируют сочетание малой массы и высокой прочности, делая их востребованными для применения в высоконагруженных конструкциях.

Одним из ключевых факторов реализации термодеструктивных процессов становится способность материалов к контролируемому сгоранию. Согласно исследованиям В. И. Трушлякова и соавторов (Trushlyakov et al., 2018), внедрение энергетических материалов в полимерные композиционные материалы позволяет достичь температуры зажигания, необходимой для сгорания отделяемых фрагментов при повторном входе в атмосферу. В патенте (Трушляков и др., 2019) указывается необходимость разработки материалов, способных полностью сгорать до попадания на Землю, что снижает негативное воздействие на окружающую среду.

Арамидные волокна выделяются среди других полимерных волокон благодаря своим физическим и механическим характеристикам (таблица). Предел прочности арамидных волокон сопоставим с углеволокном, но у арамидов значительно выше удлинение при разрыве, что позволяет эффективнее поглощать ударные нагрузки и снижать риск трещинообразования. Углеволокно обладает более высоким модулем упругости, но его низкое удлинение увеличивает хрупкость материала.

Рычкова Александра Дмитриевна — студентка специальности 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов, sam_28_02@mail.ru

Аревков Максим Андреевич – старший преподаватель кафедры стартовые и технические ракетные комплексы, maksim.arevkov@yandex.ru

В свою очередь, арамиды устойчивы к вибрациям и температуре до 400 °C благодаря высокой пластичности. Они имеют низкую воспламеняемость и способность к карбонизации при температуре выше 350 °C, что снижает риск самовозгорания. Склонность арамидов к впитыванию влаги компенсируется полимерной матрицей, которая защищает их от ультрафиолетового излучения. Эпоксидные смолы представляются оптимальными для использования с арамидными волокнами из-за хорошей адгезии. Эксперименты показали, что арамидно-эпоксидные композиты имеют улучшенные механические свойства, включая снижение пористости и увеличение прочности при изгибе (Пахомов и др., 2019).

Характеристики различных типов волокон

Свойство	Стекловолокно	Углеволокно	Арамидные волокна
Плотность, г/см^3	2,45–2,60	1,75–2,00	1,39–1,45
Температура эксплуатации, °C	≤400	≤600	≤450
Температура разложения в O_2, °C	400–500	500–600	400–450
Устойчивость к радиации	Умеренная	Высокая	Высокая
Предел прочности, МПа	2000–4000	3000–6000	2700–6000
Модуль упругости, ГПа	70–90	200–500	70–200
Удлинение при разрыве, %	2,0–6,0	1,5–2,5	2,0-10,0

В качестве энергетического модуля были рассмотрены смесевые твёрдые ракетные топлива с окислителями, такими как нитрат калия (KNO_3) и пероксид бария (BaO_2), в сочетании с металлами (магний, алюминий), которые способны гореть в вакуумных условиях (Архипов и др., 2022). Смесь нитрата калия (KNO_3) и магния (Mg) была признана наиболее эффективной для применения в энергетических материалах (Архипов и др., 2023). Эта смесь обеспечивает стабильное горение в вакууме благодаря разложению KNO_3, который выделяет кислород для поддержания горения. Высокая реакционная способность и низкая температура воспламенения магния позволяют обеспечить интенсивное и устойчивое горение. К тому же температура, достигаемая в результате химических реакций, достаточна для инициирования термодеструкции полимерного композита.

Таким образом, арамидные волокна проявляют значительные преимущества благодаря высокому удлинению при разрыве и способности поглощать энергию, что снижает риск трещинообразования и обеспечивает устойчивость к вибрациям и температуре до 400 °C. В сочетании с эпоксидными смолами эти композиты демонстрируют высокие механические свойства и меньшую хрупкость по сравнению с углеволокном. Смеси, такие как нитрат калия и магния, обеспечивают стабильное горение в вакуумных условиях, что расширяет их применение в ракетной технике и повышает эффективность и безопасность космических систем.

ЛИТЕРАТУРА

Архипов В. А., *Глазунов А. А.*, *Золоторёв Н. Н.*, *Коротких А. Г.*, *Козлов Е. А.* Влияние окислительного компонента на горение конденсированного вещества при пониженных давлениях // Материалы 14-й Международ. конф. по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (AMMAI'2022). 2022. С. 26–28. EDN: KKTDLO.

Архипов В. А., *Глазунов А. А.*, *Золоторёв Н. Н. и др.* Анализ возможности сжигания элементов головного обтекателя ракеты-носителя // Физика горения и взрыва. 2023. Т. 59. № 5. С. 22–32. DOI: 10.15372/FGV2022.9215.

Пахомов К. С., *Антипов Ю. В.*, *Симонов-Емельянов И. Д.*, *Кульков А. А.* Влияние сорбции компонентов эпоксидного связующего на свойства арамидных волокон // Пластич. массы. 2019. № 3-4. С. 7–10. DOI: 10.35164/0554-2901-2019-3-4-7-10.

Трушляков В. И., *Давыдович Д. Ю.*, *Иордан Ю. В.*, *Лемперт Д. Б.* Способ минимизации зон отчуждения для отделяемых частей ракет-носителей и устройство для его реализации: Патент. № 2700150 C1 РФ. МПК F42B 15/00, B64G 1/64. № 2018124085: заявл. 02.07.2018: опубл. 12.09.2019 /заявитель Омский гос. техн. ун-т. EDN: DUYVLY.

Trushlyakov V. I., *Iordan Yu. V.*, *Davydovich D. Yu.* Development of proposals for the synthesis of polymer composite materials capable of combustion after the mission // J. Physics: Conf. Series. 2018. V. 1134. Article 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/1134/1/012061.

PROSPECTS OF APPLICATION OF ARAMID COMPOSITE MATERIALS FOR THERMODESTRUCTIVE PROCESSES IN ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

A. D. Rychkova, M. A. Arevkov

Amur State University, Blagoveshchensk, Russia

The paper evaluates the possibility of using aramid composite materials based on epoxy resin in the structures of separable elements of launch vehicles. Their ability to undergo controlled thermal degradation, as well as their physical, mechanical, and thermal properties, are considered. Comparative characteristics of such composites in relation to traditional materials are carried out. The purpose of the study is to substantiate the possible use of aramid composite materials in rocket and space technology, taking into account their operational characteristics and capabilities in the field of thermodestructive processes.

Keywords: aramid composite materials, epoxy resin, rocket and space technology, thermal degradation, separable elements, operational characteristics

Rychkova Alexandra Dmitrievna — student of major 24.05.01 Design, Production and Operation of Rockets and Aerospace Complexes, sam_28_02@mail.ru

Arevkov Maxim Andreevich — senior lecturer at the Launch and Technical Aerospace Complexes Department, maksim.arevkov@yandex.ru

УДК 521.182, 52.17, 520.88 DOI: 10.21046/KMU-2025-324-331

OREKIT: ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ЭФЕМЕРИДЫ ПРИ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЕ ОБЪЕКТА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Т. Н. Санникова

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пос. Научный, Россия

Исследовано влияние коэффициента, характеризующего отражающие свойства объекта, на точность эфемериды, вычисленной с помощью инструментов Java-библиотеки космической динамики Orekit и оболочки Python-wrapper, позволяющей использовать Orekit в среде Python. Использован метод численного интегрирования с возмущающими факторами: гравитационное поле Земли с учётом гармоник геопотенциала до 20-го порядка и степени включительно, притяжение Солнца, Луны и Юпитера, сопротивление атмосферы, световое давление с использованием конусной модели с тенью и полутенью. Предположено, что тело имеет сферическую форму, т. е. отношение площади к массе постоянно, но варьируется значение коэффициента диффузного отражения C_d. Рассмотрены реальные объекты космического мусора с отношением площади к массе более 1 м^2/кг. Проведена оценка точности полученных эфемерид путём сравнения вычисленных и наблюдённых положений. Использованы наблюдательные данные для объектов космического мусора в геостационарной области, полученные в течение 2022 и 2023 гг. в Крымской астрофизической обсерватории на телескопе АТ-64, а также элементы орбиты и сведения об отношении площади к массе этих объектов, полученные в Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН. Показано, что в некоторых случаях путём подбора коэффициента отражения можно получить достаточно точную эфемериду на более длительный период, чем в случае только зеркального ($C_d = 0$) или только диффузного отражения ($C_d = 1$). Однако метод не даёт стабильного результата для всех объектов, причиной чего может быть их сложная, несферическая форма и наличие поверхностей с различными отражающими характеристиками.

Ключевые слова: космический мусор, отношение площади к массе, эфемерида, коэффициент отражения, световое давление

ВВЕДЕНИЕ

Поскольку форма и отражательные характеристики объектов космического мусора не известны, при определении отношения площади к массе и вычислении эфемериды предполагается, что объект является либо зеркальной сферой, либо диффузной сферой. Однако в действительности отражательные характеристики поверхности объекта могут отличаться от этих идеальных случаев, поэтому за счёт неверной оценки светового давления со временем растут ошибки в орбитальных элементах. Это приводит к снижению точности эфемериды и вынуждает увеличивать частоту наблюдений.

Гипотеза: опираясь на сравнение вычисленных положений с наблюдательными данными, можно подобрать такие коэффициенты отражения, которые позволят получать точную эфемериду на более длительный период, чем в предположении полного диффузного или полного зеркального отражения.

Цель данного исследования заключается в оценке точности эфемерид, вычисленных методом численного интегрирования, реализованным в библиотеке Orekit (*англ.* ORbits Extrapolation KIT), при различных значениях коэффициента диффузного отражения.

Санникова Татьяна Николаевна — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, tnsannikova@craocrimea.ru

Orekit (https://www.orekit.org/) — бесплатная библиотека с открытым исходным кодом, написанная на Java, которая предоставляет базовые элементы (шкалы времени, системы отсчёта, текущее орбитальное состояние космического объекта и т. д.) и различные алгоритмы для их обработки, в том числе различные методы прогнозирования орбитального состояния. Оболочка Python-wrapper (https://gitlab.orekit.org/orekit-labs/python-wrapper) позволяет использовать Orekit в среде Python.

МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭФЕМЕРИДЫ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Прогнозируемые положения объектов вычислены методом численного интегрирования с помощью реализованного в Orekit интегратора Дормана – Принса (DormandPrince853Integrator) (Hairer et al., 1993). Использована следующая модель возмущающих сил: гравитационное поле Земли с учётом гармоник геопотенциала до 20-го порядка и степени включительно, притяжение Солнца, Луны и Юпитера, сопротивление атмосферы, световое давление с использованием конусной модели с тенью и полутенью. При учёте сопротивления атмосферы применён расчёт плотности согласно модели Харриса – Пристера (Harris, Priester, 1962; Montenbruck, Gill, 2000) и принят коэффициент лобового сопротивления 2.0. Как показано в работе (Санникова, 2024), для объектов в геостационарной области выбранная модель возмущающих сил даёт такое же качество эфемериды, как и при учёте дополнительно гармоник геопотенциала до 30-го порядка и степени включительно, приливов в теле Земли от Луны и Солнца, релятивистских эффектов. Для экономии вычислительных ресурсов мы пренебрегли этими факторами.

Световое давление учтено в предположении сферической формы тела, т. е. отношение площади к массе A/m принято постоянным, но варьируются коэффициенты отражения. Упрощённая модель космического объекта (КО) сферической формы строится с помощью конструктора IsotropicRadiationClassicalConvention(crossSection, C_a, C_s), где crossSection — площадь поперечного сечения (в м^2), C_a — коэффициент поглощения, C_s — коэффициент зеркального отражения. Эта модель использует классические термооптические коэффициенты C_a для поглощения, C_s для зеркального отражения и C_d для диффузного отражения. Всегда выполняется соотношение $C_a + C_s + C_d = 1$.

Возмущающее ускорение за счёт светового давления для используемого конструктора вычисляется по формуле:

$$\text{radiationPressureAcceleration} = \text{Flux}\frac{\text{crossSection}}{\text{mass}}\left(1+\frac{4}{9}(1-C_a-C_s)\right) = \\ = \text{Flux}\frac{\text{crossSection}}{\text{mass}}\left(1+\frac{4}{9}C_d\right), \quad (1)$$

где $\text{Flux} = \text{ratio} \times 4{,}56 \cdot 10^{-6} (1\,\text{a.e})^2 \frac{\overline{r}}{r^3}$; ratio — функция тени и полутени, определяет освещённую часть поверхности КО; $\overline{r}$ — радиус-вектор от объекта к Солнцу; $4{,}56 \cdot 10^{-6}$ Н/м^2 — солнечная постоянная; 1 а. е = 149597870000,0 м — астрономическая единица; mass — масса КО. В формулу (1) фактически входит только C_d, но параметрами конструктора IsotropicRadiationClassicalConvention являются crossSection, C_a и C_s. Поэтому при интегрировании принималось $C_a = 0$ и значение C_s варьировалось в пределах от 0 до 1, что равносильно варьированию коэффициента диффузного отражения C_d в пределах от 1 до 0.

В качестве критерия точности эфемериды использовано угловое расстояние ($O - C$) между вычисленным и наблюдённым положением. Принято, что прогноз

имеет хорошее качество, если $(O - C) < 45'$ (попадание в поле зрения телескопа АТ-64), среднее качество при $45' \leqslant (O - C) \leqslant 2{,}2°$ (попадание в зону поиска) и плохое качество при $(O - C) > 2{,}2°$.

Исходные данные

Объект	Эпоха	a, км	e	i, град	g, град	Ω, град	u, град	A/m, м^2/кг
95789	13.03.2022, 05:14:58,56	44837,024	0,051638	15,4592	183,8388	312,9103	0	1,19934
	03.07.2022, 19:57:17,49	44832,263	0,0815746	15,2213	184,9319	311,7646		1,20028
	30.12.2022, 02:58:54,74	44831,740	0,0569847	14,7649	214,6561	309,8854		1,20679
91353	23.03.2022, 01:24:29,99	36758,014	0,1786383	5,8928	254,4823	103,025		4,12886
	22.07.2022, 19:46:51,43	36754,837	0,1061758	6,1926	288,8590	95,9341		4,14192
	16.12.2022, 17:55:07,16	36767,060	0,1315338	6,5613	242,0657	92,9978		4,14976
91257	24.03.2022, 21:33:58,98	36393,701	0,2650624	8,6842	176,4499	181,3711		15,75245
	04.06.2022, 18:11:55,79	36384,405	0,2280808	7,6968	242,8229	173,3247		15,76099
	20.12.2022, 22:07:28,63	36381,971	0,2530036	8,5267	139,6191	146,0294		15,78104
94096	02.09.2022, 02:12:42,32	41510,518	0,2876156	21,5596	172,1461	12,9690		17,35095
	03.11.2022, 04:12:11,85	41419,037	0,3605689	21,9903	216,3028	12,3434		17,17354
	10.12.2022, 00:22:29,76	41384,421	0,3629502	22,1648	241,3078	12,2183		17,17517
97190	05.08.2022, 01:45:54,11	35923,555	0,4498895	28,2971	108,1651	352,6312		26,50398
	07.10.2022, 23:23:20,47	36269,539	0,2163572	28,0800	160,9335	351,3296		26,53476
	19.12.2022, 07:09:32,58	36212,509	0,2226302	27,9494	318,8007	349,4550		26,57284
71409	02.09.2022, 15:58:58,65	45647,441	0,6917629	42,5617	230,8930	28,3369		42,05277
	08.10.2022, 11:52:19,81	45724,620	0,6886006	40,3707	179,8386	32,0656		42,06447
	18.12.2022, 05:29:26,33	45633,440	0,6024851	33,7300	151,1891	35,7883		42.06871

Использованы наблюдения шести малоразмерных космических объектов с отношением площади к массе более 1 м^2/кг, полученные на телескопе АТ-64 в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) в течение 2022 и 2023 гг. Также использованы данные о параметрах орбиты и отношении площади к массе,

вычисленные для этих объектов сотрудниками Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ РАН). Начальное состояние КО задавалось классическими кеплеровыми элементами в квазиинерциальной геоцентрической системе координат истинного экватора и среднего равноденствия TEME (*англ.* True Equator Mean Equinox frame), что наилучшим образом соответствует орбитальным данным каталога ИПМ РАН.

Для рассмотренных объектов на три начальные эпохи в таблице приведены: эпоха элементов (дата, время), элементы орбиты (a — большая полуось, e — эксцентриситет, i — наклон орбиты, g — аргумент перигея, Ω — долгота восходящего узла, u — аргумент широты) и усреднённое по архиву орбит значение отношения площади к массе A/m.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1–6 для шести объектов (таблица) показаны зависимости углового расстояния ($O - C$) между наблюдёнными и вычисленными положениями (в логарифмической шкале) в зависимости от времени между эпохой элементов и моментом наблюдения. Для каждого объекта на рисунке приведены три панели для трёх начальных эпох элементов в соответствии с таблицей. Ниже синей пунктирной линии расположены случаи с хорошим качеством эфемериды, между синей и зелёной пунктирными линиями — случаи со средним качеством, и выше зелёной линии — случаи с ($O - C$) > 2,2°.

Для объекта 95789 ($A/m \approx 1{,}2$ м^2/кг) (см. рис. 1) наиболее оптимальным является $C_d = 0$ (зеркальная сфера), но и в этом случае не удаётся получить точную эфемериду на длительный период. Эфемерида для всех трёх начальных эпох имеет хорошее качество на протяжении 11 дней, среднее качество — на 46 сут. Причиной этого может быть форма объекта, сильно отличающаяся от сферической.

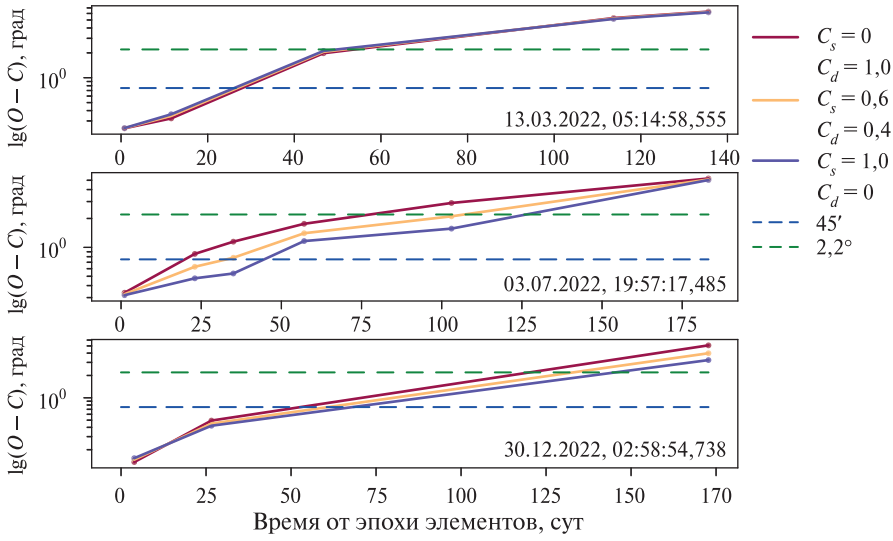


Рис. 1. Результаты для объекта 95789

Для объекта 91353 ($A/m \approx 4{,}1$ м^2/кг) (см. рис. 2) коэффициент диффузного отражения $C_d = 0{,}7$ для трёх различных эпох элементов даёт эфемериду хорошего

качества на более длительный период, чем в случаях полного диффузного или полного зеркального отражения. Минимальная продолжительность эфемериды хорошего качества достигает 120 сут при $C_d = 0{,}7$ (верхняя панель рис. 2) и только 17 сут при $C_d = 0$ или $C_d = 1{,}0$ (нижняя панель рис. 2).

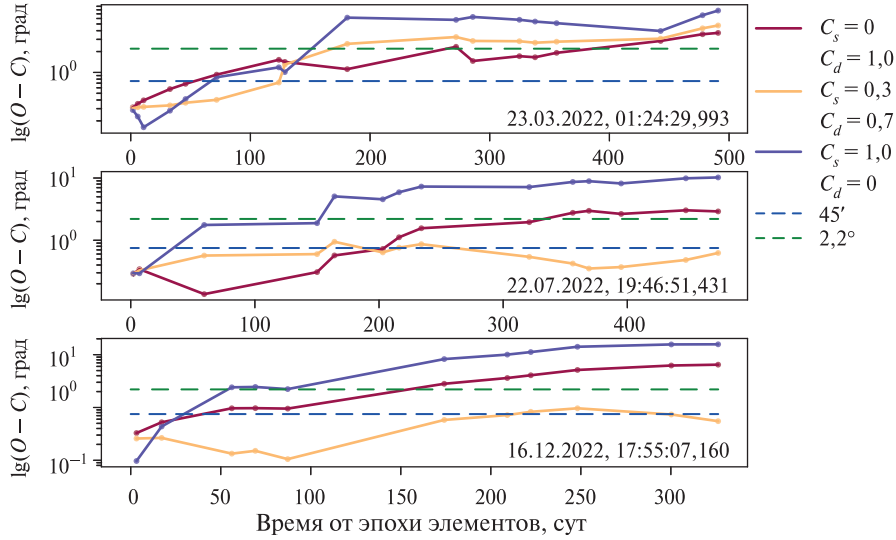


Рис. 2. Результаты для объекта 91353

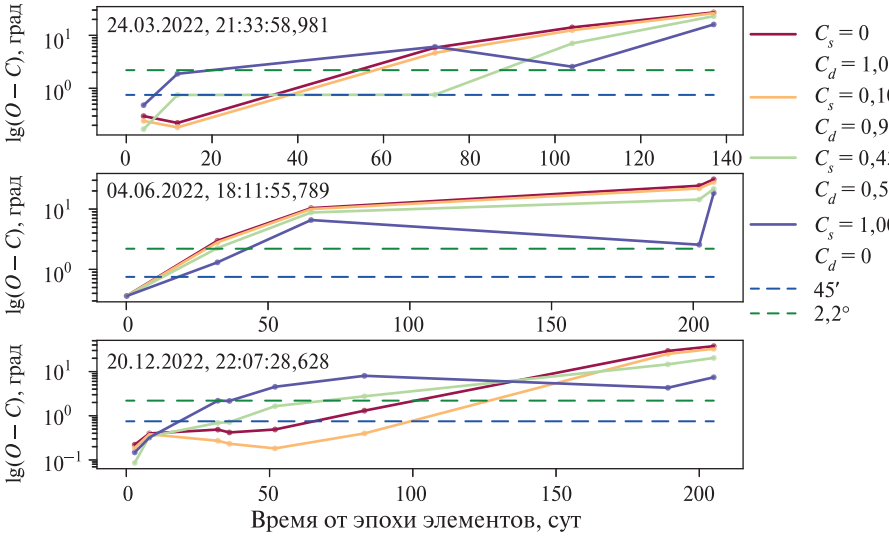


Рис. 3. Результаты для объекта 91257

На рис. 3 приведены результаты для объекта 91257 ($A/m \approx 15{,}8$ м^2/кг). На верхней панели рис. 3 видим, что оптимальным значением является $C_d = 0{,}57$, в то время как для третьей эпохи (нижняя панель рис. 3) лучший результат получен для $C_d = 0{,}9$. Для второй эпохи элементов оптимального значения C_d нет, наименьшие $(O - C)$ получены для зеркальной сферы. Таким образом, для каждой начальной

эпохи можно подобрать некоторое оптимальное значение C_d, но это будут разные значения для разных эпох, что может говорить о том, что объект имеет сложную форму, содержит поверхности с разными отражательными характеристиками и в результате вращения поворачивается к Солнцу разными сторонами.

