

# ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ

РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК



INSTITUTE  
OF  
ASTRONOMY  
OF THE RUSSIAN  
ACADEMY OF SCIENCES



**Уважаемый читатель!**

**Это издание посвящено 85-летию Института астрономии РАН (до 1991 г. — Астрономического совета АН СССР или просто Астросовета). Наш институт — ныне крупный центр астрономических исследований — был создан в 30-е годы прошлого века как координационный орган для объединения усилий по реализации крупных астрономических проектов в нашей стране. Позже, благодаря огромной энергии и научному таланту работавших в Астросовете людей, главным делом стало проведение самостоятельных научных исследований. Наш институт по праву гордится тем, что именно здесь выполнялись пионерские проекты по исследованиям, основанным на наблюдениях искусственных небесных тел, физике и эволюции звезд, физике гравитирующих систем, информатике в астрономии. В наше время Институт астрономии сохраняет лидерство в этих направлениях, одновременно развивая и новые — осуществление космических проектов, детальные исследования тел Солнечной системы и экзопланет, продвижение идей вычислительной астрофизики, создание российского сегмента системы противодействия космическим угрозам. За прошедшие годы было взято много научных вершин. Бывали и трудные времена. Но мы работаем, есть положительные перспективы, и укрепляются надежды и в будущем продолжать лучшие традиции и преумножать достижения отечественной науки.**

**С пожеланиями всего доброго,  
Директор Института астрономии РАН  
чл.-корр. РАН  
Д.В. Бисикало  
Научный руководитель  
Института астрономии РАН  
чл.-корр. РАН  
Б.М. Шустов**

**Dear reader,**

**This publication is dedicated to the 85th anniversary of the Institute of Astronomy (until 1991 — the Astronomical Council of USSR Academy of Sciences or simply Astronomical Council). Nowadays our Institute is a major center of astronomical research. It was founded in the 30-ties of the last century as a coordinating body for implementation of large astronomical projects in this country. Later, thanks to a lot of energy and scientific talent of people working at the Astronomical Council the primary focus was on the fundamental research. Our Institute is proud of the fact that it has carried out pioneering research projects, based on observations of artificial celestial bodies, physics and evolution of stars, physics of gravitating systems, computer science in astronomy. And in our time, the Institute of Astronomy keeps the leadership in these areas, developing new ones — the implementation of space projects, detailed studies of the Solar System bodies and of exoplanets, development of numerical astrophysics methods, development of space hazards counteraction system. Over the years, a lot of scientific heights has been achieved. There were tough times either. But we are working, there is a positive outlook and hopes to continue the best traditions and to increase achievements of Russian science.**

**Wishing you all the best,  
Director of the Institute of Astronomy  
Corresponding Member of the RAS  
D.V. Bisikalo  
Science director of the Institute of Astronomy  
Corresponding Member of the RAS  
B.M. Shustov**



Масштабная индустриализация СССР в 1930-е гг. предполагала одновременное интенсивное развитие науки. Ответственность за организацию фундаментальных научных исследований в то время была возложена на Академию наук СССР (АН СССР). Для координации работ в области астрономии в АН СССР был создан Астрономический совет. Датой его рождения считается 20 декабря 1936 г., когда Президиумом АН СССР был утвержден проект положения об Астрономическом совете при АН СССР, представленный академиками А. Е. Ферсманом и В. Г. Фесенковым. Академик В. Г. Фесенков стал первым Председателем Астросовета.

В довоенные годы руководство Астросовета собирало и систематизировало сведения об исследованиях, проводившихся в различных астрономических учреждениях СССР, чтобы избежать дублирования и наладить согласованную работу по наиболее перспективным направлениям. На время войны деятельность Астросовета была приостановлена и возобновилась только в 1947 г. под председательством члена-корреспондента АН СССР А. А. Михайлова.

В соответствии с решениями Пленумов Астросовета распределялось финансирование астрономических исследований. В первые послевоенные годы основные средства шли на восстановление разрушенных обсерваторий, в первую очередь Пулковской и Симеизской. В эти же годы были созданы и оснащены передовыми для того времени телескопами и наблюдательной техникой новые обсерватории — Бюраканская в Армении, Абастуманская в Грузии и Шемахинская в Азербайджане.

На восстановленных и построенных обсерваториях активно проводились исследования по целому ряду направлений, которые требовали четкой координации и постоянного обмена результатами исследований. Поэтому Пленумом Астросовета было принято решение о создании в его структуре проблемных комиссий по астрометрии, звездной астрономии, звездным скоплениям, звездным ассоциациям, строению Галактики, физике и эволюции звезд, звездным атмосферам, переменным звездам, физике планет, физике Солнца, радиоастрономии и астрономическому приборостроению. Также в структуре Астросовета была учреждена Рабочая группа по исследованию астроклимата.

Проблемные комиссии координировали исследования во вверенной им области, созывали научные совещания и докладывали важнейшие результаты на ежегодных Пленумах Астросовета. К Пленумам приурочивалось проведение значительных научных совещаний. По представлению Президиума Астросовета Президиумом АН СССР была утверждена именная медаль «За обнаружение новых астрономических объектов», которая тоже присуждалась по решению Президиума Астросовета и торжественно вручалась на Пленумах.

Астрономический совет АН СССР играл важную роль в координации международных проектов, в которых участвовали советские астрономы, и отвечал за взаимодействие с Международным астрономическим союзом. С конца 1960-х гг. в совместных с Астросоветом исследованиях участвовали ученые практически из всех европейских социалистических стран. Для координации этих исследований в 1974 г. была учреждена Комиссия многостороннего сотрудничества, состоявшая из шести проблемных подкомиссий: «Ранние стадии эволюции звезд» (координатор — Чехословакия), «Поздние стадии эволюции звезд» (Польша), «Нестационарные звезды» (Венгрия), «Магнитные звезды» (Германия),

The large-scale industrialization of the USSR in the 1930s implied the simultaneous intensive development of science. The responsibility for organizing fundamental scientific research at that time was assigned to the USSR Academy of Sciences (USSR AS). An Astronomical Council was created to coordinate research in the field of astronomy at the USSR AS. December 20, 1936 is considered as its birth date. At this day the Presidium of the USSR AS approved the draft regulations on the Astronomical Council at the USSR AS, presented by Academicians A.E. Fersman and V.G. Fesenkov. Academician V.G. Fesenkov became the first Chair of AstroCouncil. In the pre-war years the AstroCouncil collected and systematized information on research carried out in various astronomical institutions of the USSR in order to avoid duplication and to establish coordinated work in the most promising areas. During the war, the activities of the AstroCouncil were suspended and resumed only in 1947 under the chairmanship of A.A. Mikhailov, Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences.

Funding for astronomical research was distributed in accordance with the decisions of the Plenums of the AstroCouncil. In the first post-war years, the main funds went to the restoration of the destroyed observatories, primarily Pulkovo and Simeiz ones. In the same years, new observatories were created and equipped with the most advanced telescopes and observational equipment for that time, Byurakan in Armenia, Abastumani in Georgia and Shamakhy in Azerbaijan.

At the restored and newly built observatories, various studies in a number of areas were actively carried out, requiring clear coordination and constant exchange of research results. Therefore, the Plenum of the AstroCouncil decided to add to its structure problem commissions on astrometry, stellar astronomy, star clusters, stellar associations, the structure of the Galaxy, physics and evolution of stars, stellar atmospheres, variable stars, planetary physics, solar physics, radio astronomy and astronomical instrumentation. Also the Astroclimate Research Working Group was established in the structure of the AstroCouncil.

Problem commissions coordinated research in their assigned topics, convened scientific meetings and reported the most important results at the annual Plenary Sessions of the AstroCouncil. Major scientific meetings were held in association with the Plenums. By the suggestion of the AstroCouncil Presidium, the Presidium of the USSR AS established a personal medal "For the discovery of new astronomical objects", which was also awarded by the decision of the AstroCouncil Presidium and was solemnly presented at the Plenums.

The Astronomical Council of the USSR AS played an important role in coordinating international projects in which Soviet astronomers participated, and was responsible for interaction with the International Astronomical Union. Since late 1960's scientists almost from all European socialist countries took part in joint research with the AstroCouncil. To coordinate these studies, in 1974 a Multilateral Cooperation Commission was established, consisting of six problem subcommissions: "Early stages of stellar evolution" (coordinated by Czechoslovakia), "Late stages of stellar evolution" (Poland), "Non-stationary stars" (Hungary), "Magnetic Stars" (Germany), "Double Stars" (Romania), "Clusters and Associations" (Bulgaria).

In anticipation of the launch of the first artificial Earth satellite (AES), the Astronomical Council of the USSR Academy of Sciences was entrusted with organizing satellite observations. Sixty-six satellite observing stations were created on the territory of the

«Двойные звезды» (Румыния), «Скопления и ассоциации» (Болгария).

В преддверии запуска первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) Астрономическому совету АН СССР была поручена организация наблюдений ИСЗ. На территории Советского Союза было создано 66 станций для наблюдений ИСЗ, а в Астросовете была учреждена группа сотрудников для координации работ этих станций. В 1958 г. у Астросовета появилась собственная наблюдательная база под Звенигородом, позже ставшая Звенигородской обсерваторией ИНАСАН.

Звенигородская обсерватория сыграла большую роль в получении наблюдательного материала для исследований, проводившихся на основе анализа движений и фотометрии ИСЗ. На протяжении многих лет здесь разрабатывались методики наблюдений, испытывались новые приборы. После стажировки в Звенигородской обсерватории астрономы направлялись на наблюдательные станции, расположенные в различных странах.

В 1946 г. в Астросовете началась работа по созданию Общего каталога переменных звезд. В начале 1960-х гг. под руководством А. Г. Масевич в Астросовете была создана группа по исследованию физики и эволюции звезд. В 1967 г. по предложению Председателя Астросовета Э. Р. Мустеля были начаты исследования в области звездной спектроскопии и нестационарных звезд. В 1970-е гг. начались работы по моделированию эволюции тесных двойных звездных систем и звездных пульсаций.

В 1961 г. в Астросовете была открыта аспирантура по трем специальностям: «Солнечно-земные связи» (руководитель Э. Р. Мустель), «Физика и эволюция звезд» (А. Г. Масевич) и «Переменные звезды» (Б. В. Кукаркин). Подготовленные в аспирантуре специалисты позже стали кадровой основой Института астрономии АН СССР.

В 1980 г. в составе Астросовета был создан Центр астрономических данных (ЦАД) — филиал Страсбургского центра звездных данных. Создание ЦАД предоставило астрономам Советского Союза и социалистических стран возможность безвозмездно использовать всю накопленную на обсерваториях мира информацию, а также передавать мировому научному сообществу каталоги, подготовленные советскими учеными. Инициатива создания ЦАД принадлежит руководителю центра к.ф.-м.н. О. Б. Длужневской.

Сотрудники Астросовета регулярно привлекались для консультаций по изготовлению экспонатов и работы на зарубежных выставках, в частности, в престижных выставках «Экспо-67» (Монреаль, Канада, 1967) и в Генеральной ассамблее ООН (Нью-Йорк, США, 1982).

К 1990-м гг. Астросовет стал не столько координирующим органом, сколько научно-исследовательским институтом с собственными обсерваториями и вычислительным центром. В декабре 1990 г. это изменение статуса было закреплено преобразованием Астрономического совета АН СССР в Институт астрономии АН СССР.

В современном ИНАСАН успешно развиваются актуальные направления научных исследований — физика и эволюция двойных и кратных систем, звездная спектроскопия, нестационарные звезды, геодинамика и геофизика, физика Солнечной системы и экзопланет, физика межзвездной среды, звездообразование, астрохимия, физика звездных систем, космология, астрономическое приборостроение, космические исследования. Ведется большая работа по координации исследований как на внутрироссийском, так и на международном уровне. Успешно готовятся научные кадры. Институт астрономии РАН подходит к очередному юбилею в статусе научного и образовательного центра мирового уровня.

Soviet Union, and a working group was established in the AstroCouncil for these stations' work coordination. In 1958, the AstroCouncil acquired its own observation site near Zvenigorod, which later became the Zvenigorod Observatory of INASAN. The Zvenigorod Observatory played an important role in obtaining observational data for studies based on the analysis of motions and photometry of the satellites. Over the years, observation techniques were developed here, new devices were tested. After training at the Zvenigorod Observatory, astronomers went to observation stations located in other countries.

In 1946, the AstroCouncil began working on the creation of the General Catalog of Variable Stars. In the early 1960s under the leadership of A.G. Masevich, a group for the study of the physics and evolution of stars was created in the AstroCouncil. In 1967, at the suggestion of the Chairman of the AstroCouncil, E. R. Mustel, research began in the field of stellar spectroscopy and nonstationary stars. In the 1970s the research on modeling the evolution of close binary stellar systems and stellar pulsations started as well.

In 1961, the AstroCouncil opened postgraduate courses in three topics: "Solar-Terrestrial Relations" (supervisor E. R. Mustel), "Physics and Evolution of Stars" (A. G. Masevich) and "Variable Stars" (B. V. Kukarkin). The students of these courses later became the personnel base of the Institute of Astronomy of the Academy of Sciences of the USSR.

In 1980, the Astronomical Data Center (ADC), a branch of the Strasbourg Stellar Data Center, was created within the AstroCouncil. The creation of the ADC provided astronomers of the Soviet Union and socialist countries with the opportunity to freely use all the information accumulated at the observatories of the world, as well as to present catalogs prepared by Soviet scientists to the international scientific community. The initiative to create the ADC belongs to the current head of the center, Ph.D. O.B. Dluzhnevskaya.

AstroCouncil staff were regularly involved in consultations on the manufacture of exhibits and work at foreign exhibitions, in particular, at the prestigious Expo-67 (Montreal, Canada, 1967) and at the UN General Assembly (New York, USA, 1982).

By the 1990s the AstroCouncil ceased to be just a coordinating body, but became a research institute with its own observatories and a computing center. In December 1990, this change in status was consolidated by the transformation of the Astronomical Council of the AS of the USSR into the Institute of Astronomy of the AS of the USSR.

In present-day INASAN, topical areas of scientific research are successfully developing: physics and evolution of binary and multiple systems, stellar spectroscopy, nonstationary stars, geodynamics and geophysics, physics of the Solar System and exoplanets, physics of the interstellar medium, star formation, astrochemistry, physics of stellar systems, cosmology, astronomical instrumentation, space research. A lot of work is being done to coordinate research both at the domestic and international levels. Young scientists are successfully trained. The Institute of Astronomy of the RAS approaches the next anniversary in the status of a scientific and educational center of world-class level.





Участники Пленума Астрономического совета АН СССР, Бюраканская обсерватория АН Армянской ССР, 1971 г. / Participants of the AstroCouncil Plenum, Byurakan Observatory of the Armenian Academy of Sciences, 1971



Выставка «Космос-2000», Диполи, Финляндия, 1984 г. Визит на выставку Президента Финляндии Мауно Койвисто / "Kosmos-2000" exhibition in Dipoli, Finland. A visit of the Finland President Mauno Koivisto



Звенигородская научная станция Астросовета / Zvenigorod Science Base of the AstroCouncil



Медаль Астрономического совета АН СССР / Medal of the Astronomical Council of the USSR AS

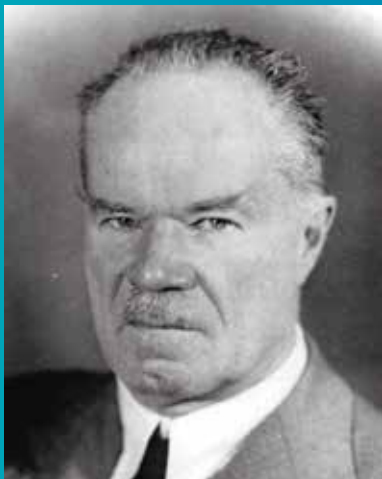


Вернер фон Браун на выставке «Экспо-67» (Монреаль, Канада) / Wernher von Braun at Expo-67 exhibition, Montreal, Canada

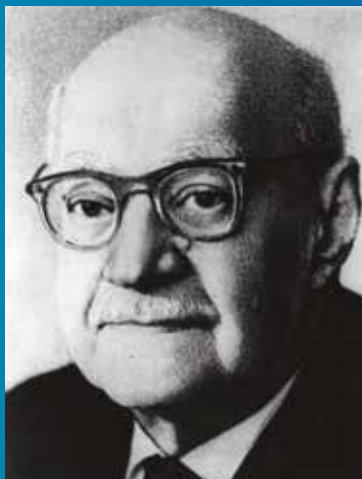


Заседание Ученого совета Астросовета в Звенигородской обсерватории / A meeting of the academic council of the AstroCouncil at the Zvenigorod Observatory