Для объекта 94096 ($A/m \approx 17{,}2$ м^2/кг) (см. рис. 4) наиболее оптимальным является $C_d = 1{,}0$ (диффузная сфера). В этом случае эфемерида для первой начальной эпохи имеет хорошее качество на протяжении 42 дней, среднее качество более 120 дней (верхняя панель рис. 4). Для второй эпохи $(O - C) < 45'$ на протяжении 60 сут (средняя панель рис. 4), а для третьей — 24 дня (нижняя панель рис. 4), в то время как для зеркальной сферы качество эфемериды быстро падает для всех трёх эпох элементов.

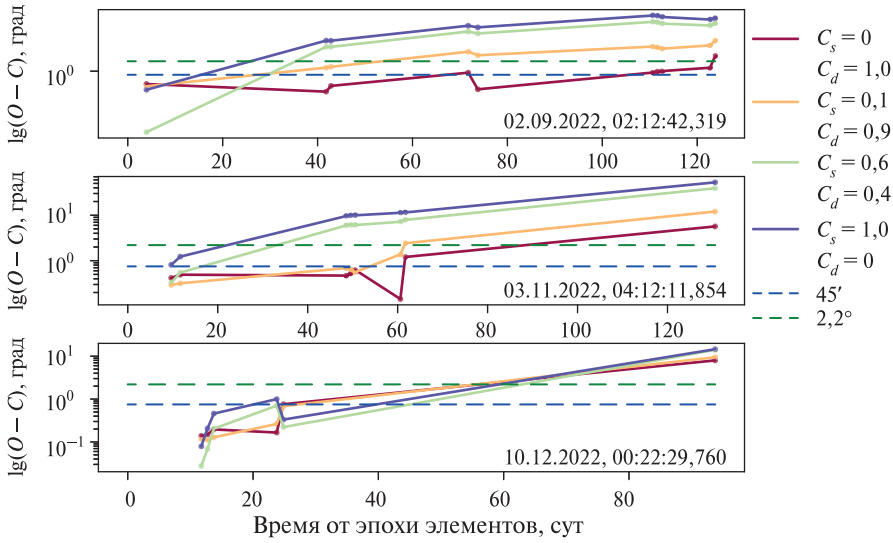


Рис. 4. Результаты для объекта 94096

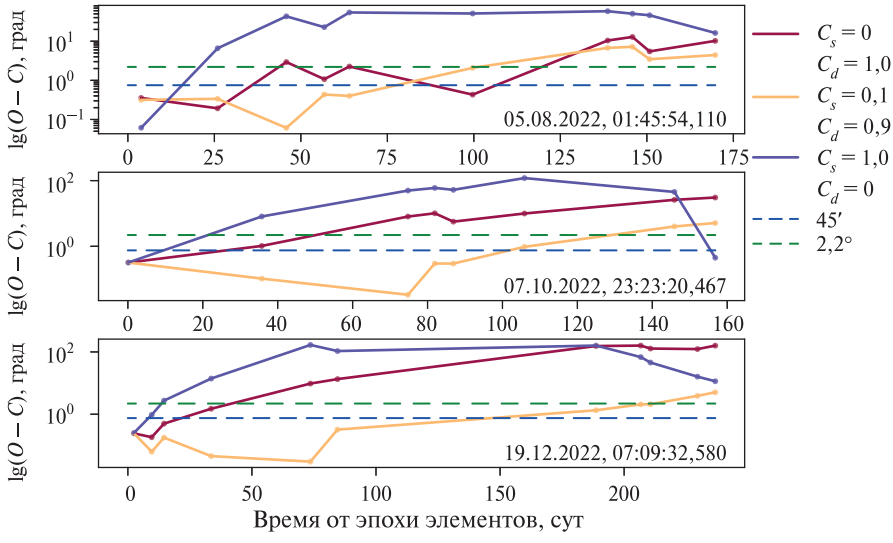


Рис. 5. Результаты для объекта 97190

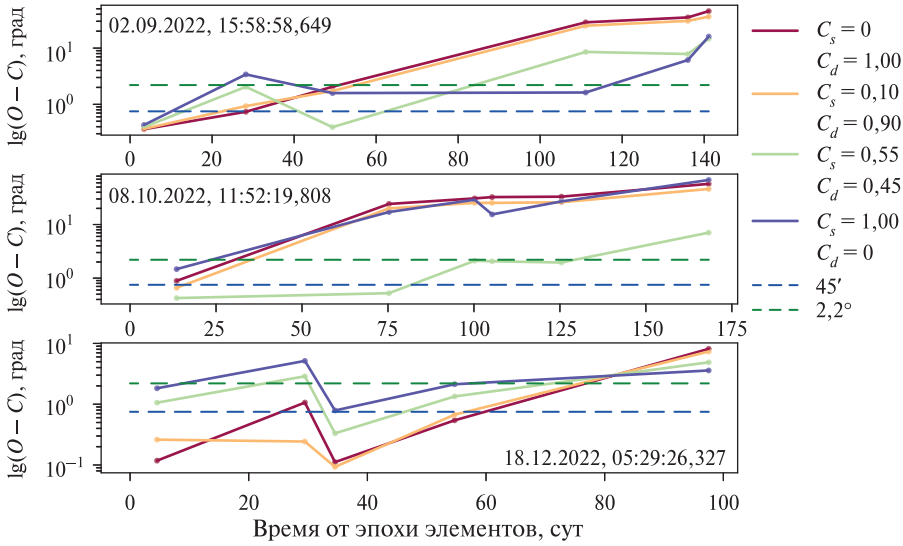


Рис. 6. Результаты для объекта 71409

Рассмотрим объект 97190 (A/m ≈ 26,5 м^2/кг) (см. рис. 5). Эфемерида хорошего качества минимум на 64 дня и среднего качество минимум на 100 дней получена при $C_d = 0{,}9$ для трёх различных эпох элементов. В то же время при $C_d = 0$ или $C_d = 1{,}0$ качество эфемериды быстро падает, однако для всех трёх эпох диффузная сфера демонстрирует меньшие значения $(O - C)$, чем зеркальная.

Рисунок 6 демонстрирует результаты для объекта 71409 ($A/m \approx 42{,}1$ м^2/кг). На верхней панели рис. 6 оптимальным значением является $C_d = 1{,}0$, на средней панели — $C_d = 0{,}45$, в то время как на нижней панели лучший результат получен для $C_d = 0{,}9$. Таким образом, для каждой начальной эпохи можно подобрать различные оптимальные значения C_d. Как и в случае объекта 91257 (см. рис. 3) можно предположить, что объект 71409 имеет сложную, несферическую форму и содержит поверхности с разными отражательными характеристиками, например, является фрагментом теплоизоляции, что объясняет также и высокую парусность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние коэффициента, характеризующего отражающие свойства объекта, на точность эфемериды, вычисленной методом численного интегрирования с помощью инструментов библиотеки Orekit. Предположено, что тело имеет сферическую форму, т. е. отношение площади к массе постоянно, но варьировалось значение коэффициента диффузного отражения C_d. Рассмотрены реальные объекты космического мусора с отношением площади к массе более 1 м^2/кг. Проведена оценка точности полученных эфемерид путём сравнения вычисленных и наблюдённых положений. Показано, что в некоторых случаях подбором коэффициента отражения можно получить достаточно точную эфемериду на более длительный период, чем в случае только зеркального ($C_d = 0$) или только диффузного отражения ($C_d = 1$). Однако метод не даёт стабильного результата для всех объектов, что может быть связано с их сложной, несферической формой и наличием поверхностей с различными отражательными характеристиками. Поэтому в дальнейшем мы планируем исследовать точность эфемерид при варьировании формы объектов.

Автор благодарит Василия Владимировича Румянцева, старшего научного сотрудника КрАО за предоставленные данные о малоразмерных космических объектах. Статья выполнена за средства государственного задания, тема № 22022400207-0.

ЛИТЕРАТУРА

Санникова Т. Н. Оценка точности эфемериды объекта космического мусора, вычисленной с помощью библиотеки Orekit // 21-я Конф. молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. науч. тр. Сер. «Механика, управление и информатика». М.: ИКИ РАН, 2024. С. 146–154. DOI: 10.21046/KMU-2024-146-154.

Hairer E., *Norsett S.*, *Wanner G.* Solving Ordinary Differential Equations I: Nonstiff Problems. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1993. DOI: 10.1007/978-3-540-78862-1.

Harris I., *Priester W.* Time-Dependent Structure of the Upper Atmosphere // J. Atmospheric Sciences 1962. V. 19. No. 4. P. 286–301. DOI: 10.1175/1520-0469(1962)019<0286:TDSOTU>2.0.CO;2.

Montenbruck O., *Gill E.* Satellite orbits: models, methods, and applications. Berlin; N. Y.: Springer, 2000. DOI: 10.1007/978-3-642-58351-3.

OREKIT: EFFECT OF REFLECTIVITY ON EPHEMERIS ACCURACY FOR SPHERICAL SPACE DEBRIS

T. N. Sannikova

Crimean Astrophysical Observatory RAS, Nauchny, Russia

The effect of the coefficient characterizing the reflective properties of an object on the accuracy of the ephemeris calculated using the tools of the Orekit space-dynamics Java-library and the Python-wrapper, which allows using Orekit in the Python environment, is studied. The numerical integration method with perturbing factors is used: the Earth's gravitational field taking into account the geopotential harmonics up to the 20th order and degree, the attraction of the Sun, Moon and Jupiter, atmospheric drag, and light pressure using a cone model with umbra and penumbra. It is assumed that the body has a spherical shape, i.e. the area-to-mass ratio is constant, but the value of the diffuse reflection coefficient C_d varies. Real space debris objects with an area-to-mass ratio of more than 1 m^2/kg are considered. The accuracy of the obtained ephemerides is assessed by comparing the calculated and observed positions. We used observational data for space debris objects in the geostationary region obtained during 2022 and 2023 at the Crimean Astrophysical Observatory on the AT-64 telescope. We also used data on orbital parameters and area-to-mass ratios obtained for these objects at the Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences. It is shown that in some cases, by selecting the reflection coefficient, it is possible to obtain a fairly accurate ephemeris for a longer period than in the case of only specular ($C_d = 0$) or only diffuse reflection ($C_d = 1$). However, the method does not give a stable result for all objects, which may be due to their complex, non-spherical shape and the availability of surfaces with different reflective characteristics.

Keywords: space debris, area-to-mass ratio, reflection coefficient, ephemeris, light pressure

Sannikova Tatiana Nikolaevna — researcher, candidate of physical and mathematical sciences, tnsannikova@craocrimea.ru

УДК 327(73:470)»1957»:070 DOI: 10.21046/KMU-2025-332-337

ОТРАЖЕНИЕ ЗАПУСКА СОВЕТСКИМ СОЮЗОМ ПЕРВОГО В МИРЕ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ В АМЕРИКАНСКОЙ ПРЕССЕ

А. А. Семенова

Исследовательский центр «Космическая экономика и политика», Москва, Россия
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия

На материале ведущих общенациональных и крупных региональных американских газет анализируется медиа освещение запуска СССР космического аппарата «Спутник-1». В СМИ подробно описывалось данное событие, публиковались аналитические комментарии экспертов, государственных деятелей, представителей науки и журналистики. Запуск искусственного спутника Земли оценивался как эпохальное достижение, которое будет иметь последствия для государственной безопасности и престижа США. Особую активность в прессе проявили политики-демократы, которые критически оценивали внешнюю и оборонную политику администрации президента Д. Эйзенхауэра.

Ключевые слова: космическая гонка, Спутник, Д. Эйзенхауэр, холодная война

Начало космической гонки занимает особое место в коллективной памяти США. Исследования американской космической программы при Д. Эйзенхауэре (*англ.* D. Eisenhower) и так называемый “Sputnik crisis” (реакции американского общества и военно-политических кругов на успех советской программы по запуску первого в мире искусственного спутника Земли, ПС-1) представлены несколькими историографическими направлениями. Два преобладающих подхода тесно связанны с оценкой личности президента и стиля его руководства страной. В 60-е гг. XX в. Д. Эйзенхауэра характеризовали как «пассивного», «слабого» и «нерешительного» лидера, и вследствие этого резко критиковали действия руководства страны как не отвечающие интересам безопасности и престижа США[1]. Считалось, что в октябре 1957 г. государство было подвергнуто военной угрозе, а из-за пренебрежения военными нуждами, неверными приоритетами в оборонной политике администрация не смогла дать соразмерный ответ на этот вызов. Историки второго подхода значительно пересмотрели взгляды своих предшественников, что стало возможным благодаря огромному массиву источников, который стал доступен в 80-е гг. XX в.[2]. Ревизия привела к более сдержанной и многосторонней оценке президента и проведённых им мероприятий в сфере освоения космоса. Так, Д. Эйзенхауэр представляется мудрым лидером, который принимал решения, адекватные уровню угроз государственной безопасности, а его бюджетный консерватизм — верной стратегией. Основную ответственность за нагнетание настроений во внутриполитическом дискурсе историки «второй волны» возлагают на ряд видных членов Демократической партии и редакторов газет.

[1] Berkeley, Rip. The Sputnik Crisis and Early United States Policy: A Critique of the Historiography of Space. Bloomington: Indiana University Press, 1991. pp. 162.

[2] McDougall, Walter A. ...the Heavens and the Earth: A Political History of the Space Age (New York, 1985); Greenstein, Fred E. The Hidden-Hand Presidency: Eisenhower as Leader (New York: Basic Books, 1982); Immerman, Richard H. Confessions of an Eisenhower Revisionist: An Agonizing Reappraisal, Diplomatic History 14 (1990), pp. 319–342; Rabe, Stephen G. “Eisenhower Revisionism: A Decade of Scholarship”, Diplomatic History 17 (1993), pp. 97–115; Shanahan, Mark. Eisenhower and the Dawn of the Space Age: Sputnik, rockets and helping hands. Lexington Books, 2017.

Семенова Анастасия Александровна — магистрант, semenova.anastasiaa@mail.ru

В современной историографии[3] преобладает мнение, что администрация Д. Эйзенхауэра проводила отвечающую нуждам национальной безопасности политику, но президент не смог стать фигурой, сплачивающей американское общество и страны «свободного мира», не смог стать национальным лидером. Как историки, так и современники отмечали в том числе тормозящую роль межведомственной конкуренции и вражды на раннем этапе развития ракетно-космической программы США[4].

В начале 1950-х гг. в Соединенных Штатах Америки были сторонники развития национальной космической программы, которым необходимо было убедить власть и общество в перспективности реализации их идей для получения финансирования. Так, планы по полёту человека в космос были подробно изложены для широкой аудитории в серии статей журнала «Кольерс» (*англ*. Collier's) под названием «Человек скоро покорит космос!» (Man Will Conquer Space Soon!)[5]. Ведущие учёные (В. фон Браун (*англ*. W. von Braun), Ф. Уиппл (*англ*. F. Whipple), Дж. Каплан (*англ*. J. Kaplan), В. Леи (*англ*. W. Ley), О. Шахтер (*англ*. O. Schachter) и др.) объясняли читателям, что Соединенным Штатам необходимо незамедлительно приступить к разработке собственной космической программы для того, чтобы опередить Советский Союз и установить в космосе своё присутствие первыми. После журнальных публикаций последовало сотрудничество Вернера фон Брауна — «отца» американской космической программы, с мультипликационной компанией Дисней. Выпуски передачи «Человек в космосе» (*англ*. Man in Space) собрали перед телеэкранами 42 миллиона человек (1955)[6]. В том же году администрация США сделала публичное заявление о планах государства по запуску «небольшого спутника»[7] в рамках Международного геофизического года (июль 1957 – декабрь 1958 г.). Американское общество было уверено в том, что первой космической державой непременно будут Соединенные Штаты.

Неожиданно для общественности и ряда политиков, первыми в космосе стали «русские»[8]. Запуск ПС-1 всесторонне освещался в американских газетах, это было

[3] Divine, Robert A. The Sputnik Challenge. New York: Oxford University Press. 1993; Mieczkowski, Yanek. Eisenhower's Sputnik Moment: The Race for Space and World Prestige: Cornell University Press, 2013; Sambaluk, Nicholas M. The Other Space Race: Eisenhower and the Quest for Aerospace Security. Annapolis, MD: U. S. Naval Institute Press, 2015.

[4] Brzezinski, Matthew. Red Moon Rising: Sputnik and the hidden rivalries that ignited the Space Age, 2007; Oxnard Press-Courier, 12 Oct., 1957. P. 17; Toledo Blade, 26 June, 1961. P. 2; Exploring the Unknown: Selected Documents in the History of the U. S. Civilian Space Program. Vol. IV: Accessing Space, I-11.

[5] Collier's March 22, 1952. Man Will Conquer Space Soon.

[6] Пишкевич Д. Вернер фон Браун: человек, который продал Луну; пер. с англ. Минск: Попурри, 2011. С. 158.

[7] Statement by James C. Hagerty. July 29, 1955 // Eisenhower Presidential Library. https://www.eisenhowerlibrary.gov/sites/default/files/research/online-documents/igy/1955-7-29-press-release.pdf.

[8] New York Herald Tribune, 07.10.1957, P. 1. Тем не менее, данное событие не было в полном смысле слова неожиданностью. ЦРУ, согласно оценке обстановки под номером 11-5-57 «Советские возможности и вероятные программы в области управляемых ракет» предполагало, что Советский Союз приложит значительные усилия для того, чтобы стать первой в мире державой, запустившей космический аппарат и, может добиться этого в 1957 году (притом указывалось, что данные, полученные с такого спутника будут иметь «ограниченное военное значение»). См. подробнее: Intelligence Advisory Committee, National Intelligence Estimate 11-5-57, "Soviet Capabilities and Probable Programs in the Guided Missile Field," TOP SECRET, 12 March 1957 // National Security Archive. https://nsarchive.gwu.edu/document/19840-national-security-archive-doc-14-intelligence.

экстраординарным медиа-событием: ведущие газеты США публиковали карты с траекторией движения спутника, рассказы очевидцев, информацию о снимках и загадочных сигналах, издаваемых космическим аппаратом[9]. Национальная телерадиовещательная компания прервала радио- и телепрограммы, запланированные на вечер 5 октября, чтобы передать эти радиосигналы. Газеты наполнились информацией о том, где и во сколько можно будет увидеть «блестящий шар»[10]. На страницах газет не просто сообщалась новость, а переосмысливалось положение США в мире. Технологические достижения и реальную значимость «Спутника-1», несмотря на идеологические противоречия, пресса признала сразу, окрестив космический аппарат «искусственной Луной»[11], которая открыла «космическую эру»[12]. Доминирующими эмоциями были шок и тревога. Начало эры освоения человеком космоса прочно связано с Советским Союзом, что в Соединенных Штатах было названо «Перл-Харбором в науке»[13].

Параллельно в СМИ публиковались аналитические комментарии о возможных политических последствиях первенства Советского Союза в космосе для американского престижа и государственной безопасности. В прессе поднималось три основных вопроса.

Во-первых, американских экспертов волновали реакция союзников по блоку и симпатии освобождавшихся от колониальной зависимости государств[14]. Привлекательны ли американская военная мощь для первых, и американское технологическое первенство для вторых? В гонке за мировой престиж «мы выиграли в первом раунде, создав водородную бомбу, но второй раунд за ними со Спутником»[15].

Во-вторых, отчётливо зазвучал вопрос о месте науки и техники среди других направлений государственной политики Соединенных Штатов Америки. В СМИ стала транслироваться обеспокоенность недостаточным вниманием к перспективным исследовательским проектам, высшему образованию в приоритетных областях, уровню отечественной науки[16]. Это стало ключевой темой в последующие месяцы.

---

[9] Наиболее сенсационный тон описания события отмечается у The Chicago Tribune и Los Angeles Times. В то время как на первой полосе The New York Times и The Washington Post были опубликованы более сдержанные заголовки «Советы запустили спутник Земли в космос. Он вращается вокруг земного шара со скоростью 18 000 миль в час. Сфера отслеживалась при 4 пролётах над США» и «Советский спутник Земли вращается вокруг земного шара на высоте 500 миль, скорость 18 000 миль в час» (соответственно), Los Angeles Times и The Chicago Tribune вносят идеологический подтекст, используя термин «Красная Луна» вместо «спутника», и «красные» вместо «советов», представляя космический аппарат угрозой. См. подробнее: New York Times, 5 Oct. 1957. P. 1; The Washington Post, 5 Oct. 1957. P. 1; Los Angeles Times, 5 Oct. 1957. P. 1; The Chicago Tribune, 6 Oct. 1957. P. 1.

[10] Youngstown Vindicator, 7 Oct. 1957. P. 9.