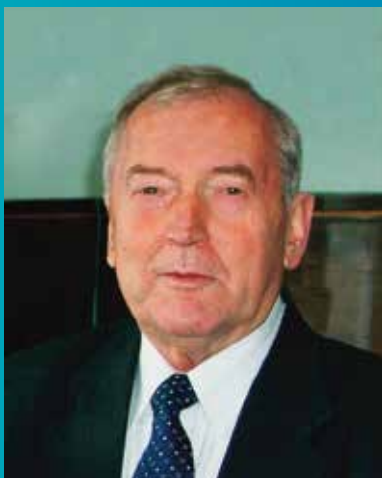
*Академик АН СССР В.Г. Фесенков /  
Academician of the USSR AS  
V.G. Fesenkov*



*Академик АН СССР А.А. Михайлов /  
Academician of the USSR AS  
A.A. Mikhailov*



*Чл.-корр. АН СССР Э.Р. Мустель /  
Corr. member of the USSR AS  
E.R. Mustel*



*Академик РАН А.А. Боярчук /  
Academician of the RAS  
A.A. Boyarchuk*



*Чл.-корр. РАН Б.М. Шустов /  
Corr. member of the RAS  
B.M. Shustov*



*Чл.-корр. РАН Д.В. Бисикало /  
Corr. member of the RAS  
D.V. Bisikalo*



## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И СТРУКТУРА ИНСТИТУТА MAIN SCIENTIFIC ACTIVITIES AND STRUCTURE OF THE INSTITUTE

Основная деятельность Института астрономии — выполнение фундаментальных научных исследований и прикладных разработок в области астрономии. Институт имеет лицензии на проведение космических исследований и образовательной деятельности.

Главные направления исследований в ИНАСАН — физика звездных атмосфер, теоретические проблемы физики и эволюции звезд, звездных систем и межзвездной среды, нестационарные звезды, физика гравитирующих звездных и планетных систем, информационное обеспечение астрономических исследований (банки астрономических данных), теоретические и прикладные проблемы астрометрии, геодинимики и геофизики, методы наблюдений искусственных и естественных небесных тел, внеатмосферная астрономия. Более конкретно тематика последних лет выглядит так:

- Исследование малых небесных тел искусственного и естественного происхождения и динамических процессов в Солнечной системе, включая проблемы астероидно-кометной опасности;
- Определение динамических параметров Земли по данным наблюдений ИСЗ;
- Экзопланеты и их атмосферы, горячие короны Земли, планет и спутников Солнечной системы;
- Ранние стадии образования звездных и планетных систем;
- Астрохимия межзвездной среды;
- Спектральные исследования звезд;
- Комплексное исследование переменных звезд;
- Численное моделирование процессов во взаимодействующих двойных звездах;
- Динамика астрофизических дисков;
- Моделирование основных свойств ансамблей одиночных и двойных звезд Галактики и галактических структур;
- Создание новых и сбор информации о существующих архивах астрономических данных;
- Методы и инструменты астрономических наблюдений;
- Внеатмосферная астрономия.

К наиболее крупным научно-техническим проектам, выполняющимся в Институте в рамках Федеральной космической программы РФ, относится международный (при ведущей роли России) проект Спектр-УФ (международное название «Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет, World Space Observatory-Ultraviolet»). Институт астрономии РАН — головная научная организация проекта. Научный руководитель проекта — член-корр. РАН Б.М. Шустов, координатор — д.ф.м.н. М.Е. Сачков. Институт астрономии также активно участвует в деятельности по контролю космического пространства и в исследовании вопросов астероидно-кометной опасности.

В структуру Института астрономии входят восемь основных научных подразделений: Отдел исследований Солнечной системы (рук. д.ф.-м.н. В.И. Шематович), Отдел нестационарных звезд и звездной спектроскопии (рук. д.ф.-м.н. Л.И. Машонкина), Отдел физики и эволюции звезд (рук. д.ф.-м.н. Д.З. Вибе), Отдел физики звездных систем (рук. д.ф.-м.н. О.Ю. Малков), Отдел экспериментальной астрономии (рук. д.ф.-м.н. М.Е. Сачков), Звенигородская обсерватория (рук. к.ф.-м.н. С.И. Барабанов), Симеизская обсерватория (рук. группы И.В. Николенко), Терскольский филиал (рук. д.ф.-м.н. В.К. Тарадий).

По данным на ноябрь 2021 г. в Институте работает 89 на-

The main activity of the Institute of Astronomy is the implementation of fundamental scientific research and applied developments in the field of astronomy. The Institute is licensed to conduct space research and educational activities.

The main areas of research at INASAN are physics of stellar atmospheres, theoretical problems of the physics and evolution of stars, stellar systems and the interstellar medium, nonstationary stars, physics of gravitating stellar and planetary systems, information support for astronomical research (astronomical data banks), theoretical and applied problems of astrometry, geodynamics and geophysics, methods of observations of artificial and natural celestial bodies, extra-atmospheric astronomy. More specifically, the highlights of recent years are the following:

- Study of minor celestial bodies of artificial and natural origin and dynamic processes in the Solar System, including the problems of asteroid-comet hazard;
- Determination of the dynamic parameters of the Earth based on data from satellite observations;
- Exoplanets and their atmospheres, hot corona of the Earth, planets and their satellites in the Solar System;
- Early stages of the formation of stellar and planetary systems;
- Astrochemistry of the interstellar medium;
- Spectral studies of stars;
- Comprehensive study of variable stars;
- Numerical modeling of processes in interacting binary stars;
- Dynamics of astrophysical disks;
- Modeling the main properties of ensembles of single and double stars in the Galaxy and galactic structures;
- Gathering information on existing archives of astronomical data and creation of new archives;
- Methods and tools for astronomical observations;
- Extra-atmospheric astronomy.

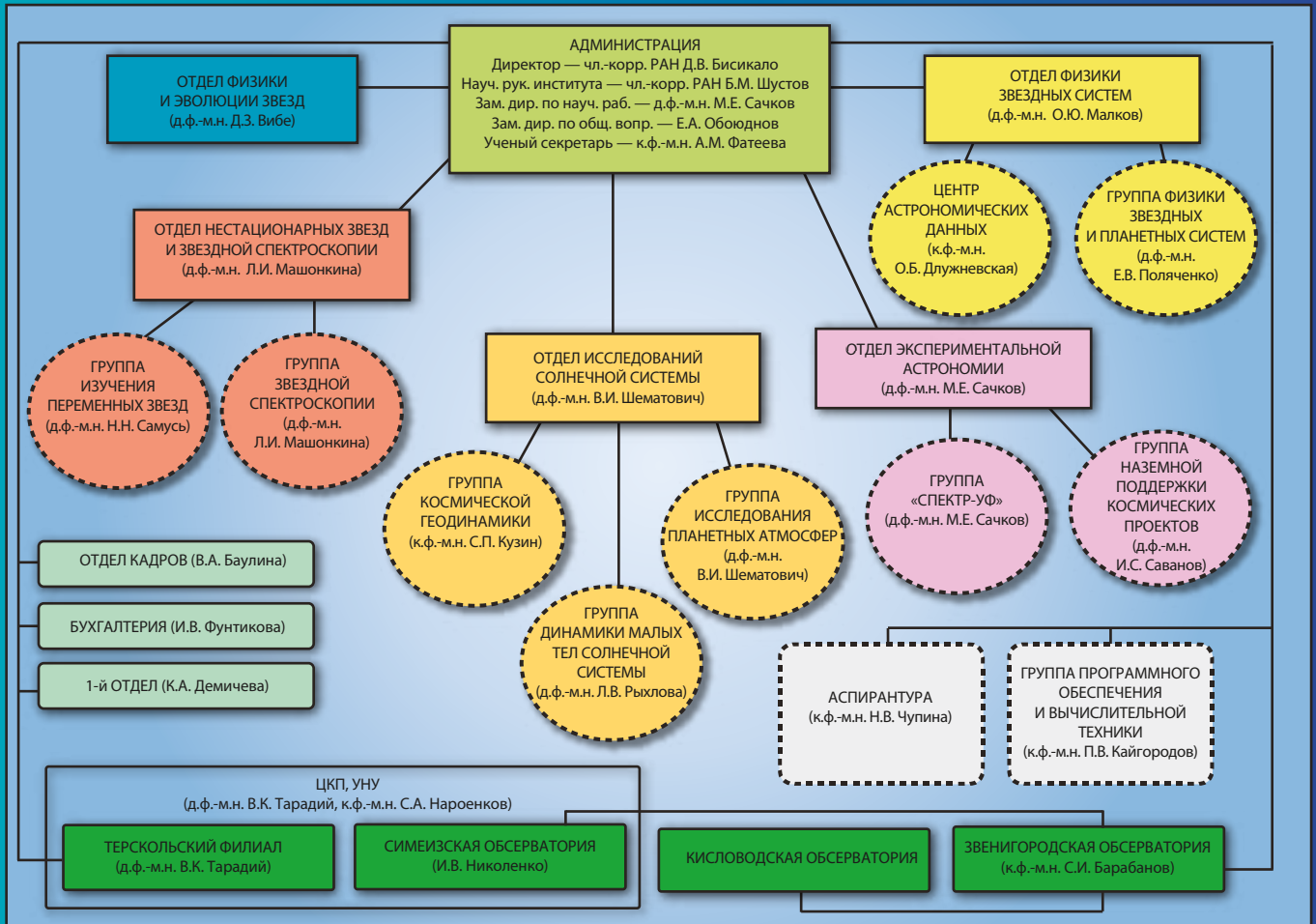
One of the largest scientific and technical projects carried out at the Institute within the framework of the Federal Space Program of the Russian Federation is the international (lead by Russia) project Spektr-UF (internationally called World Space Observatory-Ultraviolet). The Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences is the principal scientific organization of the project. Corresponding member of the RAS B.M. Shustov is a scientific supervisor of the project. The coordinator of it is Doctor of Sciences M.E. Sachkov. Moreover, the Institute of Astronomy is actively involved in space control activities and in the study of asteroid-comet hazard issues.

The structure of the Institute of Astronomy includes eight main scientific subdivisions: the Department of Research of the Solar System (headed by D.Sc. V.I. Shematovich), the Department of Nonstationary Stars and Stellar Spectroscopy (headed by D.Sc. L.I. Mashonkina), Department of Physics and Evolution of Stars (headed by D.Sc. D.S. Wiebe), Department of Physics of Stellar Systems (headed by D.Sc. O.Yu. Malkov), Department of Experimental Astronomy (headed by D.Sc. M.E. Sachkov), Zvenigorod Observatory (headed by S.I. Barabanov), Simeiz Observatory (headed by I.V. Nikolenko), Terskol Observatory (headed by D.Sc. V.K. Taradiy).

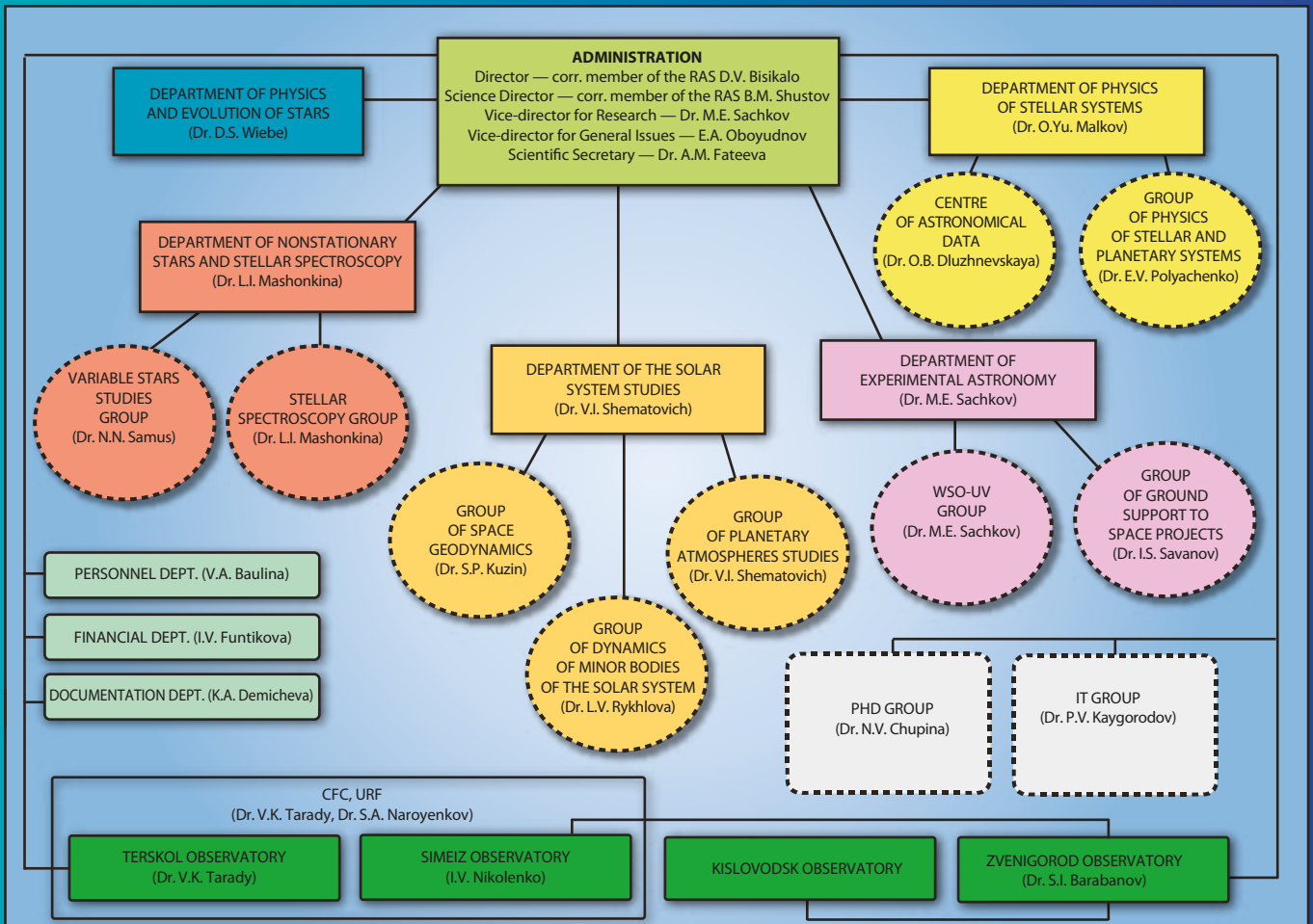
By November 2021, the Institute employs 89 research scientists, including two corresponding members of the Russian Academy of Sciences, 22 full doctors of sciences, 42 doctors of philosophy. Seven employees have the title of professor, six are associate professors. About a third (31%) of



# СТРУКТУРА ИНАСАН



# INASAN STRUCTURE





учных сотрудников, в том числе два члена-корреспондента РАН, 22 доктора наук, 42 кандидата наук. Семь сотрудников имеют звание профессора, шесть — доцента. Возраст примерно трети (31%) научных сотрудников не превышает 35 лет, при этом 13 из них уже обладают научными степенями. Общая нормативная штатная численность института составляет 148 человек (из них 33 — в Терскольском филиале).

Наличие высококвалифицированного персонала позволяет Институту на мировом уровне решать многие фундаментальные и прикладные задачи современной астрономии. Число публикаций в престижных рецензируемых международных и российских научных журналах за период 2011–2015 гг. превышает четыре с половиной сотни (по статистике Web of Science) и вдвое больше, если учитывать отечественные издания, не входящие в список Web of Science. Кроме того, каждый год издается одна-две монографии и/или тематические сборники научных статей и обзоров. Институт является учредителем двух научных журналов — «Астрономического журнала» и «Научных трудов Института астрономии РАН».

Исследования сотрудников поддерживаются грантами Президента РФ, фондов РФФИ, РФФИ, DFG (Германия), NSF (США) и др. Сотрудники Института имеют значительное количество государственных (ордена, медали, звания «Заслуженный деятель науки») и ведомственных наград (премии и почетные награды РАН и Роскосмоса). Ряд сотрудников ИНАСАН получали благодарность Президента РАН, Почетные грамоты Президиума РАН. Многие сотрудники Института являются членами международных академий и научных обществ, в том числе Европейского астрономического общества и Международного астрономического союза.

the research workers are under 35, with 13 of them possessing the PhD degree. The total staff of the institute is 148 employees (of which 33 belong to Terskol Observatory).