[11] Los Angeles Times, 5 Oct. 1957. P. 1; New York Times, 7 Oct. 1957. P. 26; The Washington Post, 5 Oct. 1957. P. 1; Chicago Tribune, 6 Oct. 1957. P. 1.

[12] Los Angeles Times, 6 Oct. 1957. P .4; Orlando Sentinel, 6 Oct. 1957. P. 1. The New York Times, 6 Oct. 1957. P. 42.

[13] Middlesboro Daily News, 27 Nov., 1957. P. 5. См. также: Dickson, Paul. Sputnik: the shock of the century. Ontario: Fitzhenry and Whiteside, 2001. P. 4.

[14] he Wall Street Journal, 7 Oct. 1957, P. 1; Washington Post, 6 Dec., 1957. P. 2; New York Times, 6 Oct. 1957. P. 1.

[15] Washington Post, 7 Oct. 1957, P. 3.

[16] New York Times, 9 Oct., 1957. P. 13.

В-третьих, показавшись над горизонтом американского континента, советский спутник поставил вопрос государственной безопасности. Впервые в истории территория США оказалась досягаемой для прямого удара. Показательны слова Дж. Киллиана (*англ*. J. Killian), председателя консультативного совета по разведке при президенте США (President's Intelligence Advisory Board, PIAB): «В одночасье возник широко распространённый страх, что страна находится во власти российской военной машины, и что наше собственное правительство и его армия внезапно потеряли способность защитить материк, не говоря уже о поддержании престижа и лидерства США на международной арене»[17]. Согласно аналитическим комментариям, опубликованным в СМИ, опасение вызывает не сам космический аппарат, который не представляет военной угрозы для США, а запустившая его ракета-носитель, которая являлась модификацией нового типа ракет, которой ещё не обладали Соединенные Штаты — межконтинентальной баллистической ракетой (МБР). Почти все издания прямо или косвенно заявляли о потенциальной возможности доставки ядерного оружия на территорию США с помощью этого элемента «ядерной триады».

Политики демократы (С. Саймингтон (*англ*. S. Symington), Дж. Кеннеди (*англ*. J. Kennedy), Л. Джонсон (*англ*. L. Johnson) и др.) в ходе слушаний в подкомитетах Конгресса и на страницах газет вменяли администрации Д. Эйзенхауэра недооценку советской экономической и военной мощи, «самоуспокоенность» и медлительность, низкое финансирование военной сферы, образования и науки, а также ослабление обороноспособности государства, «ракетное отставание» (*англ*. missile gap) из-за чего, по их мнению, безопасность и престиж США были под угрозой[18]. Утверждалось, что запуск «Спутника-1» ознаменовал появление нового пространства соперничества сверхдержав[19]. В редакционной статье The New York Times содержалось следующее высказывание: «Наша страна проиграла первый раунд космической гонки»[20].

Согласно результатам опросов, проведённых в октябре 1957 г., «возможно, не удивлённый, но, определённо, встревоженный»[21] рядовой американец испытывал смешанные чувства. Хотя, не все были полностью удовлетворены «вторым местом» в космосе, американское общество не было насколько оппозиционным политике президента, как это пытались представить редакторы газет, радиокомментаторы, конгрессмены-демократы и ряд деятелей науки. Винить в «отставании» американцы предпочитали школьную систему, не обеспечивающую должный уровень заинтересованности в науке у учеников, собственное самодовольство и беззаботность в вопросе безопасности, борьбу между военными ведомствами за реализацию проектов национального масштаба, а также низкое материальное стимулирование и отсутствие общественного признания значимости деятельности

[17] Killian James. Sputnik, Scientists and Eisenhower: A Memoir of the First Special Assistant to the President for Science and Technology. Lexington: University of Kentucky Press, 1977. P. 7.

[18] Washington Post, 6 Dec., 1957. P. 2; Foreign Affairs, Vol. 36, No. 1 (Oct., 1957), pp. 44; New York Times, 6 Oct. 1957. P. 1; Washington Post, 11 Oct. 1957. P. 1; New York Times, 10 Oct. 1957. P. 34; New York Times, 11 Oct. 1957. P. 12; Los Angeles Times, 10 Oct. 1957. P. 10.

[19] New York Times, 6 Oct. 1957. P. 1; New York Times, 16 Oct. 1957. P. 18; Los Angeles Times, 6 Oct. 1957. P. I-10. The Washington Post, 6 Oct. 1957. P. A4. The Washington Post, 7 Oct. 1957. P. A2.

[20] New York Times, 10 Oct. 1957. P. 34.

[21] Michael, Donald N. The Beginning of the Space Age and the American Public Opinion / Public Opinion Quarterly, Vol. 24, No. 4, Winter, 1960. P. 582.

учёных[22]. Однако после того как СССР запустил в космос ПС-2 (ноябрь 1957 г.) с полезной нагрузкой весом в полтонны и с живым существом на борту (собакой Лайкой), было высказано мнение, что Советский Союз может «засыпать»[23] США водородными бомбами. С ноябрьских событий — проведения слушаний в подкомитете Сената по вопросам готовности (*англ.* Preparedness Subcommittee) и запуска второго советского космического аппарата, и, в особенности, декабрьских (провал запуска американского спутника «Авангард»), публичная риторика политиков-демократов и ряда республиканцев приобрела резко критичный характер[24].

Так, в первых оценках американской прессы запуск СССР «Спутника-1» — это технологический прорыв. Тот факт, что новое пространство в течение нескольких месяцев было доступно только сопернику США, вызывало шок и страх. В октябре 1957 г. соперничество сверхдержав распространилось на космос. Считалось, что необходимо преодолеть технологическое отставание и предпринять активные действия для формирования национальной космической политики, что в итоге привело к созданию НАСА (1958) и резкому увеличению финансирования науки и образования (STEM (*англ.* Science, Technology, Engineering, Mathematics) и лингвистика) в результате принятия Закона об образовании в целях национальной обороны (1958).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

Периодические издания

1. Collier's March 22, 1952.
2. Daytona Beach Morning Journal, 1957.
3. Los Angeles Times, 1957.
4. Middlesboro Daily News, 1957.
5. New York Times, 1957.
6. Ocala Star-Banner, 1957.
7. Orlando Sentinel, 1957.
8. Oxnard Press-Courier, 1957.
9. Park City Daily News, 1957.
10. Pittsburgh Post-Gazette, 1957,
11. The Chicago Tribune, 1957.
12. The Tuscaloosa News, 1957.
13. Toledo Blade, 1957.
14. Washington Post, 1957.
15. Youngstown Vindicator, 1957.

Государственные документы

1. Logsdon, John M., Williamson, Ray A., Launius, Roger D., Acker, Russell J., Garber, Stephen J., Friedman, Jonathan L. Exploring the Unknown: Selected Documents in the History of the U. S. Civilian Space Program. Vol. IV: Accessing Space, Washington DC: NASA, 1999.

[22] Public Opinion Index, Apr. 14, 1958 [DDE's Records as President, Official Files, Box 625, OF 146-F-2 Earth-Circling Satellites (2) // Eisenhower Presidential Library, Museum and Boyhood Home. https://www.eisenhowerlibrary.gov/sites/default/files/research/online-documents/sputnik/4-14-58.pdf.

[23] Ocala Star-Banner, 4 Nov. 1957. P. 12.

[24] The Washington Post, 7 Nov. 1957. P. A1; The New York Times, 18 Nov. 1957. P. 12; Chicago Tribune, 25 Nov. 1957. P. 3.

2. Intelligence Advisory Committee, National Intelligence Estimate 11-5-57, "Soviet Capabilities and Probable Programs in the Guided Missile Field," TOP SECRET, 12 March 1957 // National Security Archive https://nsarchive.gwu.edu/document/19840-national-security-archive-doc-14-intelligence.
3. Statement by James C. Hagerty. July 29, 1955 // Eisenhower Presidential Library. https://www.eisenhowerlibrary.gov/sites/default/files/research/online-documents/igy/1955-7-29-press-release.pdf.

Литература

1. Пишкевич Д. Вернер фон Браун: человек, который продал Луну; пер. с англ. Минск: Попурри, 2011. С. 158.
2. Berkeley, Rip. The Sputnik Crisis and Early United States Policy: A Critique of the Historiography of Space. Bloomington: Indiana University Press, 1991.
3. Brzezinski, Matthew. Red Moon Rising: Sputnik and the hidden rivalries that ignited the Space Age, 2007.
4. Dickson, Paul. Sputnik: the shock of the century. Ontario: Fitzhenry and Whiteside, 2001.
5. Divine, Robert A. The Sputnik Challenge. New York: Oxford University Press. 1993.
6. Immerman, Richard H. Confessions of an Eisenhower Revisionist: An Agonizing Reappraisal, Diplomatic History 14 (1990), pp. 319–342.
7. Killian James. Sputnik, Scientists and Eisenhower: A Memoir of the First Special Assistant to the President for Science and Technology. Lexington: University of Kentucky Press, 1977.
8. McDougall, Walter A. ...the Heavens and the Earth: A Political History of the Space Age (New York, 1985); Greenstein, Fred E. The Hidden-Hand Presidency: Eisenhower as Leader (New York: Basic Books, 1982).
9. Michael, Donald N. The Beginning of the Space Age and the American Public Opinion / Public Opinion Quarterly, Vol. 24, No. 4, Winter, 1960. P. 582.
10. Mieczkowski, Yanek. Eisenhower's Sputnik Moment: The Race for Space and World Prestige: Cornell University Press, 2013.
11. Rabe, Stephen G. "Eisenhower Revisionism: A Decade of Scholarship", Diplomatic History 17 (1993), pp. 97–115.
12. Sambaluk, Nicholas M. The Other Space Race: Eisenhower and the Quest for Aerospace Security. Annapolis, MD: U. S. Naval Institute Press, 2015.
13. Shanahan, Mark. Eisenhower and the Dawn of the Space Age: Sputnik, rockets and helping hands. Lexington Books, 2017.

SOVIET LAUNCH OF THE WORLD'S FIRST ARTIFICIAL EARTH SATELLITE IN THE AMERICAN PRESS

A. A. Semenova

Research Center "Space Economy and Policy", Moscow, Russia
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The research paper analyses media coverage of the launch of USSR Sputnik-1 by leading national and major regional American newspapers. The event was described in detail in the media, analytical comments of experts and government officials, representatives of science and journalism were published. The launch of an artificial Earth satellite was seen as a landmark achievement that would have implications for US national security and prestige. Particularly active in the press were Democratic politicians who critically evaluated the activities of the administration of President D. Eisenhower.

Key words: space race, Sputnik, D. Eisenhower, cold war

Semenova Anastasiia Aleksandrovna — master's student, semenova.anastasiaa@mail.ru

УДК 629.78.058 DOI: 10.21046/KMU-2025-338-343

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ГРУНТОЗАБОРНОГО УСТРОЙСТВА

Е. О. Тарасов [1,2]***, И. Г. Митрофанов*** [1]***, М. И. Мокроусов*** [1]***, А. А. Аникин*** [1]

[1] **Институт космических исследований РАН, Москва, Россия**
[2] **Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт), Москва, Россия**

Проведён обзор и анализ требований к грунтозаборному устройству для посадочного космического аппарата «Луна-Ресурс-1», определены его назначение, ключевые технические требования и архитектура. Детально рассмотрен комплекс контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) ГЗУ, его состав, тактико-технические требования и метрологическое обеспечение для наземных отработок. Особое внимание уделено разработке устройства управления (УУ) КИА ГЗУ. Описаны его функциональное назначение, аппаратная платформа на базе платы Iskra Mega, 24-битного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ADS1220 и силовых MOSFET-ключей (*англ.* metal-oxide-semiconductor field-effect). Детально представлена разработка специализированной переходной платы для АЦП, обеспечивающей подключение температурных датчиков через резистивные делители. Описана структура программного обеспечения УУ, реализующая сбор данных с температурных датчиков, аналого-цифровое преобразование, управление силовыми ключами и вывод диагностической информации.

Ключевые слова: грунтозаборное устройство, контрольно-измерительная аппаратура, устройство управления, «Луна-Ресурс-1»

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) является неотъемлемой частью создания прибора для любого космического эксперимента. Это обусловлено критической необходимостью контроля за функциональным состоянием бортовых систем и аппаратуры, а также получением достоверных данных в процессе наземных отработок. В Институте космических исследований РАН ведутся работы по созданию КИА, обеспечивающей функционирование и высокоточную регистрацию параметров функционирования грунтозаборного устройства (ГЗУ) для космической миссии «Луна-Ресурс-1» в условиях наземных отработок. Эти работы имеют ключевое значение для проведения полного цикла наземных испытаний и подтверждения работоспособности и надёжности ГЗУ перед его отправкой в космос.

Миссия «Луна-Ресурс-1» является значимым этапом в исследовании Луны, нацеленным на получение комплексных данных о её поверхности и приповерхностном слое. Ключевой элемент, обеспечивающий реализацию этой цели, — грунтозаборное устройство, основное назначение которого заключается в заборе проб лунного грунта (реголита), транспортировке и размещении образцов, а также обеспечении чистоты образцов. Создание ГЗУ сопряжено с рядом жёстких технических требований, включая надёжность и долговечность, массогабарит-

Тарасов Егор Олегович — студент, лаборант, tarasovf2018@yandex.ru
Митрофанов Игорь Георгиевич — заведующий отделом, доктор физико-математических наук
Мокроусов Максим Игоревич — заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук
Аникин Артём Александрович — инженер

ные ограничения, минимизацию энергопотребления, устойчивость к абразивности реголита, возможность автономного и дистанционного управления, а также вибро- и ударопрочность. ГЗУ подключается к системе электропитания (СЭП) посадочного аппарата и блоку управления научными измерениями (БУНИ), обеспечивающему телеметрический и командный интерфейс.

Разработка ГЗУ требует проведения всесторонних наземных испытаний для подтверждения его работоспособности, соответствия техническим требованиям и готовности к эксплуатации в экстремальных условиях лунной поверхности. Для обеспечения этих испытаний разрабатывается специализированный комплекс КИА ГЗУ, предназначенный для наземных отработок. Основное назначение КИА ГЗУ заключается в обеспечении полного цикла наземных испытаний, направленных на подтверждение функциональных, эксплуатационных и конструктивных характеристик испытуемого образца ГЗУ. КИА способна проводить автономные и комплексные испытания, контролировать и регистрировать электрические, информационные и механические параметры ГЗУ, а также обеспечивать автоматизированный и ручной режимы контроля. К КИА ГЗУ предъявляются требования по имитации сигналов, измерению всех необходимых параметров, защите ГЗУ, длительной непрерывной работе (не менее 10 ч), протоколированию данных, регистрации нештатных ситуаций и настройке параметров. КИА ГЗУ взаимодействует с ГЗУ через ряд электрических и информационных интерфейсов, подавая управляющие сигналы и считывая данные с датчиков.

В данной работе рассматриваются принципы проектирования устройства управления контрольно-измерительной аппаратуры грунтозаборного устройства. Представлены архитектурные и инженерные решения конструкции, направленные на повышение точности измеряемых параметров и надёжности работы КИА в целом. Особое внимание уделено детальному описанию функционального назначения, аппаратной реализации и программного обеспечения ключевого элемента КИА — устройства управления (УУ).

УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ГРУНТОЗАБОРНОГО УСТРОЙСТВА

В составе комплекса КИА для наземных отработок ГЗУ присутствует УУ. Оно является одним из элементов, обеспечивающим не только сбор и первичную обработку измерительной информации, но и непосредственное формирование управляющих воздействий на испытуемое оборудование (Хоровиц, Хилл, 2014).

Основные функциональные задачи УУ КИА ГЗУ включают:

Сбор диагностических данных с температурных датчиков: УУ обеспечивает непрерывный мониторинг температурного режима критически важных элементов испытуемого ГЗУ. Сбор информации производится с четырёх независимых температурных сенсоров.

Высокоточное аналого-цифровое преобразование (АЦП) температурных сигналов: аналоговые сигналы, поступающие от термодатчиков, преобразуются в цифровой формат для дальнейшей обработки. Требования к точности измерений обуславливают использование высокоразрядных преобразователей.

Передача измерительных данных: цифровые данные, полученные в результате АЦП, передаются на центральный управляющий микроконтроллер для дальнейшей обработки, анализа и вывода.

Управление исполнительными элементами ГЗУ посредством силовых ключей: УУ реализует функции командного управления силовыми цепями испытуемого оборудования. Это осуществляется коммутацией внешнего источника питания к нагрузке через управляемые силовые ключи. Предусмотрена возможность подачи

коротких управляющих импульсов, имитирующих команды от бортовой системы посадочного аппарата (ПА).

Вывод диагностической информации: для оперативного контроля и отладки УУ формирует и выводит диагностическую информацию. Данная информация включает текущие показания температурных датчиков и статус управляемых силовых ключей.

Реализация данных функций позволяет УУ обеспечивать полноценный контроль и частичное управление ГЗУ в ходе наземных испытаний, предоставляя оператору необходимую информацию для принятия решений и анализа работоспособности устройства (Отт, 1979).

Ключевые компоненты аппаратной платформы УУ включают:

Управляющий микроконтроллер: в качестве центрального управляющего ядра выбрана плата Iskra Mega. Данная плата, основанная на микроконтроллере семейства AVR, обеспечивает достаточную вычислительную мощность, объём памяти и набор периферийных интерфейсов (включая SPI (*англ.* Serial Peripheral Interface) и UART (*англ.* Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)) для реализации всех программных алгоритмов УУ.

Модуль аналого-цифрового преобразования (ADS1220): для прецизионного измерения температурных сигналов с датчиков интегрирован четырёхканальный 24-битный модуль АЦП ADS1220. Выбор данного АЦП обусловлен его высокой точностью (24 бита) и низким уровнем шума (Texas Instruments. Designing With Logic. SDYA009C, June 1997).

Переходная плата для АЦП и микроконтроллера Iskra Mega: для обеспечения надёжного и удобного подключения АЦП ADS1220 к плате Iskra Mega, а также для подключения температурных датчиков, была разработана специализированная переходная плата (рис. 1). Эта плата обеспечивает физическое и электрическое сопряжение между модулем АЦП и микроконтроллером, а также содержит разъёмы для подключения внешних термодатчиков.

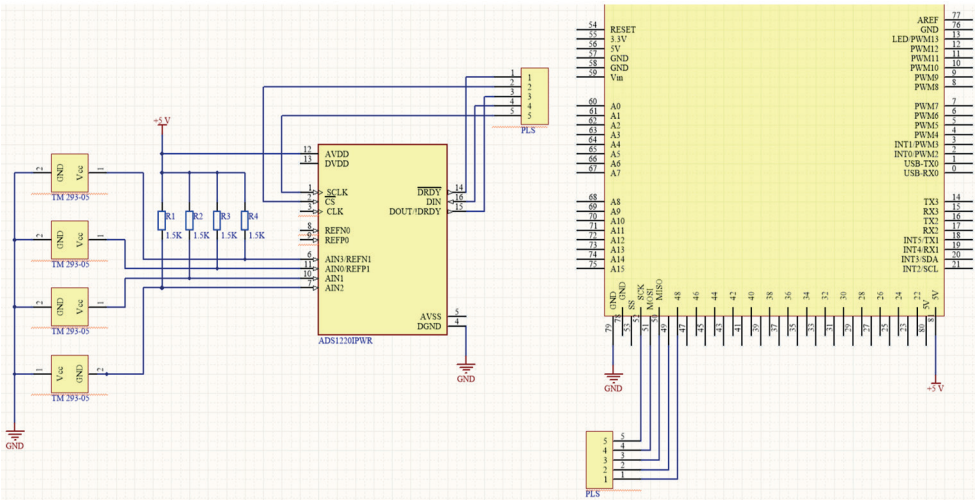


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема переходной платы для АЦП

Модуль силовых ключей (*n*-канальные MOSFET-транзисторы (*англ.* metal-oxide-semiconductor field-effect) на плате Slot Shield): для коммутации внешнего источника питания к нагрузке (исполнительным элементам ГЗУ) используются два

n-канальных MOSFET-транзистора. Управление MOSFET-транзисторами осуществляется с микроконтроллера Iskra Mega через плату Slot Shield.

Интерфейс связи с ПК (USB-UART конвертер (*англ.* Universal Serial Bus)): для взаимодействия УУ с внешним персональным компьютером (ПК) используется USB-UART конвертер. Данный модуль преобразует последовательный интерфейс UART микроконтроллера в стандартный USB-интерфейс.

В целях обеспечения компактности, надёжности соединения и удобства монтажа была разработана специализированная переходная плата, предназначенная для непосредственного подключения 4-канального модуля АЦП ADS1220 к плате Iskra Mega.

Плата спроектирована для обеспечения эффективного и точного измерения аналоговых сигналов с четырёх каналов температурных датчиков. Основные особенности схемы включают:

Интерфейс SPI: ключевые линии SPI (*англ.* Serial Peripheral Interface) (MOSI, MISO (*англ.* Master In Slave Out), SCK (*англ.* Serial Clock), CS (*англ.* Chip Select)) непосредственно соединены с соответствующими выводами микроконтроллера Iskra Mega, что обеспечивает высокоскоростной обмен данными между АЦП ADS1220 и управляющим контроллером.

Четырёхканальное измерение: плата поддерживает подключение четырёх независимых температурных датчиков. Каждый канал имеет свой вход на АЦП.

Резистивный делитель: для каждого из четырёх каналов измерения температуры, подключённых к АЦП, предусмотрено использование резистивного делителя напряжения.

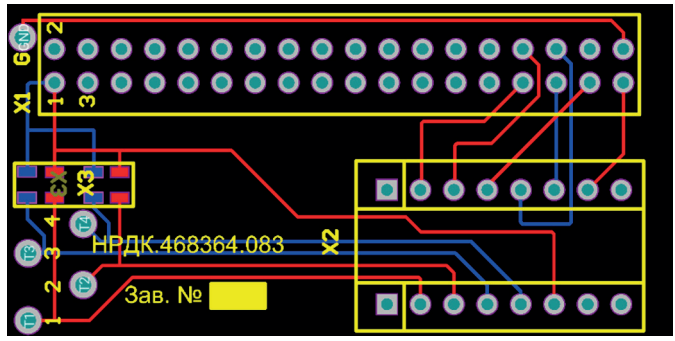


Рис. 2. Трассировка печатной платы для АЦП

Программное обеспечение устройства управления (прошивка микроконтроллера) является неотъемлемой частью функционала УУ, оно разработано в среде Arduino IDE. Выбор данной среды обусловлен её простотой, наличием обширной библиотеки функций и возможностью быстрого прототипирования. Прошивка реализует логику сбора данных, управления силовыми ключами и обмена информацией с ПК.