The presence of highly qualified personnel allows the Institute to work on many fundamental and applied problems of present-day astronomy at the world-class level. The number of publications in prestigious peer-reviewed international and Russian scientific journals for the period 2011–2015 exceeds four and a half hundred (according to Web of Science statistics) and twice this number, if we take into account domestic publications not included in the Web of Science list. In addition, one or two monographs and/or thematic collections of scientific articles and reviews are published each year. The Institute is the founder of two scientific journals, “Astronomicheskij Zhurnal” and “INASAN Science Reports”.

Research projects conducted by the scientists of INASAN are supported by grants from the President of the Russian Federation, the RFBR funds, the Russian Science Foundation, DFG (Germany), NSF (USA) and others. The staff of the Institute has a significant number of state (orders, medals, titles “Honored Scientist”) and departmental awards (prizes and honorary awards of the Russian Academy of Sciences and Roscosmos). A number of INASAN scientists received a Gratitude from the President of the Russian Academy of Sciences, Honorary Diplomas of the Presidium of the Russian Academy of Sciences. Many researchers of the Institute are members of international academies and scientific societies, including the European Astronomical Society and the International Astronomical Union.

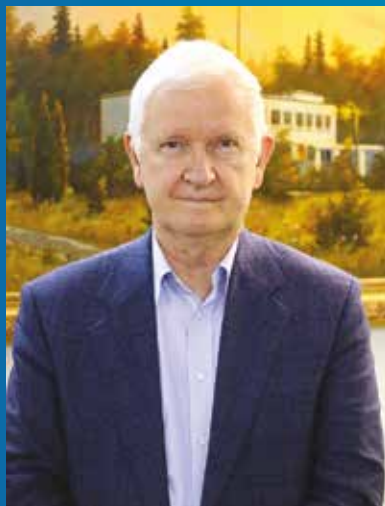
## МАТЕРИАЛЬНАЯ БАЗА ИССЛЕДОВАНИЙ RESEARCH FACILITIES OF THE INSTITUTE

Институт астрономии оснащен современным научным оборудованием: имеются уникальные астрономические установки и вычислительная техника, обеспечивающие высокий уровень научных исследований. Институт располагает четырьмя наблюдательными базами — Звенигородской обсерваторией, Терскольским филиалом, Симеизской обсерваторией и Кисловодской обсерваторией. Установленное на них оборудование позволяет проводить наблюдения искусственных и естественных небесных тел в околоземном пространстве, а также астрофизические наблюдения. Для проведения численного моделирования используется вычислительный кластер, основанный на использовании компьютеров с параллельной архитектурой. Первый его вариант заработал в 2001 г. — существенно раньше, чем во всех других научных учреждениях Отделения физических наук РАН. Локальная информационная сеть ИНАСАН включает в себя серверный парк из 8 серверов и около 80 пользовательских компьютеров. В Институте астрономии РАН имеется солидная библиотека — отдел Библиотеки по естественным наукам РАН. Фонд библиотеки насчитывает около 65 тыс. единиц хранения. Помимо печатных версий журналов, сотрудники института имеют доступ к электронным версиям основных профессиональных периодических изданий.

The Institute of Astronomy is equipped with modern scientific instrumentation. There are unique astronomical instruments and computational facilities allowing the Institute to carry out research activities at the high level. The Institute has four observational sites, Zvenigorod Observatory, Terskol Observatory, Simeiz Observatory, and Kislovodsk Observatory. These facilities allow observing artificial and natural celestial objects and performing astrophysical investigations. For numerical simulations researchers of the Institute can use the computer cluster based on the computers with parallel architecture. The first version of the cluster appeared in INASAN in 2001, much earlier than in other academic institutions that are under supervision of the Department of Physical Sciences of the Russian Academy of Sciences. The local network at the headquarter of the Institute in Moscow includes 8 servers and about 80 personal computers. The Institute has a considerable library, that is a branch of the Library for Natural Sciences of the Russian Academy of Sciences (LNS RAS). The collection of the library contains about 65000 items. The staff members of the Institute have an access to hard copies and to electronic versions of all the main professional periodicals.



Зам. директора по научной работе  
д.ф.-м.н. М.Е. Сачков / Vice-director Dr.  
M.E. Sachkov



Научный руководитель института  
чл.-корр. РАН Б.М. Шустов /  
Science director corr. member of the  
RAS B.M. Shustov



Зам. директора по общим  
вопросам Е.А. Обоюднов /  
Vice-director E.A. Oboydnov



Ученый секретарь  
к.ф.-м.н. А.М. Фатеева / Scientific  
secretary Dr. A.M. Fateeva



Ученый секретарь Национального  
комитета российских астрономов  
к.ф.-м.н. Д.А. Ковалева / Scientific  
secretary of the National Committee of  
Russian astronomers Dr. D.A. Kovaleva



Зав. канцелярией О.Н. Антонова /  
Head of the office O.N. Antonova



Главный бухгалтер И.В. Фунтикова /  
Chief accountant I.V. Funtikova



Нач. РСО К.А. Демичева / Head of  
Documentation department  
K.A. Demicheva



Нач. отдела кадров В.А. Баулина /  
Head of Personnel Department  
V.A. Baulina





Зав. отделом физики звездных систем д.ф.-м.н. О.Ю. Малков / Head of Stellar Systems Department Dr. O.Yu. Malkov



Зав. отделом нестационарных звезд и звездной спектроскопии д.ф.-м.н. Л.И. Машонкина / Head of Department of Nonstationary Stars and Stellar Spectroscopy Dr. L.I. Mashonkina



Зав. отделом физики и эволюции звезд д.ф.-м.н. Д.З. Вибе / Head of Stellar Physics and Evolution Department Dr. D.S. Wiebe



Зав. отделом исследований Солнечной системы д.ф.-м.н. В.И. Шематович / Head of the Solar System Research Department Dr. V.I. Shematovich



Рук. группы изучения переменных звезд д.ф.-м.н. Н.Н. Самусь / Head of the variable star studies group Dr. N.N. Samus



Зав. отделом экспериментальной астрономии д.ф.-м.н. М.Е. Сачков / Head of Experimental Astronomy Department Dr. M.E. Sachkov



Рук. группы ПО и ВТ к.ф.-м.н. П.В.Кайгородов / Head of the IT Group Dr. P.V. Kaygorodov



Зав. аспирантурой к.ф.-м.н. Н.В. Чупина / Head of the PhD Group Dr. N.V. Chupina



Рук. Центра астрономических данных к.ф.-м.н. О.Б. Длужневская / Head of the Center for Astronomical Data Dr. O.B. Dluzhnevskaya

Институт астрономии РАН осуществляет координацию по крупному международному проекту «Всемирная космическая обсерватория — Ультрафиолет» (внутреннее название «Спектр-УФ»), являясь головной научной организацией. На базе института функционирует секция «Внеатмосферная астрономия» Совета РАН по космосу и секция КНТС Роскосмоса по той же тематике, а также Экспертная рабочая группа по космическим угрозам при Совете РАН по космосу.

ИНАСАН — ведущая организация по проекту «Российская виртуальная обсерватория» (РВО). Этот проект представляет собой российскую составляющую глобального проекта «Международная виртуальная обсерватория», объединяющего в единую среду распределенные по всему миру астрономические архивы и базы данных, инструменты анализа и вычислительный сервис. РВО — национальный элемент одного из важнейших международных научных проектов.

В рамках соглашения между ИНАСАН, Национальным географическим институтом и Комитетом по космическим исследованиям Франции ведутся научно-исследовательские работы по проекту DORIS и регулярная обработка измерений спутниковой системы GPS.

Полученные сотрудниками ИНАСАН на обсерваториях в Симеизе и Терсколе данные наблюдений астероидов регулярно передаются в банк данных Международного центра малых планет (ЦМП). Обе обсерватории входят в список ЦМП.

Важным проектом для ИНАСАН является создание совместной Российско-Кубинской обсерватории на территории Республики Куба. К настоящему времени ИНАСАН совместно с Институтом геофизики и астрономии (ИГА) Республики Куба создал на территории ИГА небольшую обсерваторию с широкоугольным 20-см телескопом. Телескоп, в основном, используется в образовательных целях для практики молодых кубинских специалистов, но на нем проводятся также научные наблюдения, в первую очередь, требующие получения длительных рядов фотометрических данных. Объекты наблюдаются телескопами на территории России, а затем наблюдения продолжаются на телескопе на Кубе. Как и многие современные инструменты, этот телескоп полностью роботизирован, наблюдения проводятся без участия оператора. В планах Российско-Кубинской обсерватории установка метрового широкоугольного телескопа как части сети телескопов ИНАСАН для задач мониторинга околоземного пространства.