Ключевые аспекты программного обеспечения включают:

Инициализация периферийных устройств: на этапе запуска микроконтроллера производится настройка всех задействованных периферийных модулей. Это включает инициализацию интерфейса SPI для взаимодействия с АЦП ADS1220, конфигурирование последовательного порта UART для обмена данными с ПК, а также настройку выводов общего назначения для управления силовыми ключами.

Взаимодействие с АЦП (ADS1220): прошивка реализует протокол обмена данными по SPI для считывания значений с четырёх каналов АЦП. Обработка преры-

ваний по готовности данных с АЦП обеспечивает эффективное и своевременное получение измерительной информации.

Управление силовыми ключами: программное обеспечение обрабатывает команды, поступающие с ПК через последовательный порт, для управления двумя *n*-канальными MOSFET-транзисторами. Реализован функционал подачи короткого управляющего импульса напряжением 27 В длительностью 100 мс от внешнего источника питания, что имитирует команды от посадочного аппарата для проверки исполнительных механизмов ГЗУ.

Формирование и вывод диагностической информации: для мониторинга состояния УУ и ГЗУ прошивка осуществляет периодический сбор данных (температурных датчиков, текущий статус силовых ключей) и формирует их в виде структурированного текстового пакета. Этот пакет выводится через отладочный последовательный порт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной научно-исследовательской работы была успешно выполнена задача по проектированию и разработке устройства управления контрольно-измерительной аппаратуры для грунтозаборного устройства посадочного космического аппарата «Луна-Ресурс-1». Достигнутые результаты имеют как научную, так и практическую значимость для развития российской лунной программы.

Проведён анализ требований и архитектуры ГЗУ. Детально изучено назначение, общие технические требования и модульная архитектура грунтозаборного устройства, включая его механические, электрические и электронные подсистемы. Особое внимание уделено интерфейсам взаимодействия ГЗУ с бортовыми системами космического аппарата, что позволило определить круг параметров, подлежащих контролю и имитации.

Детально изучены и проанализированы требования к комплексу контрольно-измерительной аппаратуры ГЗУ. Определены назначение и состав КИА, проанализирована её роль в автономных и комплексных испытаниях ГЗУ. Особое внимание уделено метрологическому обеспечению КИА, гарантирующему точность и достоверность результатов испытаний.

Разработано устройство управления КИА ГЗУ. Спроектирована и реализована аппаратная платформа УУ на базе отечественной платы Iskra Mega, 24-битного АЦП ADS1220 и силовых MOSFET-ключей. Разработана специализированная переходная плата для АЦП, обеспечивающая надёжное подключение четырёх температурных датчиков через резистивные делители. Создана прошивка микроконтроллера в среде Arduino IDE, реализующая функции сбора высокоточных данных с температурных датчиков, формирования управляющих импульсов для силовых включения (имитация команд 27 В длительностью 100 мс) и вывода диагностической информации на персональный компьютер.

ЛИТЕРАТУРА

Хоровиц П., *Хилл У.* Искусство схемотехники. 7-е изд. М.: Мир, 2014. 706 с.
Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. М.: Мир, 1979. 318 с.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A CONTROL DEVICE FOR THE CONTROL AND MEASURING EQUIPMENT OF A SOIL SAMPLING DEVICE

E. O. Tarasov [1,2], ***I. G. Mitrofanov*** [1], ***M. I. Mokrousov*** [1], ***A. A. Anikin*** [1]

[1] **Space Research Institute RAS, Moscow, Russia**
[2] **National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia**

This paper presents a comprehensive review and analysis of the requirements for the ground intake device (GZU) of the Luna-Resurs-1 landing spacecraft, elucidating its purpose, key technical requirements, and architectural design. Furthermore, the control and measuring equipment (CME) complex for the GZU, including its composition, tactical and technical requirements, and metrological support for ground-based testing, is thoroughly examined. Particular emphasis is placed on the development of the GZU CME Control Unit (CU). Its functional purpose, as well as its hardware platform, which is based on the Iskra Mega board, an ADS1220 24-bit analog-to-digital converter, and power MOSFET switches, are described. The development of a specialized adapter board for the analog-to-digital converter, which facilitates the connection of temperature sensors via resistive dividers, is also elaborated upon. Finally, the CU software architecture is detailed, encompassing functionalities such as data acquisition from temperature sensors, analog-to-digital conversion, control of power switches, and the output of diagnostic information.

Keywords: Soil Sampling Device, Control and Measurement Equipment, Control Device, Luna-Resource-1

Tarasov Egor Olegovich — student, laboratory assistant, tarasovf2018@yandex.ru
Mitrofanov Igor Georgievich — head of department, doctor of physical and mathematical sciences
Mokrousov Maxim Igorevich — head of laboratory, candidate of physical and mathematical sciences
Anikin Artem Alexandrovich — engineer

УДК 524.387-423.4 DOI: 10.21046/KMU-2025-344-351

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСПЫШКИ 2021 ГОДА ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ 4U 1543-47

А. О. Хадарцев

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия

Проведено моделирование кривой темпа аккреции вспышки 2021 г. маломассивной рентгеновской двойной 4U 1543–47. Определены значения параметров вязкости α и облучения C_{irr}. Анализ показал, что наилучшее соответствие наблюдательным данным достигается при разделении кривой аккреции на сверх- и субэддингтоновские участки. Для субэддингтоновского участка получены значения $\alpha \approx 0{,}27$ и $C_{irr} \approx 0{,}0025$. Для сверхэддингтоновского участка точное определение параметров затруднено из-за возможного влияния геометрической фокусировки излучения и изменения режима аккреции.

Ключевые слова: рентгеновские двойные, аккреционный диск, темп аккреции, параметр вязкости, облучение диска.

ИСТОЧНИК

Маломассивная рентгеновская двойная 4U 1543-47 (IL Lup) состоит из двух компонентов: чёрной дыры массой $9{,}4 \pm 1{,}0 M_\odot$ и звезды-компаньона — звезды спектрального класса A2V массой $2{,}45 \pm 0{,}15 M_\odot$. С момента открытия (в 1971 г.) система претерпела пять вспышек (в 1971, 1984, 1992, 2002 и 2021 гг.). Вспышка 2021 г. была существенно более яркой, чем предыдущие, достигнув интенсивности 11 Crab в рентгеновском диапазоне 2–4 кэВ по измерениям MAXI/GSC (Negoro et al., 2021), а в диапазоне 2–10 кэВ в пике MAXI (*англ.* Monitor of All-sky X-ray Image/Gas Slit Camera) зарегистрировал поток 8,2 Crab (Matsuoka et al., 2009) (рис. 1). Наблюдения проводились также с помощью X-ray Telescope (XRT) космического аппарата Swift (Gehrels et al., 2004) и телескопа NICER (*англ.* Neutron star Interior Composition Explorer) (Gendreau et al., 2016).

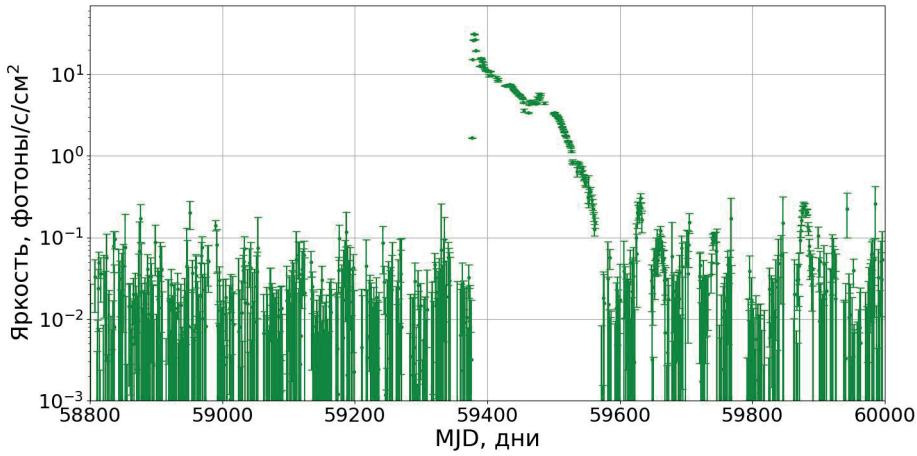


Рис. 1. Кривая блеска MAXI 4U 1543-47

Хадарцев Арсений Олегович — студент физического факультета,
khadartcev.ao19@physics.msu.ru

МОДЕЛЬ

В настоящей работе моделирование вспышки проводится в рамках модели неустойчивости диска DIM (*англ.* Disc Instability Model, см., напр., (Dubus et al., 2001; Lasota, 2001)). В рамках модели DIM рассматривается диск Шакуры – Сюняева (Shakura., Sunyaev, 1973) — геометрически тонкий, обладающий локальным термодинамическим равновесием и характеризующийся вязкой диссипацией энергии; DIM основана на предположении, что часть колец аккреционного диска может находиться в двух различных тепловых состояниях: горячем ионизированном и холодном нейтральном в зависимости от температуры вещества вблизи плоскости симметрии диска. Переходы между этими состояниями вызывают неустойчивости, которые приводят к наблюдаемым вспышкам.

ХОД ВСПЫШКИ В ДИСКЕ В ДВОЙНОЙ СИСТЕМЕ

Пусть в некоторый момент времени накопилась масса, медленно перетекавшая с другого компонента двойной системы. В некоторой точке поверхностная плотность становится выше критической, возникает неустойчивость, и существенная часть диска переходит в горячее состояние. Вещество быстрее движется по радиусу, и начинается вспышка из-за увеличенного темпа аккреции на чёрной дыре. Если в горячем состоянии оказался весь диск, внешний радиус которого ограничен приливами в двойной системе, спад темпа аккреции сначала идёт по степенному закону, при котором внешний радиус диска остаётся постоянным. Согласно аналитическому решению уравнения вязкой диффузии для аккреционного диска с фиксированным внешним радиусом, темп аккреции снижается по закону: $\dot{M} \propto t^{-10/3}$ (Lipunova, Shakura, 2000).

Из анализа вспышки 2021 г. 4U 1543-47 можно сделать вероятное заключение: в субэддингтоновском режиме спад темпа аккреции сначала идёт по степенному закону, при котором внешний радиус диска остаётся постоянным (рис. 2). Однако, как видно из наблюдательных данных, в дальнейшем кривая темпа аккреции отклоняется от указанной зависимости и демонстрирует более быстрое падение. Такой переход может быть связан с началом сужения горячей зоны (Hameury, 2020).

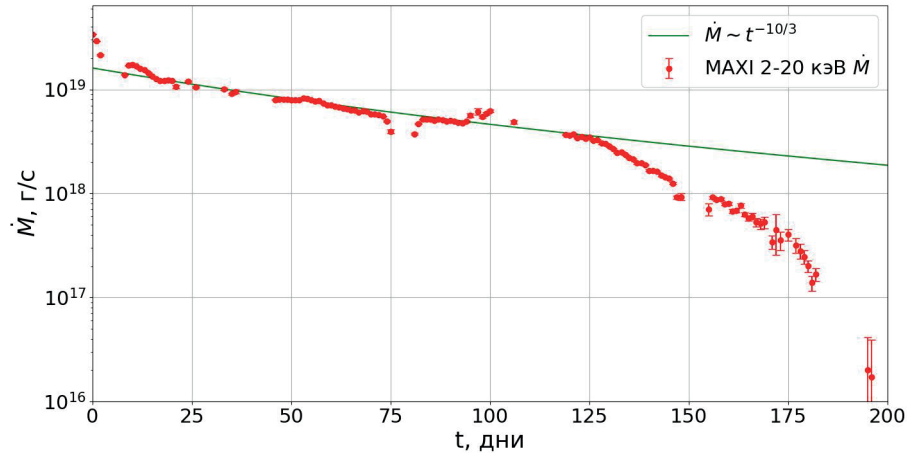


Рис. 2. Иллюстрация изменения темпа спада кривой блеска 4U 1543-47. Кривая блеска MAXI, начиная с пика вспышки, и закон изменения темпа аккреции $\dot{M} \propto t^{-10/3}$

При снижении темпа аккреции начинается рекомбинация водорода во внешних частях диска, и внешние кольца переходят в холодное состояние. Это приводит к тому, что аккреция во внешних слоях практически прекращается и эффективный внешний радиус горячей зоны начинает уменьшаться, поскольку граница между ионизированной и нейтральной зоной перемещается к центру. В горячей зоне вещество полностью ионизировано, и параметр α остаётся высоким, в холодной зоне водород рекомбинирует, и параметр α существенно падает (Hameury et al., 1998). Происходит ускорение спада темпа аккреции, так как зона с большим значением α уменьшается в радиусе (см., напр., (Hameury, 2020)). При высоком параметре облучения C_{irr} внешние части диска получают больше энергии, поддерживая их температуру выше порога ионизации водорода. При низком C_{irr} нагрев внешних частей диска слабее, из-за чего они быстрее охлаждаются до температуры, меньшей температуры порога ионизации. Таким образом, при более низких значениях параметра облучения холодный фронт рекомбинации распространяется внутрь диска быстрее.

МЕТОД ПОИСКА ПАРАМЕТРОВ ДИСКА

Для определения параметров аккреционного диска (параметра вязкости α и параметра облучения C_{irr}) была разработана программа на языке Python, которая автоматизирует процесс подбора параметров для пакета FREDDI (*англ.* Fast Rise Exponential Decay: accretion Disk model Implementation) (Lipunova, Malanchev, 2017). Программа реализует метод Левенберга – Марквардта, направленный на минимизацию расхождений между кривой темпа аккреции модели FREDDI и кривой темпа аккреции, полученной путём спектрального моделирования данных рентгеновской обсерватории Insight-HXMT (*англ.* Hard X-ray Modulation Telescope) (Jin et al. 2024).

РАЗДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ НА ДВА УЧАСТКА

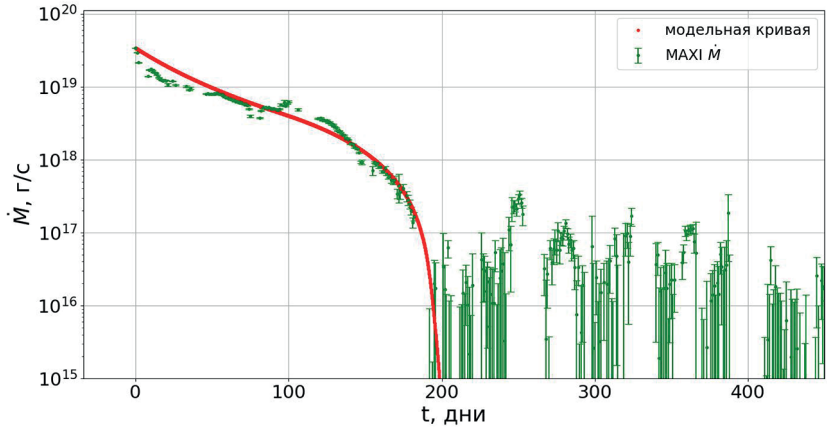


Рис. 3. Результаты моделирования всей кривой с помощью одной модели без ветра и кривая темпа аккреции, рассчитанная по данным MAXI. Параметры: $\alpha = 0{,}81 \pm 0{,}04$; $C_{irr} = 0{,}017$

Попытка смоделировать всю кривую темпа аккреции целиком, начиная с пика, не привела к желаемому результату (рис. 3). Вне зависимости от положения за-

вала приведённый χ2 (статистический критерий, используемый для определения соответствия между наблюдаемыми и ожидаемыми данными) при моделировании всей кривой оказался существенно выше, чем при раздельном моделировании субэддингтоновской и сверхэддингтоновской части, из чего был сделан вывод о том, что единая модель не может одновременно корректно описать оба режима аккреции.

На изменение характера эволюции приблизительно в момент перехода от сверхэддингтоновской к субэддингтоновской части кривой уже обращали внимание ранее (Jin et al. 2024). Авторы указывают на изменение ряда спектральных параметров около 20-го дня после пика вспышки, или MJD 59400.

ПЕРВИЧНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХ УЧАСТКОВ КРИВОЙ И ОЦЕНКА C_{IRR}

На графиках рис. 4 представлены результаты первичного моделирования для каждого из этих участков: эволюция темпа аккреции и внешнего радиуса горячей зоны диска.

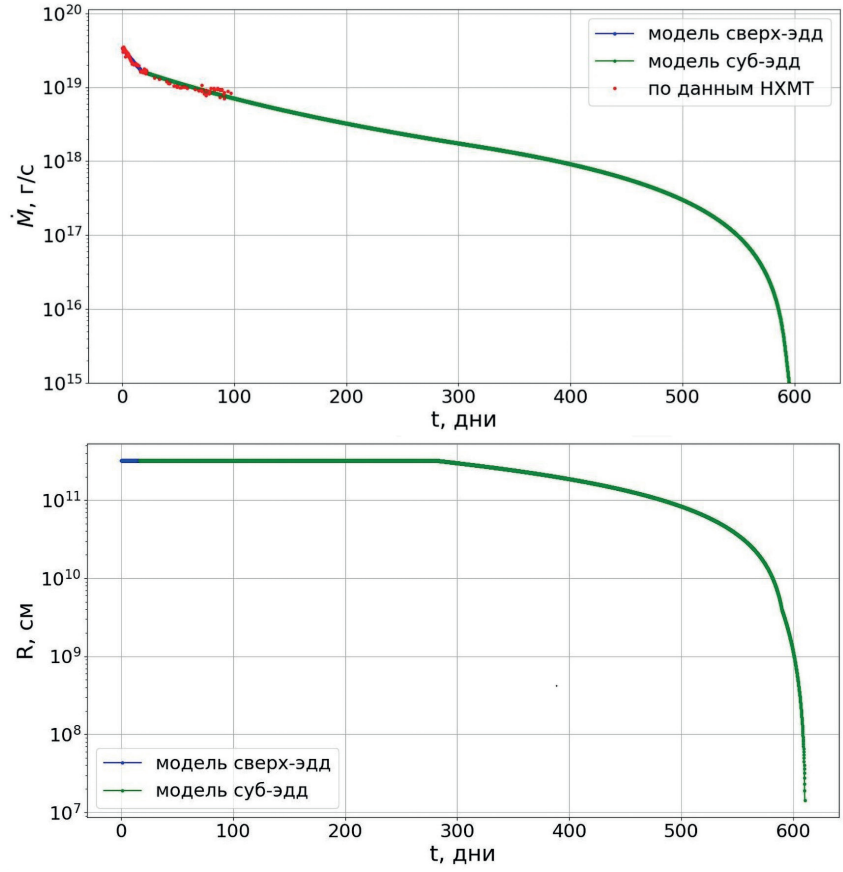


Рис. 4. Результаты моделирования кривой с помощью двух моделей: темп аккреции (*сверху*); эволюция внешнего радиуса горячей зоны диска (*снизу*). Параметры для модели сверхэддингтоновского участка кривой: $\alpha = 1{,}36$; $C_{irr} = 0{,}0036$. Параметры для модели субэддингтоновского участка кривой: $\alpha = 0{,}316$; $C_{irr} = 0{,}049$

Для оценки достоверности полученных результатов модельные кривые сравнивались с кривой темпа аккреции, полученной по данным MAXI, поскольку эти данные охватывают более широкий временной диапазон по сравнению с данными НХМТ (рис. 5).

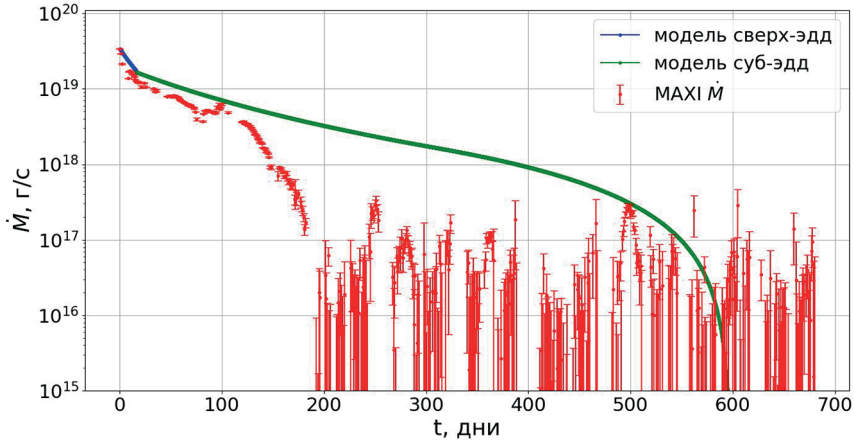


Рис. 5. Результаты моделирования с помощью двух моделей (таких же, как на рис. 4) и кривая темпа аккреции, рассчитанная по данным MAXI

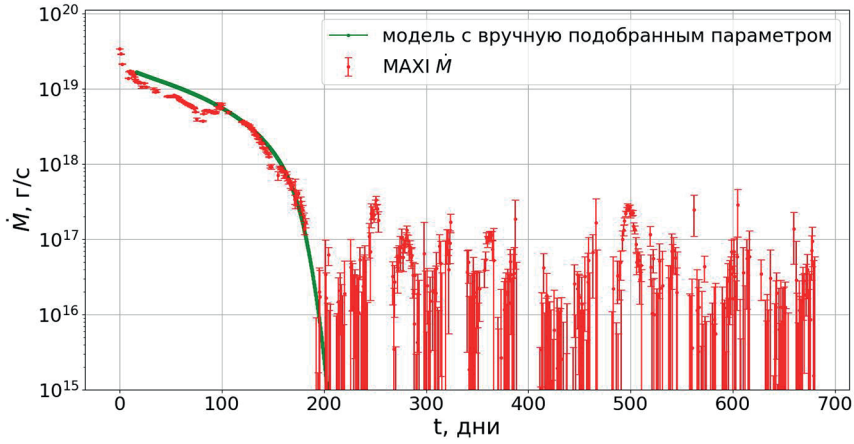


Рис. 6. Результат модели субэддингтоновской части кривой с подобранным параметром облучения $C_{irr} = 0{,}0033$ и кривая темпа аккреции, рассчитанная по данным MAXI

Из сравнения заметно несоответствие в области «завала» кривой на рис. 5 — временного интервала после начала вспышки, на котором наблюдается резкое падение темпа аккреции. Завал, полученный в результате моделирования кривой, происходит на более позднем времени с начала вспышки, чем завал кривой, полученной из светимости MAXI в диапазоне 2–20 кэВ. Такое несоответствие может свидетельствовать о завышенной оценке параметра облучения: при более высоких его значениях уменьшение темпа аккреции происходит более медленно, так как самооблучение поддерживает высокую температуру во внешних областях диска. Поэтому для получения более правдоподобных результатов был проведён подбор

значения параметра облучения для субэддингтоновской части кривой по кривой MAXI. В ходе этого подбора значение параметра α не менялось и было принято равным значению, полученному в результате моделирования субэддингтоновской части кривой HXMT. Значение параметра облучения варьировалось вручную до достижения совпадения времени завала кривой темпа аккреции модели с соответствующим временем для кривой 2–20 кэВ из данных MAXI. В результате ручного подбора было установлено, что правдоподобное значение параметра облучения существенно ниже, чем то, которое было получено в ходе первоначального моделирования: $C_{irr} = 0{,}0033$ (рис. 6).

ФИНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для нахождения правдоподобной комбинации α и C_{irr} был проведена ещё одна итерация моделирования с поочередной фиксацией параметров. Сравнение результирующей модели с данными MAXI представлено на рис. 7, на котором видно, что завал в данных MAXI и моделях совпадает.

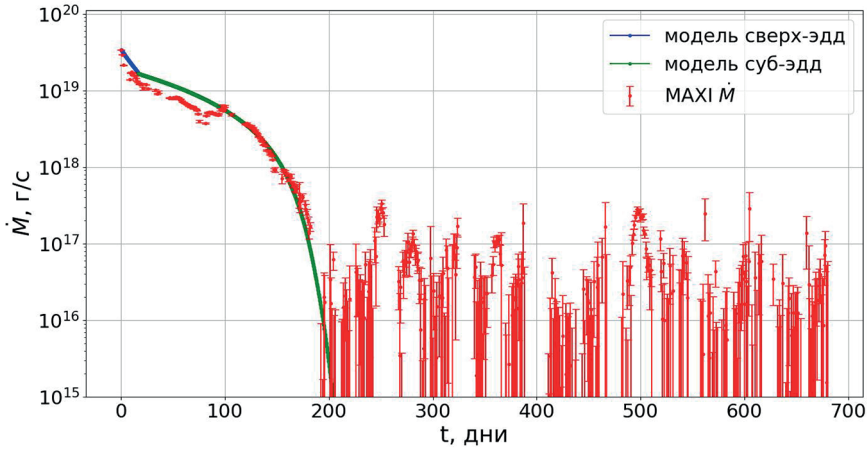


Рис. 7. Результаты финального моделирования кривой с помощью двух моделей и кривая темпа аккреции, рассчитанная по данным MAXI. Параметры для модели сверхэддингтоновского участка кривой: $\alpha = 1{,}36$; $C_{irr} = 0{,}0036$. Параметры для модели субэддингтоновского участка кривой: $\alpha = 0{,}270 \pm 0{,}009$; $C_{irr} = 0{,}002546 \pm 1{,}4 \cdot 10^{-5}$

На рис. 8 представлены зависимости темпа аккреции и внешнего радиуса горячей области диска от времени.

Как можно видеть, данные, полученные в ходе финального моделирования, хорошо согласуются с наблюдательным точками.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для субэддингтоновского участка получены значения: $\alpha \approx 0{,}27$ и $C_{irr} \approx 0{,}0025$. Для сверхэддингтоновского участка вид кривой блеска, как и наблюдения в радиодиапазоне, говорят о существенно отличном режиме аккреции и/или об усилении наблюдаемого потока из-за геометрической фокусировки излучения ветром, и, таким образом, значения α и C_{irr} не могут считаться надёжными.

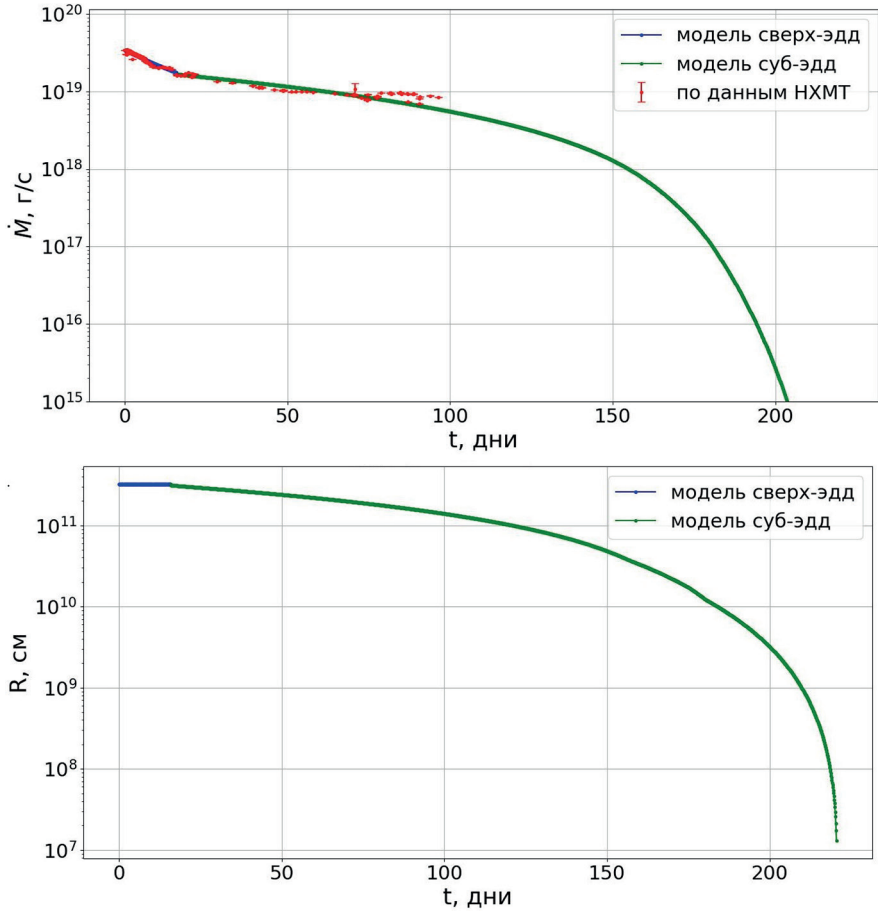


Рис. 8. Результаты финального моделирования кривой с помощью двух моделей: темп аккреции (*сверху*); эволюция внешнего радиуса горячей зоны диска (*снизу*). Параметры для модели сверхэддингтоновского участка кривой: $\alpha = 1{,}36$; $C_{irr} = 0{,}0036$. Параметры для модели субэддингтоновского участка кривой: $\alpha = 0{,}270 \pm 0{,}009$; $C_{irr} = 0{,}002546 \pm 1{,}4 \cdot 10^{-5}$

ЛИТЕРАТУРА

Dubus G., *Hameury J. M.*, *Lasota J. P.* The disc instability model for X-ray transients: Evidence for truncation and irradiation // Astronomy and Astrophysics. 2001. V. 373. P. 251–271. DOI: 10.1051/0004-6361:20010632.

Gendreau K. C., *Arzoumanian Z.*, *Adkins Ph. W. et al.* The Neutron star Interior Composition Explorer (NICER): design and development // Proc. SPIE. 2016. V. 9905. Article 99051H. DOI: 10.1117/12.2231304.

Hameury J.-M. A review of the disc instability model for dwarf novae, soft X-ray transients and related objects // Advances in Space Research. 2020. V. 66(5). P. 1004–1024. DOI: 10.1016/j.asr.2019. 10.022.

Hameury J.-M., *Menou K.*, *Dubus G. et al.* Accretion disc outbursts: a new version of an old model // Monthly notices of the Royal Astronomical Soc. 1998. V. 298(4). P. 1048–1060. DOI: 10.1046/j.1365-8711.1998.01773.x.

Jin P., *Zhang G.*, *Zhang Y. et al.* The bright black hole X-ray binary 4U 1543-47 during 2021 outburst. A clear state transition from super-Eddington to sub-Eddington accretion revealed by Insight-HXMT // Monthly notices of the Royal Astronomical Soc. 2024. V. 530(1). P. 929–946.

Lasota J.-P. The disc instability model of dwarf novae and lowmass X-ray binary transients // New Astronomy Reviews. 2001. V. 45. Iss. 7. P. 449–508. DOI: 10.1016/S1387-6473(01)00112-9.

Lipunova G. V., *Malanchev K. L.* Determination of the turbulent parameter in accretion discs: effects of self-irradiation in 4U 1543-47 during the 2002 outburst // Monthly notices of the Royal Astronomical Soc. 2017. V. 468(4). P. 4735–4747. DOI: 10.1093/mnras/stx768.

Lipunova G. V., *Shakura N. I.* New solution to viscous evolution of accretion disks in binary systems // Astronomy and Astrophysics. 2000. V. 356. P. 363–372. DOI: 10.48550/arXiv.astro-ph/0103274.

Matsuoka M., *Kawasaki K.*, *Ueno S. et al.* The MAXI Mission on the ISS: Science and Instruments for Monitoring All-Sky X-Ray Images // Publ. Astronomical Soc. Japan. 2009. DOI: 10.1093/pasj/61.5.999.

Negoro H., *Nakajima M.*, *Kobayashi K. et al.* MAXI/GSC observations: the black hole X-ray nova 4U 1543-47 is reaching the Eddington luminosity // The Astronomer's Telegram. 2021. No. 14708.

Shakura N. I., *Sunyaev R. A.* Black holes in binary systems. Observational appearance // Astronomy and Astrophysics. 1973. V. 24. P. 337–355.

MODELING OF THE 2021 OUTBURST OF THE BINARY SYSTEM 4U 1543–47

A. O. Khadartsev

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

We modeled the accretion rate light curve of the 2021 outburst of the low-mass X-ray binary 4U 1543–47 and determined the values of the viscosity parameter α and the irradiation parameter C_{irr}. The analysis showed that the best agreement with observational data is achieved when the accretion curve is divided into super-Eddington and sub-Eddington segments. For the sub-Eddington segment, values of $\alpha \approx 0.27$ and $C_{irr} \approx 0.0025$ were obtained. For the super-Eddington segment, accurate determination of the parameters is complicated due to possible effects of geometric focusing of radiation and changes in the accretion regime.

Keywords: X-ray binaries, accretion disk, accretion rate, viscosity parameter, disk irradiation

Khadartsev Arseniy Olegovich — student, khadartcev.ao19@physics.msu.ru

УДК 621.371.01 DOI: 10.21046/KMU-2025-352-361

О ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СВЕРХКОРОТКОГО РАДИОИМПУЛЬСА ГИГАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА, ДЕФОРМИРОВАННОГО ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПО МЕЖПЛАНЕТНОЙ ТРАССЕ

Ю. С. Худышев

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Россия

Приведены результаты анализа возможности восстановления исходной формы сверхкоротких радиоимпульсов с различными начальными характеристиками, распространяющихся по межпланетной трассе, по данным об их амплитудном и фазовом спектрах и фазовом набеге частотных гармоник на трассе. Показано, что применение преобразования Фурье позволяет достаточно достоверно восстанавливать исходную форму импульсов при значениях интегральной электронной концентрации трассы TEC(*англ.* total electron content), характерных для межпланетных расстояний. Рассмотрена возможность восстановления исходной формы импульсов при отсутствии информации о значениях TEC.

Ключевые слова: межпланетная плазма, сверхкороткий радиоимпульс, фазовый спектр, фазовый набег, дисперсионные искажения, восстановление формы

ВВЕДЕНИЕ

При распространении в межпланетной плазме электромагнитные импульсы претерпевают дисперсионные искажения, уровень и особенности которых определяются их начальными характеристиками и протяжённостью трассы. Влияние среды может приводить к значительным различиям временного хода напряжённости поля излучаемого импульса и напряжённости поля, регистрируемой на приёмном конце трассы. В бесстолкновительной межпланетной плазме деформация радиоимпульсов с возрастанием интегральной электронной концентрации трассы TEC (*англ.* total electron content) обусловлена только изменением их фазового спектра под воздействием среды, проявляющимся в возникновении фазового набега частотных гармоник, формирующих импульс, при неизменном амплитудном спектре из-за отсутствия поглощения в среде.

Ранее в работе (Худышев, 2023) были получены результаты анализа деформации сверхкоротких радиоимпульсов с различными начальными характеристиками в бесстолкновительной межпланетной плазме по данным об их амплитудном и фазовом спектрах с учётом фазового набега. При этом из-за значительной деформации импульсов также представляет интерес задача восстановления их исходной формы в условиях ограниченной информации по данным об их характеристиках и параметрах среды распространения, что и является целью настоящей работы.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧАЕМЫХ ИМПУЛЬСОВ

Рассмотрим радиоимпульсы трёх видов:
синусоидальный импульс с напряжённостью поля E_1,

$$E_1(0;t) = E_{01}\sin(\omega' t), \quad 0 \leqslant t \leqslant t_{\text{и}}; \tag{1}$$

импульс с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) с напряжённостью поля E_2,

Худышев Юрий Сергеевич — младший научный сотрудник, xantaresx@yandex.ru

$$E_2(0;t) = E_{02}\sin\left(\omega' t + \Delta\omega(t^2 - t t_{\text{и}})/t_{\text{и}}\right), \quad 0 \leqslant t \leqslant t_{\text{и}} \tag{2}$$

и хаотический импульс, описываемый дифференциальным уравнением зашумлённого квазигармонического осциллятора Ван-дер-Поля с напряжённостью поля E_3 (Анищенко, Вадивасова, 2011),

$$\ddot{E}_3 + (\omega')^2 E_3 = (\omega')\cdot(\varepsilon - E_3^2)\dot{E}_3 + (\omega')^2\sqrt{2D}\cdot\xi(t), \quad 0 \leqslant t \leqslant t_{\text{и}}. \tag{3}$$

Здесь t — время; $t_{\text{и}}$ — длительность импульса; $\omega' = 2\pi f'$, f' — несущая частота, $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$, Δf — максимальное отклонение от несущей (девиация частоты); E_{01} и E_{02} — «высота» синусоидального и ЛЧМ-импульса соответственно; $\xi(t)$ — нормированный гауссовский белый шум; D — интенсивность нормированного гауссовского белого шума; ε — параметр, характеризующий уровень квазигармоничности колебаний.

На рис. 1*а*, *г*, *ж* приведены примеры временного изменения напряжённости поля $E(0; t)$, на рис. 1*б*, *д*, *и* — амплитудные, а на рис. 1*в*, *е*, *к* — фазовые спектры излучаемых импульсов равной энергии $W_{\text{и}}$ для синусоидального, ЛЧМ и одной из реализаций хаотического импульсов, соответственно, при $f' = 2$ ГГц, $t_{\text{и}} = 10$ нс, $\Delta f = 500$ МГц, $D = 0{,}5$, $\varepsilon = 0{,}1$. Энергия, нормированная на $t_{\text{и}}$, для всех импульсов $\bar{W}_{\text{и}} = 0{,}5$.

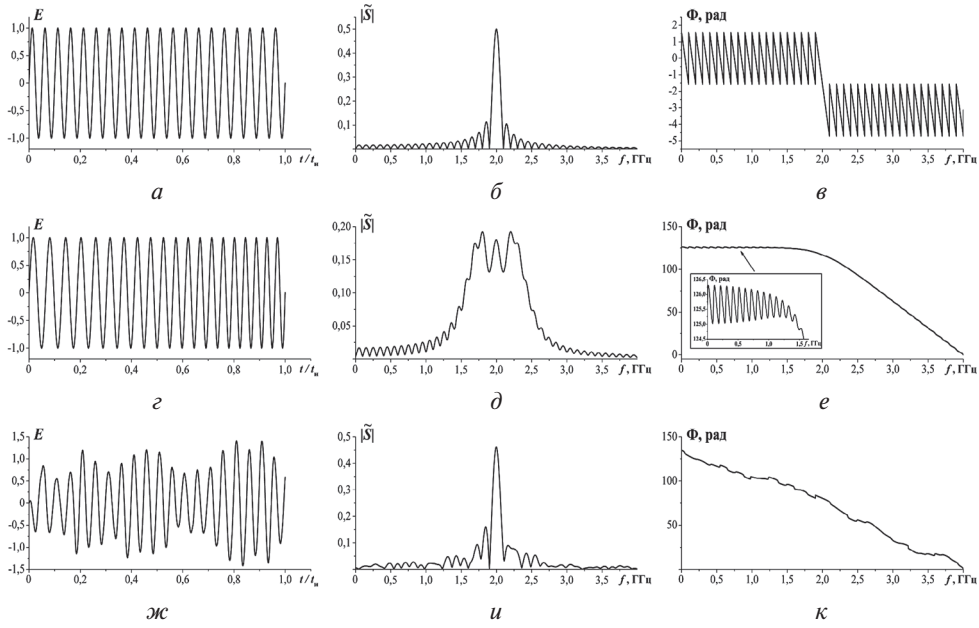


Рис. 1. Напряжённость поля (*а*, *г*, *ж*), амплитудные (*б*, *д*, *и*) и фазовые (*в*, *е*, *к*) спектры синусоидального (*а*–*в*); ЛЧМ (*г*–*е*) и хаотического (*ж*–*к*) радиоимпульсов при $f' = 2$ ГГц, $t_{\text{и}} = 10$ нс, $\Delta f = 500$ МГц, $D = 0{,}5$, $\varepsilon = 0{,}1$, $\bar{W}_{\text{и}} = 0{,}5$

АНАЛИТИЧЕСКИЕ И РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

По прохождении межпланетной трассы напряжённость поля на приёмном конце трассы описывается выражениями во временной области, являющимися решением волнового уравнения для холодной разреженной плазмы (Стрелков, 2008):

при $0 \leqslant t' \leqslant t_{и}$ —

$$E(\mathrm{TEC};t') = E(0;t') - \int_{0}^{t'} \sqrt{\frac{\delta}{\theta}} \cdot J_1\left(2\sqrt{\delta\theta}\right) \exp(-\nu_{э}\theta) E(0;t'-\theta)\, \mathrm{d}\theta \qquad (4)$$

и при $t' > t_{и}$ —

$$E(\mathrm{TEC};t') = -\int_{t'-t_{и}}^{t'} \sqrt{\frac{\delta}{\theta}} \cdot J_1\left(2\sqrt{\delta\theta}\right) \exp(-\nu_{э}\theta) E(0;t'-\theta)\, \mathrm{d}\theta. \qquad (5)$$

В равенствах (4) и (5) зависимость $E(0;t')$ описывается формулой (1), (2), или (3) в зависимости от используемого импульса и введены обозначения: $t' = t - z/c$; z — длина трассы; c — скорость света; $\delta = \delta(z) = \int_{z} \omega_0^2(z)\, \mathrm{d}z \Big/ 2c$; $\omega_0^2 = 31{,}81 \cdot 10^8 N_e$ — квадрат плазменной частоты; N_e — электронная концентрация (в $\mathrm{см}^{-3}$); $\nu_{э}$ — эффективная частота соударений. Нетрудно видеть, что параметр δ прямо пропорционален интегральной электронной концентрации трассы $\mathrm{TEC} = \int_{z} N_e(z)\, \mathrm{d}z$ (в $\mathrm{м}^{-2}$).

Все приводимые ниже результаты по деформации радиоимпульсов во временной области получены с применением формул (4) и (5) в предположении бесстолкновительной плазмы ($\nu_{э} = 0$). Последнее означает, в частности, отсутствие поглощения в среде, так что энергия распространяющегося импульса $\bar{W}_{и}(\mathrm{TEC}) = t_{и} \int_{0}^{\infty} \left|E(\mathrm{TEC};t')\right|^2 \mathrm{d}t' = \bar{W}_{и}(0)$, остаётся неизменной. Это обеспечивает возможность дополнительного контроля результатов вычислений интегралов в формулах (4) и (5), а также адекватную оценку пределов интегрирования в формуле (5).

Наряду с описанием напряжённости поля на приёмном конце трассы во временной области, можно записать решение волнового уравнения для холодной разреженной плазмы в частотной области в виде обратного преобразования Фурье (Баскаков, 1992; Харкевич, 2009).

$$E(\mathrm{TEC};t') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left|\tilde{S}_{и}(\omega)\right| \exp\left(i\left(\Phi_{и}(\omega) + \Delta\Phi(\omega)\right)\right) \exp(i\omega t')\, \mathrm{d}\omega, \qquad (6)$$

где $\left|\tilde{S}_{и}(\omega)\right|$ и $\Phi_{и}(\omega)$ амплитудный и фазовый спектры излучаемого импульса; $\Delta\Phi(\omega)$ — фазовый набег, обусловленный влиянием среды,

$$\Delta\Phi(\omega) = -\frac{\omega}{c}\left(n(\omega) - 1\right) z = -\frac{\omega}{c}\left(n(\omega) - 1\right) \frac{\mathrm{TEC}}{10^6 N_e}, \qquad (7)$$

где $n(\omega) = \sqrt{1 - \omega_0^2 / \omega^2}$ — показатель преломления среды.