На базе ИНАСАН функционирует Национальный комитет российских астрономов (НКРА), осуществляющий координацию участия российских ученых в деятельности Международного астрономического союза. В состав НКРА входят руководители ведущих астрономических учреждений России, а возглавляется он председателем комитета. С 1991 по 2015 г. эту должность занимал академик А.А. Боярчук. С 2015 г. главой НКРА является чл.-корр. РАН Б.М. Шустов.

Сотрудники ИНАСАН принимают участие в научно-организационной работе по линии комиссий и дивизионов Международного астрономического союза. Членами МАС являются 38 сотрудников ИНАСАН. Многие из них занимали или занимают руководящие роли в этой крупнейшей научной организации — от вице-президентов и председателей комиссий до президента МАС (акад. А.А. Боярчук в 1991–1994 гг.). На XXIX Генеральной ассамблее МАС в Гоно-

ИНАСАН coordinates a large international project “World Space Observatory – Ultraviolet” (“Spektr-UF”), being the principal scientific organization. A section “Extra-atmospheric astronomy” of the RAS Council for space and a section of the STAC of Roscosmos on the same topic, as well as the Expert Working Group on Space Hazards under the RAS Council for Space, exist on the basis of the institute.

ИНАСАН is the leading organization for the Russian Virtual Observatory (RVO) project. This project is a Russian component of the global project “International Virtual Observatory”, which combines astronomical archives and databases, analysis tools and computing services distributed all over the world into a single environment. RVO is a national element of one of the most significant international scientific projects.

Within the framework of an agreement between ИНАСАН, the National Geographic Institute and the French Space Research Committee, works on the DORIS project are being conducted and regular processing of measurements from the GPS satellite system are being carried out.

The asteroid observational data obtained by the ИНАСАН staff at the Simeiz and Terskol observatories are regularly transferred to the databank of the International Astronomical Union Minor Planet Center (MPC). Both observatories are included in the MPC list.

Another important project for ИНАСАН is the creation of a joint Russian-Cuban observatory on the territory of Republic of Cuba. To date, ИНАСАН, together with the Institute of Geophysics and Astronomy (IGA) of Republic of Cuba, has created a small observatory with a 20-cm wide-angle telescope on the territory of the IGA. The telescope is mainly used for educational purposes for the practice of young Cuban specialists, but it also conducts scientific observations, primarily requiring long-term series of photometric data. Objects are observed by telescopes in Russia, and then the observations are continued with a telescope in Cuba. Like many modern instruments, this telescope is fully robotized, and observations are carried out without the participation of an operator. The plans of the Russian-Cuban Observatory include the installation of a 1-meter wide-angle telescope as part of the ИНАСАН telescope network for monitoring near-Earth space.

The National Committee of Russian Astronomers (NCRA) functions on the basis of ИНАСАН as well. It coordinates the participation of Russian scientists in the activities of the IAU. Members of the NCRA are the leaders of the principal astronomical institutions of Russia. The Committee is coordinated by the Chairman. From 1991 to 2015, this position was held by Academician A.A. Boyarchuk. Since 2015, the Chairman of the NCRA is Corresponding Member of the RAS B.M. Shustov.

Researchers of ИНАСАН take part in scientific and organizational work through the commissions and divisions of the International Astronomical Union. There are 38 members of the IAU in ИНАСАН. Many of them have taken or take leading roles in this largest scientific organization, from vice-presidents and chairmen of commissions to the President of the IAU (Academician A.A. Boyarchuk in 1991–1994). At the XXIX General Assembly of the IAU in Honolulu (USA, August 2015), Corresponding Member of the RAS B.M. Shustov was elected to be the Vice-President of the IAU. The current Director of ИНАСАН Corresponding Member of the RAS D.V. Bisikalo was the President of the IAU Commission



лулу (США, август 2015 г.) вице-президентом МАС был избран чл.-корр. РАН Б.М. Шустов. Директор ИНАСАН чл.-корр. РАН Д.В. Бисикало с 2018 по 2021 г. был президентом комиссии МАС «Вычислительная астрофизика».

Б.М. Шустов является представителем России в Координационном комитете международного проекта IAWN (International Asteroid Warning Network – Международная сеть предупреждения об опасных астероидах). О.Б. Длужневская — эксперт ЮНЕСКО по программе «Астрономия и всемирное наследие», О.Ю. Малков — член-представитель России в Международном альянсе «Виртуальная обсерватория» (IVOA).

В Институте астрономии РАН большое внимание уделяется подготовке молодых кадров. В 2003 г. в Институте был организован «Научно-исследовательский и образовательный центр экспериментальной астрономии», основными задачами которого являются обучение студентов и аспирантов работе с передовыми технологиями астрономических наблюдений на обсерваториях ИНАСАН и привлечение их к работе над разрабатываемыми в институте космическими проектами.

Центр тесно взаимодействует с астрономическими, физическими и химическими кафедрами вузов Москвы, Екатеринбурга, Казани, Челябинска, Ростова-на-Дону, Волгограда, Красноярска и др. В действующей при ИНАСАН аспирантуре обучается 15 аспирантов. Ежегодно проводится конференция молодых ученых. Сотрудники ИНАСАН активно участвуют в организации и проведении на базе Уральского федерального университета ежегодной всероссийской студенческой научной школы-конференции «Физика Космоса».

Сотрудники института читают лекции студентам Московского государственного университета и Московского физико-технического института. Сотрудники института ведут широкую научно-популяризаторскую деятельность, регулярно выступают в СМИ (по телевидению, на радио, в газетах и других массовых и научно-популярных печатных и электронных изданиях) с информацией об астрономических событиях и современных научных достижениях. В Звенигородской обсерватории ИНАСАН регулярно проводятся экскурсии для школьников, студентов и преподавателей, участников астрономических кружков домов и дворцов детского (юношеского) творчества.

ИНАСАН является учредителем старейшего профессионального астрономического издания России — «Астрономического журнала». Главным редактором журнала является чл.-корр. РАН Д.В. Бисикало, ответственный секретарь редколлегии — д.ф.-м.н. Д.З. Вибе. Сотрудники Института участвуют в работе редколлегии и других астрономических изданий («Астрономический вестник», «Письма в Астрономический журнал», «Переменные звезды», «Астрофизика», «Вестник НПО им. С.А.Лавочкина», «Астрономический циркуляр», «Природа», «Земля и Вселенная», «Astronomical and Astrophysical Transactions», «Research in Astronomy and Astrophysics»), а также регулярно привлекаются в качестве рецензентов редколлегии отечественных и ведущих международных изданий.

“Computational Astrophysics” from 2018 to 2021.

B.M. Shustov is the representative of Russia in the Steering Committee of the international project IAWN (International Asteroid Warning Network). O. B. Dluzhnevskaya is the UNESCO expert on the program “Astronomy and World Heritage”, O.Yu. Malkov is a member-representative of Russia in the International Virtual Observatory Alliance (IVOA).

Great attention is paid to the training of young researchers at the Institute. In 2003, the Institute organized the “Research and Educational Center for Experimental Astronomy”, with the main goals to teach students and postgraduates to work with advanced technologies of astronomical observations at INASAN observatories and to involve them into space projects being developed at the Institute.

The Center closely interacts with the astronomical, physical, and chemical departments of universities in Moscow, Yekaterinburg, Kazan, Chelyabinsk, Rostov-on-Don, Volgograd, Krasnoyarsk, etc. Currently there are 15 postgraduate students studying at INASAN. Every year INASAN holds a conference of young scientists. INASAN employees are actively involved in organizing and holding the annual all-Russian student scientific school-conference “Physics of Space” on the basis of the Ural Federal University.

Scientists of the Institute give lectures to students of Moscow State University and Moscow Institute of Physics and Technology. Also they are engaged in extensive scientific and popularization activities, regularly appear in the media (on television, on radio, in newspapers and other mass and popular scientific printed and electronic publications) commenting on various astronomical events and scientific achievements. The Zvenigorod observatory of INASAN regularly organizes excursions for schoolchildren, students and teachers, members of astronomical clubs.