Вследствие отсутствия поглощения в среде амплитудный спектр импульса, распространяющегося по межпланетной трассе, не изменяется, т. е. $\left|\tilde{S}_{д}(\omega)\right| = \left|\tilde{S}_{и}(\omega)\right|$. При этом фазовый спектр деформированного импульса $\Phi_{д}(\omega) = \Phi_{и}(\omega) + \Delta\Phi(\omega)$, соответственно фазовый спектр излучаемого импульса можно выразить через фазовый спектр деформированного импульса — $\Phi_{и}(\omega) = \Phi_{д}(\omega) - \Delta\Phi(\omega)$. Запишем выражение для расчёта напряжённости поля восстановленного импульса:

$$E(0;t') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left|\tilde{S}_{д}(\omega)\right| \exp\left(i\left(\Phi_{д}(\omega) - \Delta\Phi(\omega)\right)\right) \exp(i\omega t')\, \mathrm{d}\omega. \qquad (8)$$

Далее в расчётах для упрощения примем $N_e = 1$ см$^{-3}$. В реальности одному и тому же значению интегральной электронной концентрации ТЕС могут соответствовать различные вариации длины трассы z и электронной концентрации на трассе N_e. Подробнее об изменении N_e на межпланетной трассе см. в публикации (Худышев, 2024).

РАСЧЁТ ФАЗОВОГО СПЕКТРА ИМПУЛЬСА

Рассмотрим основные моменты методики расчёта фазовых спектров как излучаемых, так и деформированных импульсов. Для этого используем представление о тригонометрической окружности и четырёх квадрантах плоскости (рис. 2). Фаза вычисляется по действительной и мнимой части комплексного спектра и приведена для каждого из квадрантов на n-м шаге по частоте f в пределах одного круга от 0 до 2π.

$$\text{I}:\ \operatorname{Re}\tilde{S}(f_n)>0, \operatorname{Im}\tilde{S}(f_n)>0;\ \Phi_n = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im}\tilde{S}(f_n)}{\operatorname{Re}\tilde{S}(f_n)}\right),$$

$$\text{II}:\ \operatorname{Re}\tilde{S}(f_n)<0, \operatorname{Im}\tilde{S}(f_n)>0;\ \Phi_n = \pi - \operatorname{arctg}\left(\left|\frac{\operatorname{Im}\tilde{S}(f_n)}{\operatorname{Re}\tilde{S}(f_n)}\right|\right),$$

$$\text{III}:\ \operatorname{Re}\tilde{S}(f_n)<0, \operatorname{Im}\tilde{S}(f_n)<0;\ \Phi_n = \pi + \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im}\tilde{S}(f_n)}{\operatorname{Re}\tilde{S}(f_n)}\right),$$

$$\text{IV}:\ \operatorname{Re}\tilde{S}(f_n)>0, \operatorname{Im}\tilde{S}(f_n)<0;\ \Phi_n = 2\pi - \operatorname{arctg}\left(\left|\frac{\operatorname{Im}\tilde{S}(f_n)}{\operatorname{Re}\tilde{S}(f_n)}\right|\right).$$

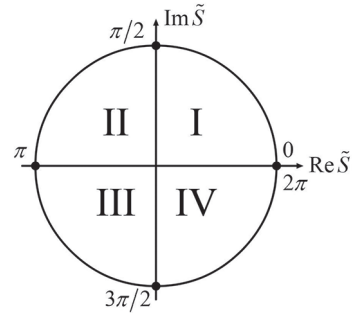


Рис. 2. Тригонометрическая окружность для расчёта фазы Φ

Также могут возникать частные случаи, при которых фаза будет равняться 0, π/2, π и 3π/2. При этом фаза не определена, когда действительная и мнимая часть комплексного спектра одновременно обращаются в нуль. При переходе фазы из 4-го в 1-й квадрант к её текущему и следующим значениям добавляется 2π, а при переходе фазы из 1-го в 4-й квадрант из её текущего и последующих значений вычитается 2π.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ НА ПРИЁМНОМ КОНЦЕ ТРАССЫ

На рис. 3–5 представлены характеристики импульсов, регистрируемых на приёмном конце трассы. Расчёт производился во временной области, так как в отличие от расчёта в частотной области он позволяет учесть все частотные гармоники, формирующие импульс. Рисунки аналогичны друг другу и различаются только рассматриваемыми импульсами (см. подписи). Каждый из них содержит три совокупности данных с увеличением ТЕС, иллюстрирующих характеристики регистрируемого импульса. Первая — изменение во времени напряжённости поля $E(\text{TEC};t')$ (см. рис. 3*а*, *г*–5*а*, *г*). Вторая — амплитудные спектры деформированных импульсов (см. рис. 3*б*, *д*–5*б*, *д*). И третья — фазовые спектры деформированных импульсов (см. рис. 3*в*, *е*–5*в*, *е*).

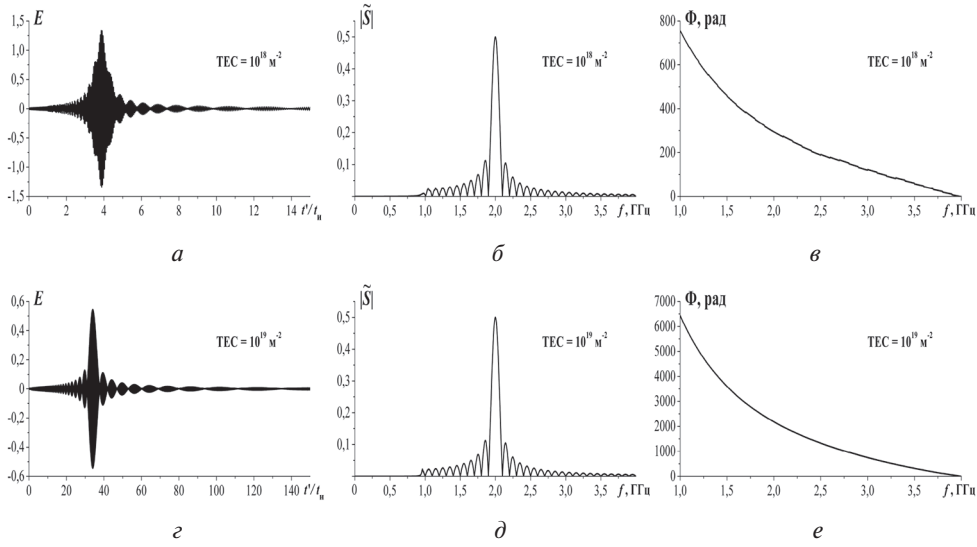


Рис. 3. Напряжённость поля (*а*, *г*), амплитудный спектр (*б*, *д*) и фазовый спектр (*в*, *е*) синусоидального радиоимпульса, изображённого на рис. 1*а*, в межпланетной плазме при $\mathrm{TEC} = 10^{18}$ м$^{-2}$ (*а* – *в*), 10^{19} м$^{-2}$ (*г* – *е*).

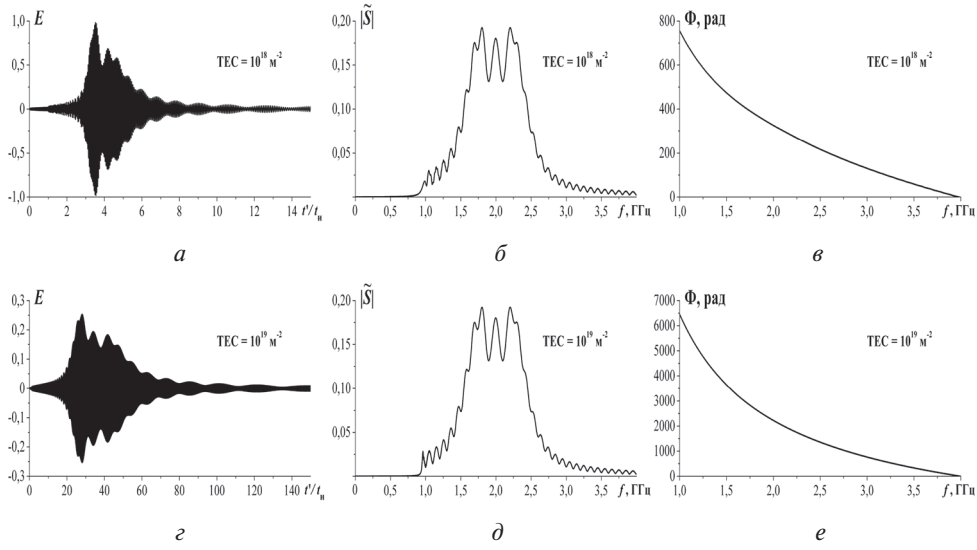


Рис. 4. То же, что и на рис. 3 для ЛЧМ радиоимпульса, изображённого на рис. 1*г*

Энергия для всех приведённых фрагментов напряжённости поля импульсов составляет более 99 % от начальной энергии соответствующих импульсов.

Временной ход напряжённости поля импульсов с ростом TEC значительно изменяется, при этом их амплитудные спектры остаются неизменными, за исключением близких к нулю областей по частоте из-за отсутствия низкочастотных гармоник в рассчитанной напряжённости поля импульсов. Можно видеть, что при $\mathrm{TEC} = 10^{18}$ м$^{-2}$ излучаемый импульс уширяется в десятки раз, а при

ТЕС = 10^{19} м$^{-2}$ — в сотни раз. На всех графиках амплитудного спектра импульсов при частотах ниже 1,0 ГГц его величины резко уменьшаются, что обусловлено отсутствием гармоник с частотами ниже 1,0 ГГц у деформированных импульсов, так как колебания с этими частотами достигают приёмного конца трассы позднее границы времени, используемой в расчёте. Соответственно, для ТЕС = 10^{18} м$^{-2}$ это $15t_и$, а для ТЕС = 10^{19} м$^{-2}$ — $150t_и$.

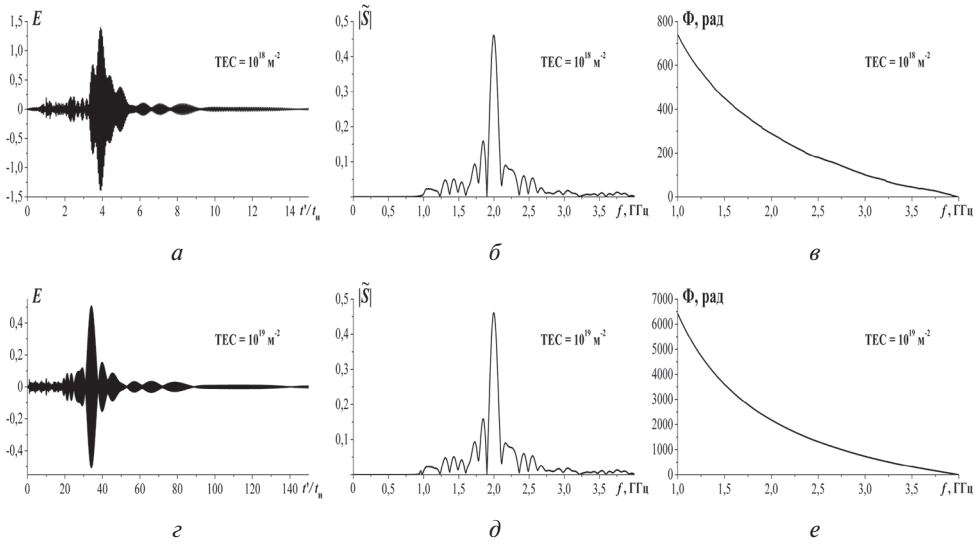


Рис. 5. То же, что и на рис. 3 для хаотического радиоимпульса, изображённого на рис. 1*ж*

По графикам фазовых спектров импульсов видно, что с увеличением ТЕС они растягиваются по вертикали в сотни и тысячи раз, при этом все детали спектров на соответствующих частотах сохраняются, а сами кривые практически монотонно убывают от низких частот к высоким. Это означает, что с ростом частоты колебаний влияние среды на них уменьшается.

Расчёт фазовых спектров деформированных импульсов проводился справа налево по частоте от 4,0 до 1,0 ГГц в соответствии со временем прихода колебаний на приёмное устройство, так как чем выше частота колебаний, тем выше скорость их распространения в межпланетной плазме и, соответственно, они первыми достигают приёмного конца трассы.

ИЗЛУЧАЕМЫЙ И ВОССТАНОВЛЕННЫЙ ИМПУЛЬСЫ

Рассмотрим результаты восстановления исходной формы деформированных импульсов с использованием формулы (8). На рис. 6 при ТЕС = 10^{18} и 10^{19} м$^{-2}$ показаны совместно напряжённость поля восстановленного (красные кривые) и излучаемого (чёрные кривые) синусоидального (*а*, *б*), ЛЧМ (*в*, *г*) и хаотического (*д*, *е*) радиоимпульсов из рис. 3*а*, *г*, 4*а*, *г* и 5*а*, *г*, соответственно. Можно видеть, что кривые излучаемого и восстановленного импульсов для всех импульсов практически совпадают. При этом энергия восстановленных импульсов составляет более 99 % от начальной энергии соответствующих импульсов.

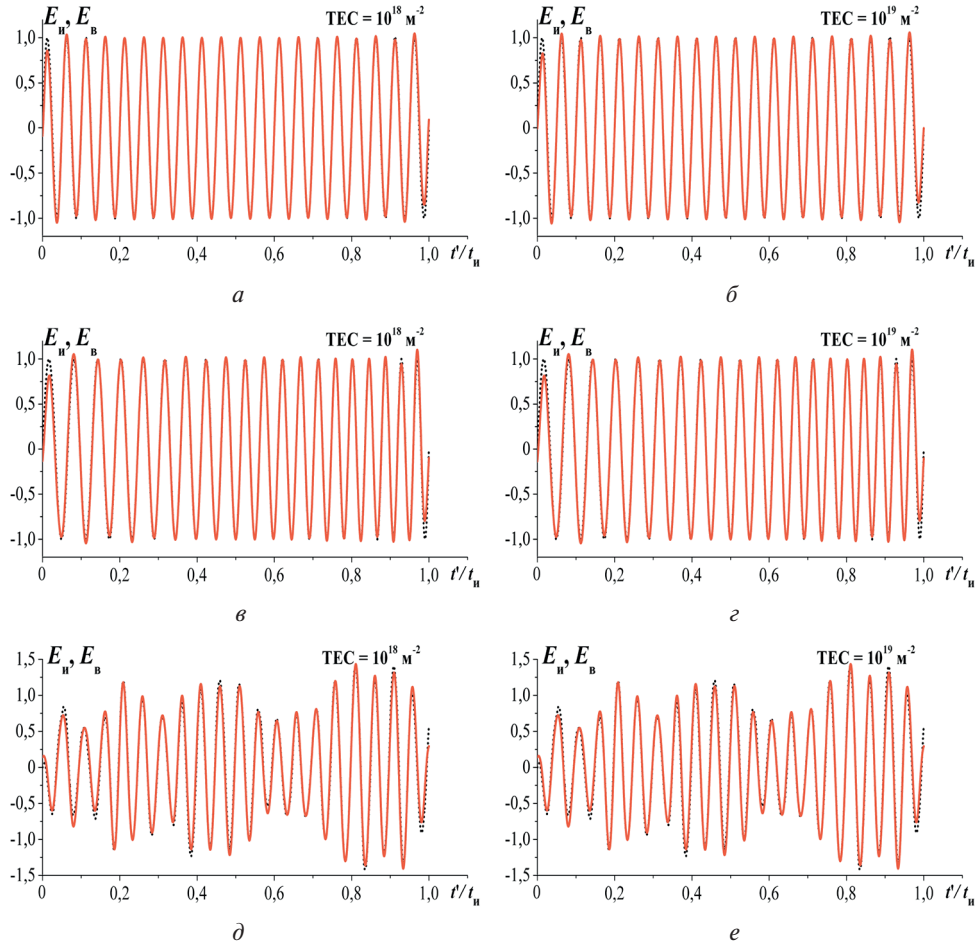


Рис. 6. Напряжённость поля восстановленного (красные кривые) и излучаемого (чёрные кривые) синусоидального (*а*, *б*), ЛЧМ (*в*, *г*) и хаотического (*д*, *е*) радиоимпульсов при TEC = 10^{18} м$^{-2}$ (*а*, *в*, *д*) и 10^{19} м$^{-2}$ (*б*, *г*, *е*)

Выше были рассмотрены результаты восстановления исходной формы импульсов при известной величине интегральной электронной концентрации трассы. Возникает вопрос о возможности восстановления исходной формы импульса без информации о значении TEC. Ранее в статье (Ефимов и др., 2012) для синусоидального импульса была получена приближенная формула расчёта TEC по мгновенной частоте колебаний напряжённости поля деформированного импульса.

$$\mathrm{TEC}_{\text{п}} = \frac{8\pi^2 c}{31{,}81\cdot 10^2} t'\nu^2, \quad t' \gg t_{\text{и}}, \tag{9}$$

где $\nu = 1/\Delta t'$ — мгновенная частота; $\Delta t'$ — расстояние по временной оси между концом и началом одного колебания. Формула применима при условии, что время колебания, для которого определяется мгновенная частота, много больше длительности импульса. На рис. 7 показано изменение $\mathrm{TEC}_{\text{п}}$ со временем для синусоидального импульса из рис. 3*г*. С увеличением времени приближенные значения $\mathrm{TEC}_{\text{п}}$ приближаются к расчётному значению TEC = 10^{19} м$^{-2}$.

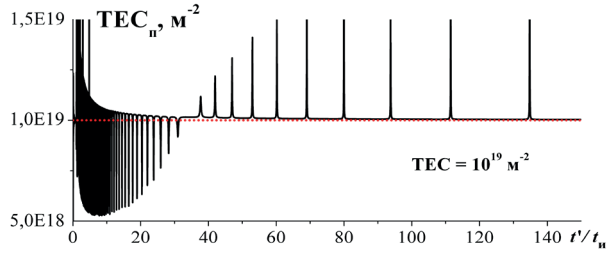
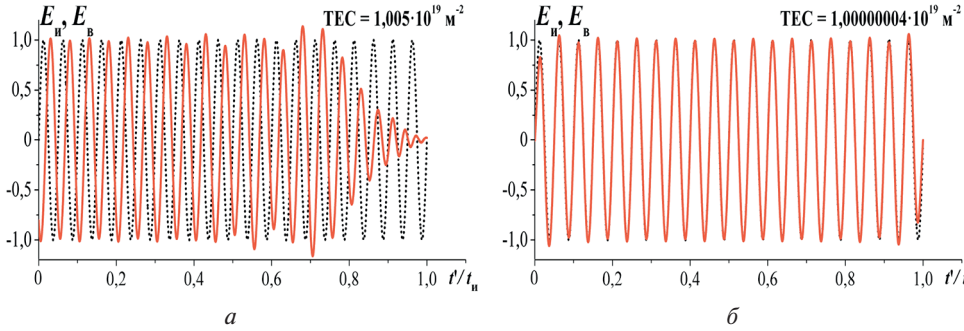


Рис. 7. Расчёт приближенного значения TEC трассы для синусоидального импульса из рис. 3*г*

На рис. 8*а* совместно с излучаемым синусоидальным импульсом (чёрная кривая) показан результат расчёта восстановленного импульса (красная кривая) при значении TEC, найденном по приближенной формуле (9) при $t' = 100t_и$, TEC = $1{,}005 \cdot 10^{19}$ м$^{-2}$. Видно, что форма восстановленного импульса значительно отличается от излучаемого, иначе, импульс не восстанавливается.



а *б*

Рис. 8. Напряжённость поля восстановленного (красные кривые) и излучаемого (чёрные кривые) синусоидального импульса из рис. 3*г* при TEC = $1{,}005 \cdot 10^{19}$ м$^{-2}$ (*а*) и $1{,}00000004 \cdot 10^{19}$ м$^{-2}$ (*б*)

Предлагается методика поиска достоверного значения TEC для восстановления исходной формы синусоидального радиоимпульса при отсутствии информации о TEC трассы. Известно, что энергия восстановленного импульса должна стремиться к энергии деформированного, а так как она не может быть больше энергии деформированного импульса, то, иначе, она должна быть максимальной. Будем определять значение TEC итерационным методом с уменьшением диапазона и шага поиска по TEC, находя по нему значение фазового набега по формуле (7), рассчитывая восстановленный импульс по формуле (8) и находя его энергию. Результатом итерационного метода является значение TEC, при котором энергия восстановленного импульса в пределах его длительности будет максимальной. В качестве начального значения TEC возьмём результат, полученный по приближенной формуле (9), TEC = $1{,}005 \cdot 10^{19}$ м$^{-2}$. Энергия деформированного импульса при этом $\bar{W}_д = 0{,}4972$. В итоге при принятых параметрах расчёта получим приближенное значение TEC = $1{,}00000004 \cdot 10^{19}$ м$^{-2}$ = ($10^{19} + 4 \cdot 10^{11}$) м$^{-2}$ и энергию восстановленного импульса $\bar{W}_д = 0{,}4949$.

Результаты восстановления при найденном значении TEC показаны на рис. 8*б* и практически не отличаются от результатов, полученных при TEC = 10^{19} м$^{-2}$, так как при добавочном TEC = $4 \cdot 10^{11}$ м$^{-2}$ излучаемый импульс практически не деформируется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена возможность восстановления исходной формы сверхкоротких радиоимпульсов с различными начальными характеристиками, распространяющихся по межпланетной трассе, по данным об их спектрах и фазовом набеге частотных гармоник на трассе. Показано, что исходную форму сверхкороткого радиоимпульса, деформированного в межпланетной плазме при известной величине ТЕС трассы можно восстановить по данным о его амплитудном и фазовом спектре с помощью обратного преобразования Фурье. Для синусоидального импульса можно приблизительно определить значение ТЕС трассы по частоте колебаний напряжённости поля. Предложенная методика поиска достоверного значения ТЕС для восстановления исходной формы сверхкороткого синусоидального радиоимпульса при отсутствии информации о ТЕС трассы позволяет восстанавливать форму импульса и определять ТЕС с высокой точностью.

Работа выполнена в рамках госзадания Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Анищенко В. С., *Вадивасова Т. Е.* Лекции по нелинейной динамике: учеб. пособие для вузов. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. 516 с.

Баскаков С. И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высш. шк., 1992. 416 с.

Ефимов А. И., *Самознаев Л. Н.*, *Стрелков Г. М.*, *Толкачев И. Е.* О возможности определения интегральной электронной концентрации межпланетной трассы по искажениям сверхкороткого радиоимпульса // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 2. С. 160–167.

Стрелков Г. М. Сложный радиосигнал в ионосферной плазме // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 9. С. 1094–1103.

Харкевич А. А. Спектры и анализ. 5-е изд. М.: Книж. дом «Либроком», 2009. 240 с.

Худышев Ю. С. О деформации фазового спектра сверхкоротких радиоимпульсов при распространении по межпланетной трассе // 20-я Конф. молодых учёных «Фундамент. и приклад. косм. исслед.»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2023. С. 155–165. DOI: 10.21046/KMU-2023-155-165.

Худышев Ю. С. О влиянии солнечного ветра на деформацию радиоимпульсов гигагерцевого диапазона на межпланетной трассе // 21-я Конф. молодых учёных «Фундамент. и приклад. косм. исслед.»: сб. тр. М.: ИКИ РАН. 2024. С. 160–169. DOI: 10.21046/KMU-2024-160-169.

ON THE POSSIBILITY OF RECONSTRUCTING AN ULTRASHORT GIGAHERTZ RADIO WAVE PULSE DEFORMED DURING PROPAGATION ALONG AN INTERPLANETARY PATH

Yu. S. Khudyshev

Kotel'nikov Institute of Radio-engineering and Electronics RAS, Fryazino branch
Fryazino, Russia

The report presents the results of the analysis of the possibility of reconstructing the initial shape of ultrashort radio wave pulses with different initial characteristics, propagating along the interplanetary path, based on data on their amplitude and phase spectra and phase incursion of frequency harmonics on the path. It is shown that the use of the Fourier transform allows one to fairly reliably

reconstruct the initial shape of pulses at the values of the total electron content (TEC) of the path, characteristic of interplanetary distances. The possibility of reconstructing the initial shape of pulses in the absence of information on the TEC values of the path is considered.

Keywords: interplanetary plasma, ultrashort radio wave pulse, phase spectrum, phase incursion, dispersion distortions, shape reconstructing

Khudyshev Yuriy Sergeyevich — junior researcher, xantaresx@yandex.ru

УДК 523.34-1/-8, 539.1.074 DOI: 10.21046/KMU-2025-362-369

ПОИСК И АНАЛИЗ ОБЛАСТЕЙ ПОНИЖЕННОГО НЕЙТРОННОГО ПОТОКА В ЮЖНОЙ ОКОЛОПОЛЯРНОЙ ОБЛАСТИ ЛУНЫ ПО ДАННЫМ ПРИБОРА LEND

Н. М. Шандров [1,2], ***А. Б. Санин*** [1], ***И. Г. Митрофанов*** [1]

[1] **Институт космических исследований РАН, Москва, Россия**
[2] **Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт), Москва, Россия**

Представлен комплексный подход к анализу данных о потоке нейтронов, полученных с помощью прибора ЛЕНД, установленного на борту космического аппарата LRO, с целью поиска локальных областей с пониженным нейтронным потоком в южной околополярной области Луны. Понижение нейтронного потока может свидетельствовать о повышенной концентрации водородосодержащих соединений в реголите, что в свою очередь связано с присутствием водяного льда или химически связанной воды. Предложен и реализован алгоритм пространственной фильтрации и статистической обработки данных, позволивший выявить 17 локальных областей с достоверным ослаблением потока эпитепловых нейтронов. Проведено сопоставление их расположения с постоянно затенёнными районами лунной поверхности. Показано, что среди найденных областей лишь семь пересекается с постоянно затенёнными областями, и в то же время не все области постоянной тени демонстрируют понижение нейтронного потока. Полученные результаты могут служить основой для планирования будущих исследовательских и пилотируемых миссий, а также могут быть использованы для изучения закономерностей распределения водяного льда на поверхности Луны.

Ключевые слова: Луна, эпитепловые нейтроны, ЛЕНД, водяной лёд, реголит, нейтронный поток.

ВВЕДЕНИЕ

Лунная поверхность постоянно находится под воздействием галактических космических лучей (ГКЛ), проникающих в грунт на глубину порядка метра. При взаимодействии с ядрами породообразующих элементов реголита они порождают осколки ядер и вторичные частицы, в том числе нейтроны с энергией 10 МэВ и более. Образовавшиеся нейтроны имеют длину свободного пробега значительно меньшую, нежели глубина их образования, в результате чего нейтроны участвуют во множестве взаимодействий с ядрами породообразующих элементов. Это различные ядерные реакции и реакции упругого рассеяния нейтронов. В результате каждого упругого рассеяния нейтрон теряет долю своей энергии, при этом доля энергии, потерянная нейтроном в одном акте рассеяния, тем больше, чем ближе масса ядра-мишени к массе нейтрона. Очевидно, что наиболее эффективно нейтрон теряет энергию при взаимодействии с ядрами водорода — протонами.

Таким образом, в ходе хаотического блуждания в грунте нейтрон постепенно теряет свою энергию. Если время блуждания достаточно велико, то нейтрон может распасться. Он может быть захвачен ядром одного из химических элементов, входящих в состав реголита. В то же время нейтрон может подойти к поверхности грунта и покинуть её, вылетев в окололунное космическое пространство.

Шандров Никита Михайлович — студент, лаборант, n.shandrov@np.cosmos.ru
Санин Антон Борисович — ведущий научный сотрудник, кандидат физико-матеатических наук
Митрофанов Игорь Георгиевич — заведующий отделом, доктор физико-математических наук

Поэтому спектральная плотность потока вылетающих из лунного грунта нейтронов зависит от его химического состава и температуры. Пример энергетического спектра нейтронов от лунного грунта, характерного для горных районов Луны, показан на рис. 1 красной линией. Причём если в этот грунт добавить, например, 10 % воды по массе, то спектр примет вид, показанный чёрной линией. Видно, что добавление воды практически не изменяет количество и энергию образуемых ГКЛ первичных быстрых нейтронов, но в области эпитепловой и тепловой энергии спектр существенно меняется из-за более эффективного замедления нейтронов (Sanin et al., 2017). В области тепловой энергии вариации температуры грунта также существенно влияют на изменение потока нейтронов.

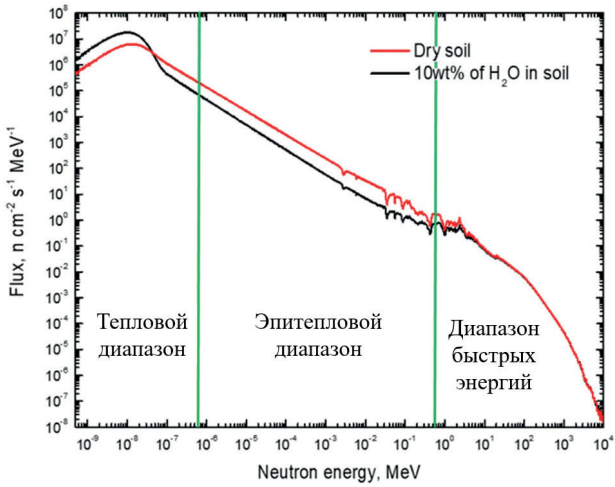


Рис. 1. Спектр нейтронов, вылетающих из реголита, характерного для горных районов Луны при различных значениях содержания водяного льда в грунте

Поэтому, измерив вариации потока эпитепловых нейтронов в полярных районах, можно определить, концентрацию водорода в грунте и его пространственное распределение (Sanin et al., 2017).

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Для решения задачи по определению концентрации водородосодержащих соединений на поверхности Луны под руководством доктора физико-математических наук Игоря Георгиевича Митрофанова в ИКИ РАН был разработан и создан лунный исследовательский нейтронный детектор (ЛЕНД) (Mitrofanov et al., 2010). Он работает с 2009 г. на борту КА LRO (*англ.* Lunar Reconnaissance Orbiter) (NASA) (Chin et al., 2007), который в начале своей миссии около одного земного года работал на круговой полярной орбите с высотой около 50 км, а затем перешёл на эллиптическую полярную орбиту, перицентр которой находится на высоте от 30 до 80 км над южной околополярной областью Луны (высота изменяется со временем в связи с воздействием неоднородного гравитационного поля Луны) (Litvak et al., 2016; Mitrofanov et al., 2008). Подобная форма орбиты в совокупности с наличием коллимированных детекторов нейтронов позволяет получать данные о потоке эпитепловых нейтронов от поверхности Луны с высоким пространственным разрешением порядка 10 км (Mitrofanov et al., 2008).

Прибор оснащён девятью детекторами нейтронов, измеряющими нейтронные потоки от поверхности Луны в различных диапазонах энергии — от тепловых до быстрых. Основным преимуществом прибора ЛЕНД по сравнению с предыдущими нейтронными детекторами, работавшими на окололунной орбите, например, Lunar Prospector Neutron Spectrometer (Maurice et al., 2004), является наличие коллимирующего модуля, который создаёт для пяти нейтронных детекторов узкое поле зрения, позволяя картографировать нейтронный поток от поверхности Луны с высоким пространственным разрешением порядка 10 км (Mitrofanov et al., 2008).

МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Разработка метода поиска локальных областей с пониженным потоком эпитепловых нейтронов (назовём их для краткости, как ОППН) была направлена на выделение участков поверхности, обогащённых водородом. Основой послужила модель, ранее применённая в рамках анализа данных прибора ФРЕНД, для поиска подобных областей на поверхности Марса (Malakhov et al., 2022).

Картографирование потока эпитепловых нейтронов от поверхности Луны, измеренного коллимированными детекторами прибора ЛЕНД в полярной области, проводилось в пикселе размером 2° по долготе и 0,25° по широте, соответственно. Очевидно, что на разных широтах данные пиксели имеют разный линейный размер и разную площадь. Так, например, на широте 85° ю. ш. пиксель имеет размер около 5,28×7,58 км. Такой малый размер пикселей был выбран для того, чтобы было удобно анализировать сложную форму постоянно затенённых областей. Благодаря тому, что КА LRO работает на полярной орбите, время наблюдения пикселей выбранной формы, находящихся на разных широтах, примерно сохраняется. Однако относительно низкая скорость счёта эпитепловых нейтронов коллимированными детекторами прибора ЛЕНД, составляющая около 1,7 отсчёта в секунду, и небольшой выбранный размер пикселей приводят к тому, что измеренная в каждом пикселе скорость счёта нейтронов f имеет статистическую погрешность $\sigma f \approx 0{,}05$ отсчёта в секунду. При анализе скорости счёта нейтронов в постоянно затенённых районах выполняется объединение пикселей, попадающих внутрь контура изучаемой области, с подсчётом средней по области скорости счёта нейтронов и статистической погрешности этой величины. Погрешность средней скорости счёта достаточно мала, потому что в контуры постоянно затенённых районов попадает от нескольких десятков до сотен пикселей. Однако целью данного исследования был поиск локальных ОППН в околополярной области исключительно по данным измерения скорости счёта эпитепловых нейтронов, расположение и форма которых заранее неизвестны. Поэтому для уменьшения влияния на результат поиска статистических флуктуаций скорости счёта нейтронов в пикселях было принято решение применять гауссовый сглаживающий фильтр с характерным размером, примерно соответствующим размеру поля зрения коллимированных детекторов прибора ЛЕНД, т. е. FWHM = 0,4° (*англ.* Full Width at Half Maximum). Кроме того, известно, что средний поток эпитепловых нейтронов уменьшается с приближением к полюсу. В данном исследовании нас интересовал поиск только локальных особенностей потока нейтронов, т. е. отклонения потока относительно указанной широтной зависимости потока. Поэтому с помощью процедуры сглаживания исходных данных с гауссовым фильтром с FWHM = 3,0° была получена карта крупномасштабных вариаций потока. Эту карту условно назвали «референсной» так как поиск локальных вариаций нейтронного потока проводился относительно неё.

Нужно отметить, что процедура сглаживания существенно уменьшает погрешность скорости счёта нейтронов в каждом пикселе поскольку скорость счёта

f_X и её дисперсия $(\sigma f_X)^2$ (здесь и ниже индекс X обозначает характерный размер гауссового фильтра) вычисляются, как средневзвешенные величины по всему ансамблю пикселей, доступных для наблюдения с высоты орбиты КА над текущим пикселем. Веса пикселей при усреднении вычисляются в соответствии с гауссовой функцией на сфере: $w(\psi) = e^{-a(1-\cos(\psi))}$, где a — безразмерный параметр, характеризующий степень сглаживания данных, $a > 0$; ψ — сферическое расстояние между центром гауссовой функции и текущим пикселем, для которого вычисляется вес, $0 \leqslant \psi \leqslant \pi$. Величина, обратная параметру a, имеет тот же смысл, что и дисперсия (σ^2) в распределении Гаусса.

Разработанный метод поиска локальных вариаций нейтронного потока состоит из следующих шагов:

- Первый шаг заключается в построении карты разности потоков нейтронов. Для этого из «тестовой» карты, сглаженной с гауссовым фильтром с FWHM = 0,4°, соответствующим пространственному разрешению прибора, вычитается «референсная» карта, полученная тем же способом, но сглаженная с FWHM = 3,0°. Как было сказано выше, вычитание референсной карты позволяет исключить из рассмотрения крупномасштабные вариации нейтронного потока и сконцентрироваться на поиске локальных особенностей. В результате получается карта разницы сглаженных скоростей счёта $f_{0,4^\circ-3,0^\circ} = f_{0,4^\circ} - f_{3,0^\circ}$.
- На полученной карте разности выделяются все пиксели, значение $f_{0,4^\circ-3,0^\circ}$ которых отрицательно и по модулю больше, чем $\sqrt{\left(\sigma f_{0,4^\circ}\right)^2 + \left(\sigma f_{3,0^\circ}\right)^2}$, где $\sigma f_{0,4^\circ}$ и $\sigma f_{3,0^\circ}$ — погрешности скорости счёта эпитепловых нейтронов в рассматриваемых пикселях на картах, сглаженных с помощью гауссового фильтра с FWHM = 0,4° и с FWHM = 3,0°, соответственно. Отобранные по этому критерию пиксели составляют первичную выборку кандидатов.
- На втором этапе выделенные пиксели группируются в кластеры. В группу включаются только те пиксели, которые граничат хотя бы одной стороной друг с другом.
- Далее каждая группа проверяется на соответствие критерию значимости. Для этого рассчитывается среднее ослабление нейтронного потока внутри группы по несглаженной карте (обозначим его, как F), и сравнивается со средним ослаблением нейтронного потока, вычисленным по референсной карте (обозначим его, как $F_{3,0^\circ}$). Области, в которых выполняется условие $F - F_{3,0^\circ} \geqslant 3\sqrt{(\sigma F)^2 + \left(\sigma F_{3,0^\circ}\right)^2}$, считаются достоверными локальными особенностями ослабления нейтронного потока. Величину $\dfrac{F - F_{3,0^\circ}}{\sqrt{(\sigma F)^2 + \left(\sigma F_{3,0^\circ}\right)^2}}$ можно интерпретировать как значимость локального ослабления нейтронного потока в найденной области.

Таким образом, метод позволяет выделить локальные, статистически значимые области ослабления нейтронного потока, интерпретируемые как районы повышенного содержания водорода в реголите. Причём этот метод основан только на работе с результатами измерения нейтронного потока и не использует других данных, например, о рельефе поверхности. Поэтому найденные в результате использования описанного метода районы можно использовать, например, для проверки связи распределения водородсодержащих соединений в реголите с границами зон постоянной тени.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение описанного метода к данным, полученным прибором ЛЕНД, позволило выявить 17 ОППН в южной околополярной зоне Луны. Эти области различаются как по площади, так и по степени ослабления потока. На рис. 2 представлены контуры найденных областей на фоне несглаженных данных по потоку нейтронов. Цветовая шкала отражает абсолютные значения скорости счёта эпитепловых нейтронов детекторами прибора ЛЕНД.

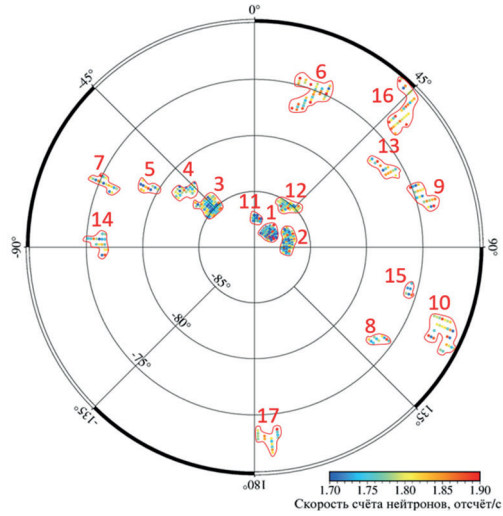


Рис. 2. Области с пониженным нейтронным потоком, найденные в результате применения метода

В таблице представлены параметры 17 ОППН, найденных описанным выше методом: порядковый номер, средняя значимость ослабления и оценка массовой доли водного льда WEH (*англ*. Water Equivalent Hydrogen).

Рисунок 3 показывает наложение контуров найденных областей на карту границ постоянно затенённых участков лунной поверхности, построенную по данным лазерной альтиметрии. Чёрные линии обозначают границы областей постоянной тени площадью более 100 км^2.

Из 17 областей только 7 пересекаются с затенёнными участками, остальные же находятся вне их пределов, что указывает на потенциальную возможность удержания водорода даже в реголите освещаемых районов, который в дневное время может прогреваться до значительной температуры. Это возможно только при залегании летучих соединений на некоторой глубине под слоем реголита, препятствующего их сублимации под действием тепловой волны, вызванной нагревом реголита Солнцем.

Нужно отметить, что далеко не все даже относительно крупные постоянно затенённые районы демонстрируют признаки локального ослабления нейтронного потока, что означает отсутствие признаков наличия водяного льда в этих затенённых областях. Данное наблюдение опровергает гипотезу, доминировавшую до начала работы прибора ЛЕНД на окололунной орбите, что все постоянно затенённые районы являются резервуарами значительных объёмов водяного льда.

Выявленные особенности пространственного распределения водородсодержащих соединений (водяного льда), заключающиеся в наблюдаемом признаке на-

личия таких соединений в реголите освещаемых Солнцем районов, и отсутствие признаков наличия водяного льда во многих постоянно затенённых районах, позволяют сделать вывод о сложности механизмов накопления и удержания водорода на Луне.

Параметры выявленных областей с ослаблением потока эпитепловых нейтронов

№	Значимость ослабления, σ	WEH, % по массе
1	18,1	0,56±0,03
2	18,0	0,44±0,02
3	19,7	0,43±0,02
4	9,6	0,42±0,04
5	5,8	0,40±0,06
6	5,5	0,24±0,03
7	6,0	0,36±0,05
8	5,2	0,38±0,06
9	5,2	0,30±0,04
10	6,5	0,32±0,04
11	9,4	0,52±0,06
12	11,6	0,33±0,02
13	4,9	0,31±0,05
14	6,3	0,37±0,05
15	4,6	0,44±0,10
16	4,7	0,24±0,03
17	5,2	0,31±0,05

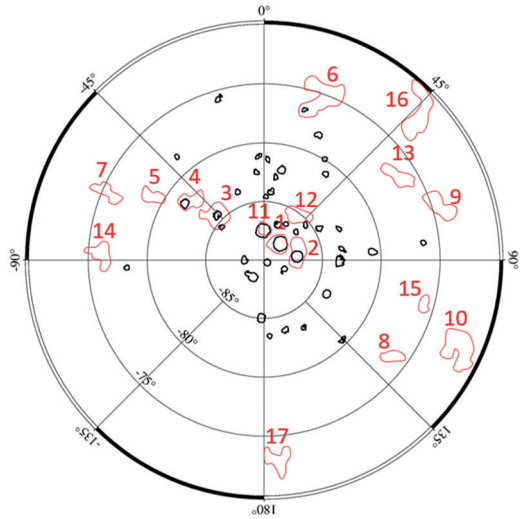


Рис. 3. Взаимное расположение найденных ОППН (красные контуры) и постоянно затенённых областей (чёрные контуры)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе настоящего исследования был разработан и реализован метод для эффективного поиска локальных областей с пониженным нейтронным потоком по данным, полученным прибором ЛЕНД на борту космического аппарата LRO. Применение данного метода к южной околополярной области Луны позволило обнаружить 17 статистически достоверных особенностей, интерпретируемых как области повышенного содержания водорода (водяного льда) в реголите.

Рассчитанные массовые доли водного льда для найденных областей варьируются в пределах 0,24–0,56 % по массе, что свидетельствует о наличии значительных объёмов водородосодержащих соединений. Существенная часть этих областей расположена вне пределов постоянно затенённых территорий, что указывает на существование механизмов длительного хранения водяного льда даже в районах, периодически освещаемых Солнцем. Кроме этого, отсутствие признаков наличия водяного льда во многих постоянно затенённых районах опровергает гипотезу, доминировавшую до начала работы прибора ЛЕНД на окололунной орбите, что все постоянно затенённые районы являются резервуарами значительных объёмов водяного льда. Всё это позволяет сделать вывод о сложности механизмов накопления и удержания водяного льда в реголите Луны.

Полученные результаты демонстрируют эффективность предложенной методики и подтверждают перспективность дальнейших нейтронных исследований для задач картографирования ресурсов Луны. Представленные данные могут использоваться для уточнения моделей распределения водяного льда и при выборе посадочных площадок для будущих миссий.

ЛИТЕРАТУРА

Chin G., *Brylow S.*, *Foote M. et al.* Lunar Reconnaissance Orbiter Overview: The Instrument Suite and Mission // Space Science Reviews. 2007. V. 129. P. 391–419. https://doi.org/10.1007/s11214-007-9153-y.

Litvak M. L., *Mitrofanov I. G.*, *Sanin A. B. et al.* The variations of neutron component of lunar radiation background from LEND/LRO observations // Planetary and Space Science. 2016. V. 122. P. 53–65. DOI: 10.1016/j.pss.2016.01.006.

Malakhov A. V., *Mitrofanov I. G.*, *Golovin D. V. et al.* High resolution map of water in the Martian regolith observed by FREND neutron telescope onboard ExoMars TGO // J. Geophysical Research: Planets. 2022. V. 127. Article e2022JE007258. DOI: 10.1029/2022JE007258.

Maurice S., *Lawrence D. J.*, *Feldman W. C. et al.* Reduction of neutron data from Lunar prospector // J. Geophysical Research. 2004. V. 109. Article E07S04. DOI: 10.1029/2003JE002208.

Mitrofanov I. G., *Sanin A. B.*, *Golovin D. V. et al.* Experiment LEND of the NASA lunar reconnaissance orbiter for high-resolution mapping of neutron emission of the Moon // Astrobiology. 2008. V. 8(4). P. 793–804. DOI: 10.1089/ast.2007.0158.

Mitrofanov I. G., *Bartels A.*, *Bobrovnitsky Y. I. et al.* Lunar exploration neutron detector for the NASA lunar reconnaissance orbiter // Space Science Reviews. 2010. V. 150(1–4). P. 183–207. DOI: 10.1007/s11214-009-9608-4.

Sanin A. B., *Mitrofanov I. G.*, *Litvak M. L. et al.* Hydrogen distribution in the lunar polar regions // Icarus. 2017. V. 283. P. 20–30. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.06.002.

SEARCH AND ANALYSIS OF REGIONS WITH SUPPRESSED NEUTRON FLUX IN THE SOUTHERN CIRCUMPOLAR AREA OF THE MOON USING LEND INSTRUMENT DATA

N. M. Shandrov [1,2], ***A. B. Sanin*** [1], ***I. G. Mitrofanov*** [1]

[1] **Space Research Institute RAS, Moscow, Russia**
[2] **National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) Moscow, Russia**

This study presents a comprehensive approach to analyzing neutron flux data obtained by the LEND instrument onboard the LRO spacecraft, aimed at identifying localized regions with reduced neutron flux in the lunar south polar region. A decrease in neutron flux may indicate an elevated concentration of hydrogen-bearing compounds in the regolith, which in turn could be associated with the presence of water ice or chemically bound water. An algorithm for spatial filtering and statistical processing of the data has been developed and implemented, enabling the detection of 17 localized areas with a significant reduction in epithermal neutron flux. Their locations were compared with permanently shadowed regions on the lunar surface. The results show that only 7 of the identified regions overlap with permanently shadowed areas, while not all permanently shadowed regions exhibit a decrease in neutron flux. The findings may serve as a basis for planning future robotic and crewed missions and could also be used to study the distribution patterns of water ice on the lunar surface.

Keywords: Moon, epithermal neutrons, LEND, water ice, regolith, neutron flux

Shandrov Nikita Mikhailovich — student, laboratory assistant, n.shandrov@np.cosmos.ru
Sanin Anton Borisovich — leading researcher, candidate of physical and mathematical sciences
Mitrofanov Igor Georgievich — head of department, doctor physical and mathematical sciences

УДК 341:229 DOI: 10.21046/KMU-2025-370-373

ПРОГРАММА TRACSS КАК ИНСТРУМЕНТ СОХРАНЕНИЯ ВЛИЯНИЯ США В КОСМОСЕ

Д. С. Шишов

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Исследовательский центр «Космическая экономика и политика», Москва, Россия

Статья посвящена программе TraCSS (*англ.* Traffic Coordination System for Space). Инициатива, запущенная при администрации Трампа, направлена на совершенствование управления космическим движением за счёт интеграции усилий государственных и коммерческих структур. Система включает три компонента: TraCSS-OASIS (хранилище данных), TraCSS-SKYLINE (операционные сервисы космической ситуационной осведомлённости) и TraCSS-HORIZON (среда моделирования). Автор также проводит сравнение TraCSS с европейской системой наблюдения и слежения за космическими объектами EU SST (*англ.* European Union Space Surveillance and Tracking), отмечая их схожесть и возможность интеграции в будущем. Подчёркиваются геополитические последствия внедрения TraCSS, включая потенциальное установление глобальных стандартов управления космическим движением.

Ключевые слова: TraCSS, космическая ситуационная осведомлённость, координация космического движения, коммерциализация космической деятельности, Министерство торговли США, EU SST, частные космические компании, стандарты управления космическим движением

ПОЛИТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММЫ TRACSS

В настоящее время во всём мире наблюдается тенденция коммерциализации космической деятельности. Это выражается не только в создании частных космических компаний, но и в передаче некоторых функций от военных ведомств к гражданским. Кроме того, развитие цифровых технологий играет всё большую роль в том числе и в космической деятельности, что находит отражение в появлении цифровых сервисов, работающих во многом благодаря интеграции космических технологий. Лидером данных направлений являются США.

В течение своего первого президентского срока Д. Трамп провёл несколько реформ в космической сфере. Особого рассмотрения заслуживает принятая в 2018 г. Директива по космической политике-3 (SPD-3, *англ.* Space Policy Directive), первая национальная политика в области управления космическим движением (УКД)[1].

Поскольку непосредственно управление космическим движением трудноосуществимо на международном уровне, США пошли по пути объединения усилий национальных ведомств и частных компаний для создания системы координации космического движения, в практическом смысле это будет выражаться в передаче части полномочий по распоряжению информацией о космических объектах от Министерства обороны Министерству торговли. С этой целью создаётся TraCSS (*англ.* Traffic Coordination System for Space) — современная облачная IT-система, которая будет предоставлять данные о космической ситуационной осведомлённости (SSA, *англ.* Space Situational Awareness) и услуги по координации космического движения (STC, *англ.* Space Traffic Coordination) космическим

[1] A Presidential Document by the Executive Office of the President “National Space Traffic Management Policy”, 21.06.2018. https://www.federalregister.gov/documents/2018/06/21/2018-13521/national-space-traffic-management-policy.

Шишов Дмитрий Сергеевич — студент магистратуры, dmitryshishov@mail.ru

операторам для обеспечения безопасности космических полётов, устойчивости космического пространства и международной согласованности[2].

АРХИТЕКТУРА И ПРИНЦИП ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ TRACSS

Программа TraCSS состоит из трёх составных частей: TraCSS-OASIS (репозиторий данных), TraCSS-SKYLINE (оперативные прикладные сервисы SSA) и TraCSS-HORIZON (тестовая среда, моделирование).

В широком смысле за TraCSS отвечает Министерство торговли, фактически работа сосредоточена в Отделе космической торговли OSC (*англ.* Office of Space Commerce), созданном внутри Национального управления океанических и атмосферных исследований NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration) данного министерства.

В январе OSC провёл мероприятие Consolidated Pathfinder («Совместный поиск пути» — *пер. автора*) с участием указанных компаний для того чтобы изучить, как Отдел будет закупать, измерять, интегрировать и составлять бюджет для желаемых коммерческих данных и услуг SSA[3]. Это было необходимо в качестве пилотного проекта для проверки ключевых технологий TraCSS, эксперимент длился шесть месяцев. В результате была подтверждена возможность поддержания обновляемого каталога объектов на орбите, однако также была выявлена необходимость уточнения некоторых параметров. Для оценки «Совместного поиска пути» использовались пять категорий параметров: точность, своевременность, прецизионность (повторяемость), полнота и масштабируемость.

В рамках проекта OSC напрямую сотрудничает с пятью коммерческими космическими компаниями, которые являются конкурентами на рынке, но при этом каждая из них играет свою роль в данной системе.

- LeoLabs и Slingshot Aerospace выступают поставщиками данных о SSA (при этом LeoLabs специализируется на радарном обнаружении, а Slingshot Aerospace — на оптическом наблюдении),
- COMSOC Corporation занимается определением орбит и обеспечивает ведение корпоративного каталога объектов на орбите,
- Kayhan Space и SpaceNav осуществляют контроль качества: отслеживают сбор данных, уточняют и проверяют показатели, разработанные другими участниками, а также разрабатывают дополнительные показатели для всей системы.

Министерство обороны, и конкретно 18-я эскадрилья космической обороны Космических сил США (*англ.* United States Space Force), предоставляет исходные данные о сближениях CDM (*англ.* Conjunction Data Messages) в облачное хранилище Министерства торговли. Доступ к нему имеют все участники проекта, включая перечисленные частные компании, а также центры исследований и разработок, финансируемые из федерального бюджета FFRDCs (*англ.* Federally Funded Research and Development Centers), которые предоставляют рекомендации по стандартизации.

Что касается коммерческой стороны вопроса, то заказы на данные и сервисы для TraCSS планируется размещать на площадке глобального рынка данных GDM (*англ.* Global Data Marketplace). «Совместный поиск пути» имел в качестве одной из задач изучение GDM как коммерческого варианта получения данных и разработку

[2] *Magnus Sandra.* The TraCSS Consolidated Pathfinder: Leveraging Commercial Capability in LEO. 2024.

[3] Там же.

шаблонов заказов, подходящих для будущего использования в работе TraCSS[4], которая заинтересована в заключении контрактов о всеобъемлющей закупке BPA (англ. Blanket Purchase Agreement) или бессрочной поставке/неограниченном количестве с несколькими поставщиками IDIQ (*англ.* Indefinite Delivery/Indefinite Quantity) для получения коммерческих данных и услуг SSA в поддержку миссии TraCSS. BPA/IDIQ, наряду с заказами, размещёнными на GDM, станет основным средством получения коммерческих данных и услуг SSA для интеграции в TraCSS.

ЕВРОПЕЙСКАЯ СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА КОСМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Существует мнение[5], что создание TraCSS и её распространение на союзников США — не что иное, как попытка продвигать собственные политические интересы и устанавливать стандарты УКД для большей части мира (учитывая принадлежность спутников на орбите). Тем не менее, для союзников США такая перспектива вряд ли является неожиданной.

Европейский подход схож с американским в части выработки норм мягкого права (стандарты, лучшие практики и т. д.) для УКД. В резолюции Европарламента от 6 октября 2022 г. “An EU approach for Space Traffic management — an EU contribution addressing a global challenge” чётко обозначен призыв Еврокомиссии к рассмотрению как гражданских, так и оборонных потребностей и проведению консультаций с заинтересованными сторонами за пределами ЕС. Очевидно, что по уровню космических технологий и текущим политическим отношениям под такую формулировку подходят только США.

В октябре 2024 г. 75-й Международный астронавтический конгресс выпустил исследование[6], в котором сравниваются европейская система наблюдения и слежения за космическими объектами EU SST (*англ.* European Union Space Surveillance and Tracking) и TraCSS. Из этого документа следует, что программы очень схожи за исключением некоторых нюансов. Это даёт основание полагать, что в будущем такие системы могут быть унифицированы или даже слиты воедино.

8 апреля 2025 г. EU SST провела онлайн-семинар, в котором приняли участие более 60 представителей секторов гражданской авиации и космической безопасности, для изучения меняющихся потребностей заинтересованных сторон в сфере авиации в отношении услуги EU SST по анализу возвращения космических объектов в атмосферу. Были затронуты многие вопросы, такие как предпочтительные форматы, средства координации и интерфейсы. Это говорит о высоком уровне технической проработки системы. Заметим, что успешно функционирующая EU SST позволила отслеживать и возвращение на Землю советского аппарата «Космос-482» 10 мая 2025 г.

11 июня 2025 г. OSC объявил победителей по заказу на поставку данных, размещённому 30 апреля, по программе COLA (*англ.* Commercial Collision Avoidance)[7]. Общий объём гонораров составил 10,1 млн дол. Во-первых, это свидетельствует

[4] Там же.

[5] Космические штрафы и «американский ЦОДД» // Россия в глобальной политике. 2023. https://globalaffairs.ru/articles/kosmicheskie-shtrafy/?ysclid=m88dsrga4e900400642.

[6] *Borowitza M.*, *Hernándezb C.P.*, *Hejdukc M. et al.* Comparison of European Union Space Surveillance and Tracking and TraCSS // 75th International Astronautical Congress/ 2024. https://www.space.commerce.gov/wp-content/uploads/2024-10-comparison-EUSST-TraCSS-IAC.pdf.

[7] OSC Announces Awardees of the Commercial COLA Gap Pathfinder / Office of Space Commerce. 2025. https://space.commerce.gov/osc-announces-awardees-of-the-commercial-cola-gap-pathfinder/.

о существовании рынка и активном вовлечении частных компаний. Во-вторых, что в приоритете наблюдения находится именно этап от запуска до вывода аппарата на орбиту, т. е. первый этап развёртывания, когда существует окно повышенного риска столкновений.

Приведённые два факта говорят о заинтересованности сторон в наблюдении не столько за операциями спутников на орбите, сколько за их выходом в космос и возвращением в атмосферу. Пока ЕС и США смотрят на проблему «с разных сторон», но точка соприкосновения для потенциальных консультаций уже существует. Как уже отмечалось выше, TraCSS и EU SST довольно похожи по своим параметрам. Гипотетическое их совмещение создало бы новую систему, беспрецедентную по охвату космических объектов, информация о которых стала бы более точной и обширной и за счёт этого превратилась бы в более ценный ресурс управления.

На данном этапе представляется, что в ближайшие годы США займутся упорядочением форматов взаимодействия своих ключевых органов, связанных с космической деятельностью, и постараются привлечь в систему TraCSS как можно больше частных космических компаний. На внешнем контуре США в среднесрочной перспективе могут предпринять попытки вовлечь европейских союзников в свою систему координации космического движения, за счёт более устойчивой и апробированной системы и низких цен навязав участие в своей системе уже на межрегиональном и глобальном уровне, вслед за этим установив определённые требования для осуществления космической деятельности.

THE TRACSS PROGRAM AS A TOOL FOR PRESERVING U. S. INFLUENCE IN SPACE

D. S. Shishov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Research Center "Space Economy and Policy", Moscow, Russia

The article examines the TraCSS program (Traffic Coordination System for Space). Launched during the Trump administration, this initiative aims to improve space traffic management by integrating efforts from government and commercial entities. The system consists of three components: TraCSS-OASIS (data repository), TraCSS-SKYLINE (operational SSA services), and TraCSS-HORIZON (simulation environment). The author also compares TraCSS with the European Union Space Surveillance and Tracking (EU SST) system, noting their similarities and potential for future integration. The geopolitical implications of TraCSS are emphasized, including its potential to establish global standards for space traffic management.

Keywords: TraCSS program, Space Situational Awareness (SSA), Space Traffic Coordination (STC), commercialization of space activities, U. S. Department of Commerce, European Union Space Surveillance and Tracking (EU SST), private space companies, space traffic management standards.

Shishov Dmitry Sergeevich — master's degree student, dmitryshishov@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

Pouya Latifiyan
Advancing planetary exploration with CubeSats: Challenges, innovations, and future directions 5

Алимова О. Д.
Типы неоднородностей на сельскохозяйственных угодьях Почепского района Брянской области по индексу NDVI 14

Байрамова Л. Ф.
Моделирование и прогнозирование опустынивания на Апшеронском полуострове с использованием спутниковых снимков и анализа временных рядов. 19

Бахрамхан Я. О., Ермаков Д. М., Подольская Е. С.
Сбор и обработка набора снимков Sentinel-2 для обучения нейронной сети YOLO выделения просек под ЛЭП 31

Баширов М. И., Морозов Д. А., Мигранов А. И., Хисматуллин А. К.
Разработка Универсального исследовательского планетохода «Оставляющий след ОС-8». 44

Варрес К. А.
Современные вызовы правового регулирования удаления космического мусора и перспективы их преодоления 58

Васильева П. С., Лыскова Н. С.
Выделение гравитационно-связанных подструктур в поле скопления галактик CL0238.3+2005 64

Виноградов И. Д., Денисенко Д. В.
Способ поиска неизвестных переменных звёзд 72

Виноградова Е. В., Юдин М. А.
Оценка влияния концентрации глубоких уровней на радиационную стойкость интегральных микросхем 76

Врублевский М. В., Бурцев М. А.
Интеграция тематических продуктов в интересах задач мониторинга водных объектов в информационной системе «Вега-Гидро». 81

Гамков Д. М., Бунтов М. В., Арефьев В. А.
Анализ настроек ПИД-регуляторов системы обеспечения теплового режима рентгеновского монитора СПИН-Х1-МВН 85

Головко А. Г., Ермакова Т. С.
Особенности поля приземного давления и волн холода над Евразией во время внезапного стратосферного потепления (смещение) 97

Государева Е. А.
Закономерности пространственно-структурных характеристик естественных западин на территории Трубчевского ополья 104

Григорьев В. С., Денисенко Д. В.
Открытие и исследование затменной переменной звезды Grigoriev 1 111

Губарев В. Д., Козырев А. С., Митрофанов И. Г., Литвак М. Л.
Изучение зависимости интенсивности потока галактических космических лучей по данным эксперимента МГНС вдоль трассы движения космического аппарата «БепиКоломбо» к Меркурию 118

Дементьев В. Ю.
Разработка программных средств визуализации изображений звёзд для наземной отработки штатных и специальных режимов датчика звёздной ориентации 124

Дертеев С. Б., Горяева В. Н., Михаляев Б. Б.
Формирование волн сжатия в солнечной короне под действием неадиабатических процессов 133

Жихарева А. А.
Спутниковый мониторинг выбросов природных газов: перспективы и риски 136

Зарюгин Д. Д.
Регистрационный процесс как основа для предупреждения образования и ликвидации космического мусора 141

Исламов С. С., Лыскова Н. С.
Сложная морфология источника TXS 0506+056 — гравитационно линзированный джет? 146

Каламанов В. Г.
Сравнение компьютерных программ PIVLab и CACTus в контексте анализа динамики солнечной плазмы при корональном выбросе массы. 156

Катамадзе Д. Р., Тихонов В. В., Алексеева Т. А., Афанасьева Е. В., Соколова Ю. В., Хвостов И. В., Романов А. Н.
Использование данных радиометра MIRAS спутника SMOS для анализа сплочённости ледяного покрова морей российской Арктики 160

Кирьяков Н. В., Бельмач Н. В.
Спутниковый мониторинг использования земель сельскохозяйственного назначения на территории Константиновского района Амурской области 180

Клецова В. А., Анискина О. Г.
Численное моделирование атмосферных процессов с использованием модели WRF-ARW 194

Клитная А. В., Садовский И. Н.
Коррекция алгоритма географической привязки данных измерений МТВЗА-ГЯ 202

Коньков Л. Д., Денисенко Д. В.
Открытие оптического транзиента AT 1985V — возможного послесвечения космического гамма-всплеска. 212

Коссова Д. А., Беляев Д. А., Стариченко Е. Д.
Исследование режимов диффузии в верхней атмосфере Марса по данным затменного эксперимента ACS 220

Кузнецова Е. В., Горбан А. С.
Исследование вспышек второго типа в Be-рентгеновских двойных системах. 232

Липилин В. А., Семена Н. П., Бунтов М. В., Кривченко А. В.
Экспериментальное определение режимов работы рентгеновской трубки с фотокатодом для целей имитации излучения переменных астрофизических объектов. 241

Лысенко А. М., Томилина Т. М., Савватимова П. Р., Михайлов К. Н.
Экспериментальные исследования физических условий для создания образцов из имитатора лунного реголита методом селективного лазерного сплавления 250

Мартьянова В. В., Ермаков Д. М.
Исследование многолетнего гидрологического режима территорий среднеазиатских республик по данным спутникового радиотепловидения 257

Медведев С. А.
Консольная симуляция задачи *N* тел с моделированием разрушения и анализом динамических систем 261

Мельников Д. О., Николаев А. О., Семенович С. Н.
Разработка и исследование алгоритмов определения ориентации по солнцу образовательной модели сверхмалого космического аппарата 268

Мельниченко Д. А., Горбан А. С.
Исследование траектории движения тел в гравитационном поле. 275

Назарова А. В., Федорова А. А., Трохимовский А. Ю.
Измерения содержания парниковых газов в атмосфере Земли в эксперименте «Дриада»: оценка чувствительности 283

Новикова А. А., Бунтов М. В., Заева М. А.
Разработка алгоритма определения периода рентгеновского пульсара для использования в бортовом вычислительном устройстве космического эксперимента 292

Романенко В. А., Семенов В. А.
Рекордно низкие значения площади арктических морских льдов в сентябре в период 1980–2020 гг. по спутниковым данным и данным моделей CMIP6 299

Романова А. Э., Литвак М. Л., Митрофанов И. Г., Дьячкова М. В., Лисов Д. И., Никифоров С. Ю.
Распределение содержания хлора по глубине для различных геологических областей в кратере Гейл по данным приборов ДАН и APXS 308

Рычкова А. Д., Аревков М. А.
Перспективы применения арамидных композиционных материалов для термодеструктивных процессов в ракетно-космической технике 321

Санникова Т. Н.
Orekit: Влияние коэффициента отражения на точность эфемериды при сферической форме объекта космического мусора 324

Семенова А. А.
Отражение запуска Советским Союзом первого в мире искусственного спутника Земли в американской прессе 332

Тарасов Е. О., Митрофанов И. Г., Мокроусов М. И., Аникин А. А.
Проектирование и разработка устройства управления контрольно-измерительной аппаратуры грунтозаборного устройства. 338

Хадарцев А. О.
Моделирование вспышки 2021 года двойной системы 4U 1543-47. 344

Худышев Ю. С.
О возможности восстановления сверхкороткого радиоимпульса гигагерцевого диапазона, деформированного при распространении по межпланетной трассе . . . 352

Шандров Н. М., Санин А. Б. Митрофанов И. Г.
Поиск и анализ областей пониженного нейтронного потока в южной околополярной области Луны по данным прибора LEND 362

Шишов Д. С.
Программа TraCSS как инструмент сохранения влияния США в космосе. 370

22-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 21–23 апр. 2025: сб. тр. / под ред. А. М. Садовского. Сер. Механика, управление, информатика. М.: ИКИ РАН, 2023. 377 с.

22nd Young Scientists Conference “Fundamental and Applied Space Researches”. IKI RAS, Moscow, 21–23 Apr. 2025: proc. / ed. A. M. Sadovski. M.: IKI RAS, 2023. 377 p.

Серия «Механика, управление, информатика»

Компьютерная верстка: Комарова Н. Ю.

Подписано в печать __.__.2025
Формат 70×100/16. Усл. печ.-л. 30,55. Тираж 150. Заказ ____