INASAN is a co-founder of the oldest professional astronomical journal in Russia, “Astronomicheskij Zhurnal”. The editor-in-chief of the journal is Corresponding Member of the RAS D.V. Bisikalo, and Doctor of Physical and Mathematical Sciences D.S. Wiebe is its coordinating editor. Researchers of the Institute participate in the work of editorial boards of various astronomical journals (“Solar System Research”, “Astronomy Letters”, “Variable Stars”, “Astrophysics”, “Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina”, “Astronomical Circular”, “Priroda”, “Zemlya i Vselennaya”, “Astronomical and Astrophysical Transactions”, “Research in Astronomy and Astrophysics”), and are regularly recruited as reviewers by the editorial boards of Russian and leading international journals.

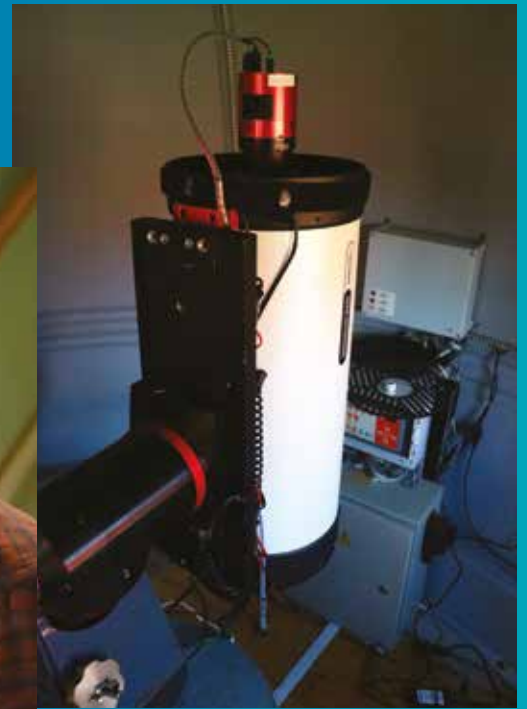
# ЗВЕНИГОРОДСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ / ZVENIGOROD OBSERVATORY



Камера ВАУ, на протяжении многих десятилетий использовавшаяся для наблюдений спутников / VAU camera that has been used over decades to observe satellites



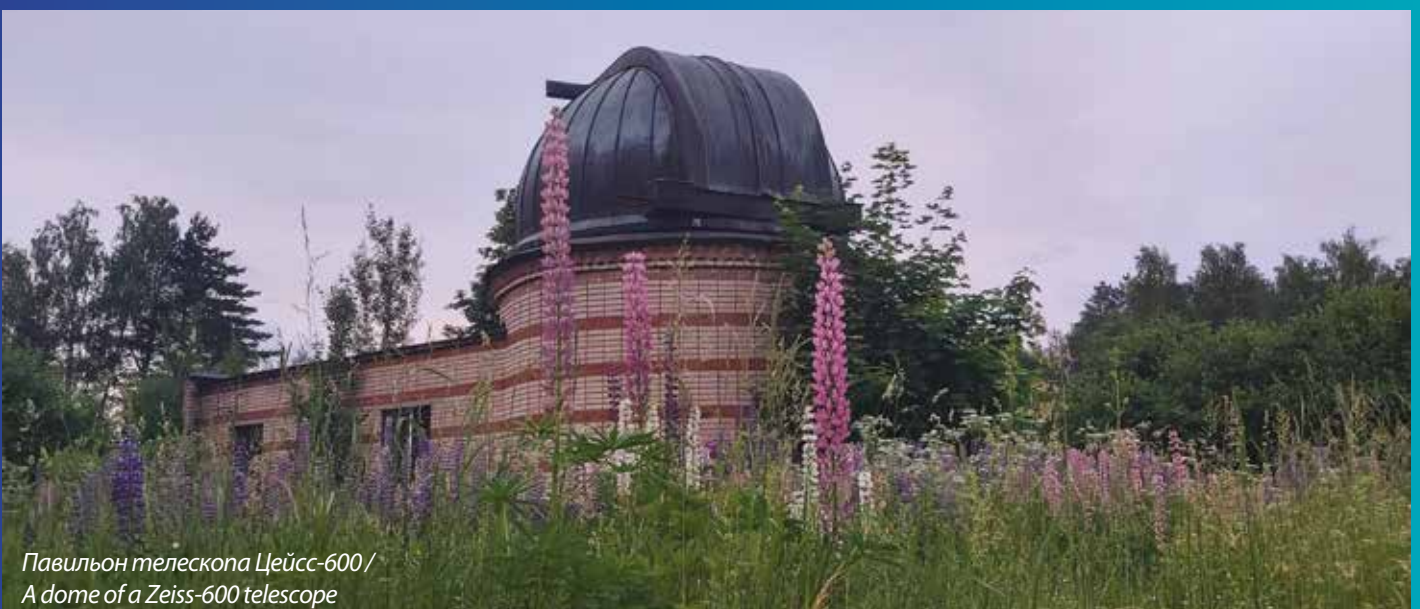
Зав. Звенигородской обсерваторией к.ф.-м.н. С.И. Барabanов / Head of Zvenigorod Observatory Dr.S.I. Barabanov.



Роботизированный телескоп с апертурой 279.4 мм и полем зрения  $3.3^{\circ} \times 2.2^{\circ}$  / A robotized telescope having an aperture of 279.4 mm and a field of view of  $3.3^{\circ} \times 2.2^{\circ}$



Публичные лекции и экскурсии во время дней открытых дверей / Public lectures and guided tours during open doors' event



Павильон телескопа Цейсс-600 / A dome of a Zeiss-600 telescope



Звенигородская обсерватория, долгие десятилетия служившая главной наблюдательной базой Астросовета (ИНАСАН), в последние годы играет важную роль центра разработки новых астрономических инструментов и экспериментальной базы их применения на практике. Большая часть новых приборов ИНАСАН сначала проходит отработку в обсерватории, и только затем устанавливается на отдаленных наблюдательных площадках. Для выполнения этих задач в Звенигородской обсерватории была создана и укомплектована новым современным оборудованием оптическая лаборатория. Здесь проводится сборка, наладка и юстировка разрабатываемых в ИНАСАН телескопов.

С 2019 г. сотрудники ИНАСАН совместно с сотрудниками Российского квантового центра проводят эксперимент по передаче квантовых состояний фотонов с использованием низкоорбитальных космических аппаратов. Эта технология имеет большой потенциал использования в самых разных областях науки и техники и является весьма перспективной, так как передача квантовых состояний по оптоволоконным линиям имеет существенные ограничения по дальности, не превышающей 100 км. Основным инструментом данного эксперимента является небольшой телескоп *Officina Stellare RC-600* на опорно-поворотном устройстве *ASA DDM160*. Результаты исследования станут заделом для создания системы передачи квантовых состояний по открытому оптическому каналу.

Результаты других исследований, полученные в Звенигородской обсерватории, используются в международных и общероссийских программах, в том числе в программе «Глобальная навигационная система» в рамках Международной GPS-службы для геодинамики, в федеральных программах прикладного назначения. В рамках международного сотрудничества проводится оцифровка фотопластинок, полученных за годы работы обсерватории (т.н. стеклянной библиотеки).

Звенигородская обсерватория служит базой для проведения практических занятий студентов и аспирантов астрономических специальностей (не только ИНАСАН, но и многих других исследовательских центров и вузов,) с целью подготовки к наблюдениям на телескопах в других обсерваториях. Два раза в год, весной и осенью, Звенигородская обсерватория открывает свои двери для всех желающих узнать о тайнах Вселенной, посмотреть на небо в телескоп, послушать интересные сведения об астрономических исследованиях и инструментах обсерватории. Как правило, эти «Дни открытых дверей» приурочены к астрономическим событиям или к знаменательным датам космической эры. Для образовательных учреждений — партнеров ИНАСАН (школа «Созвездие», Звенигородский дом детского творчества, Центр астрономического и космического образования ГБПОУ «Воробьевы горы» и др.) в обсерватории проводятся экскурсии и занятия по различным астрономическим темам.

У обсерватории есть серьезный потенциал развития. В частности, предполагается создание на ее базе элемента Наземного научного комплекса космического проекта «Спектр-УФ» — аппаратуры приема научных данных. ИНАСАН также планирует задействовать мощности обсерватории при работе над космическим проектом СОДА (Система обнаружения дневных астероидов).

For many decades the Zvenigorod observatory served as a main observational site of the AstroCouncil (INASAN). Nowadays it plays an important role being a center of the new astronomical instrument development and a test ground for their practical application. Most of the new INASAN instruments are first tested in the Zvenigorod observatory, and only then are installed at remote observation sites. The optical laboratory was created and equipped with new modern tools in order to accomplish these tasks. That is where the telescopes developed at INASAN are assembled, adjusted and fine-tuned.

Since 2019, employees of INASAN, together with employees of the Russian Quantum Center, conduct an experiment on the transfer of quantum states of photons using low-orbit spacecrafts. This technology has great potential for use in various fields of science and technology and is very promising, since the transmission of quantum states through fiber-optic lines has significant limitations in terms of the distance not exceeding 100 km. The main instrument of this experiment is a small *Officina Stellare RC-600* telescope on an *ASA DDM160* rotary support. The results of the study will become the basis for creating a system for the transfer of quantum states through an open optical channel.

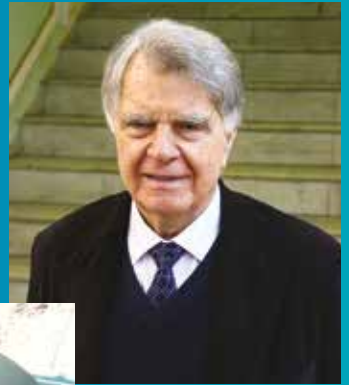
The results of other studies obtained at the Zvenigorod Observatory are used in international and all-Russian programs, including the Global Navigation System program within the framework of the International GPS Service for Geodynamics, and for applied purposes in federal programs. Within the framework of international cooperation, the digitalization of photographic plates obtained over the years of the observatory's operation (the so-called glass library) is being carried out. The Zvenigorod Observatory serves as a base for practical training for students and postgraduates of astronomical specialties (not only for INASAN, but also for many other research centers and universities) in order to get students prepared for performing observations with telescopes at other observatories.

Twice a year, in spring and autumn, the Zvenigorod Observatory opens its doors for everyone who wants to know the secrets of the Universe, to see the sky through a telescope or to learn about astronomical research and instruments of the observatory. Typically, these “Open Doors” days are timed to coincide with astronomical events or significant dates of the space age. For educational institutions that are partners of INASAN (school “Sozvezdiye”, Zvenigorod House of Children’s Creativity, Center for Astronomical and Space Education of the State Budgetary Educational Institution “Vorobyovy Gory”, etc.), the observatory organizes guided tours and classes on various astronomical topics.

The observatory has a significant potential for development. In particular, it is conceived as a base for an element of the Terrestrial Scientific Complex (the equipment for receiving scientific data) of the WSO-UV space project. INASAN also plans to use the facilities of the observatory when working on the SODA (Daytime Asteroid Detection System) space project.

## ТЕРСКОЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ / TERSKOL OBSERVATORY

Директор Терскольского  
филиала ИНАСАН  
д.ф.-м.н. В.К. Тарадий /  
Director of the INASAN Terskol  
Observatory Dr. V.K. Tarady



Телескоп Астросиб RC-500 F/8,  
совместный проект БНО ИЯИ РАН и  
ИНАСАН / Telescope Astrosib RC-500 F/8,  
joint project BNO INR RAS and INASAN



Основной инстру-  
мент Терскольского  
филиала Цейсс-2000 /  
The main instrument of  
Terskol Observatory  
Zeiss-2000

Большой горизонтальный солнечный телескоп АЦУ-26  
с пятикамерным спектрографом / The large horizontal  
solar telescope ACU-26 with a 5-camera spectrograph



Вид на Терскольскую обсерваторию /  
View of Terskol Observatory





Обособленное научное подразделение Института астрономии РАН на пике Терскол — Терскольский филиал (ТФ) ИНАСАН — было создано в 2005 г. и с тех пор успешно функционирует, выполняя фундаментальные, прикладные и поисковые астрономические исследования. Филиал совместно с Международным центром астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины (МЦ АМЭИ НАНУ) организовал широкое международное сотрудничество по научным программам, утверждаемым РАН, НАНУ и Международной ассоциацией академий наук (МААН). За прошедшие годы были успешно выполнены четыре международных научные программы астрономических исследований и принята уже пятая программа «Астрономия в Приэльбрусье. 2021–2025 гг.». В научной программе на 2021–2025 гг. участвуют 33 научные организации из 14 стран ближнего и дальнего зарубежья, в том числе России, Украины, Германии, Франции, Болгарии, Польши, Литвы, Таиланда и др.

Основным инструментом обсерватории является 2-метровый телескоп «Цейсс-2000». Его преимуществом по сравнению с другими приборами такого класса в Европе является то, что он установлен на существенно большей высоте в условиях относительно неплохого астроклимата. Благодаря этому телескоп предоставляет дополнительные возможности при проведении спектральных исследований, а также обладает большей проникающей способностью. Сравнительно большая апертура телескопа, высокая скорость работы прецизионных автоматических приводов и высокочувствительные приемники излучения позволяют успешно наблюдать точечные объекты слабее 23 звездной величины с позиционной ошибкой не более половины угловой секунды. Телескоп «Цейсс-2000» оснащен научным оборудованием для проведения многочисленных астрофизических исследований. На телескопе в настоящее время работают эшелле-спектрограф в фокусе «куда» (МАЭСТРО) с разрешающей способностью  $R = 60000$  в спектральном диапазоне 300–1000 нм; навесной многомодовый спектрометр в фокусе Кассегрена (MMCS) с разрешающей способностью  $R = 100, 1500, 5000, 13500$ ; шестиканальный апертурный поляриметр, ПЗС-камера FLI Cobalt 4320 с колесом фотометрических фильтров UBVR1, КМОП-камера FLI Kepler4040 BSI с колесом фильтров UBVR1.

Зеркальный телескоп «Цейсс-600» с диаметром зеркала 600 мм используется для фотометрических исследований переменных звезд и других небесных объектов, для изучения взаимных явлений в системах спутников больших планет, а также для наблюдений «космического мусора». Малые роботизированные телескопы Astrosib RC-500 и Celestron RASA 11" предназначены для мониторинга событий и явлений в космическом пространстве, в том числе для изучения оптических проявлений гамма-всплесков, а также для комплексных исследований околоземного пространства и наземной поддержки космических проектов. Преимуществом роботизированных систем является способность выполнять наблюдательные задачи либо совсем без участия оператора, либо с минимальным вмешательством человека в процесс наблюдения. Особенно ценно использование таких систем наблюдения в труднодоступных местах, например, высоко в горах либо в местах со сложными метеоусловиями, таких как Терскол.

Начиная с 2019 г., оборудование обсерватории было значительно модернизировано и пополнено благодаря грантовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. На обсерватории появились новые приемники излучений (ПЗС и КМОП-камеры), обновлены вспомогательные приборы.

A separate scientific subdivision of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences at the peak of Terskol — the INASAN Terskol Observatory — was established in 2005 and has been successfully operating since then, carrying out fundamental, applied and exploratory astronomical studies. In cooperation with the International Center for Astronomical, Medical and Ecological Research of the NAS of Ukraine (ICAMER NASU), the observatory has organized wide international cooperation on scientific programs approved by the RAS, NASU and the International Association of Academies of Sciences (IAAS). Over the past years, four international scientific programs of astronomical research have been successfully completed and the fifth program "Astronomy in the Elbrus region. 2021–2025" is being conducted. Thirty-three scientific organizations from 14 countries of the near and far abroad including Russia, Ukraine, Germany, France, Bulgaria, Poland, Lithuania, Thailand, etc. participate in the scientific program for 2021–2025.

The main instrument of the observatory is a 2-meter telescope Zeiss-2000. Its advantage over other devices of this class in Europe is that it is installed at a significantly higher altitude in a relatively good astroclimate. Thanks to this, the telescope provides additional opportunities for spectral studies, and also has greater limiting magnitude. The relatively large telescope aperture, high speed of precision automatic drives, and highly sensitive radiation detectors make it possible to successfully observe point sources fainter than 23 magnitudes with a positional error of no more than half an arc second. The Zeiss-2000 telescope is equipped with scientific instruments for carrying out numerous astrophysical studies. The telescope currently operates a coude echelle spectrograph (MAESTRO) with a resolution of  $R = 60000$  in the spectral range of 300–1000 nm; mounted multimode spectrometer in Cassegrain focus (MMCS) with resolution  $R = 100, 1500, 5000, 13500$ ; 6-channel aperture polarimeter, FLI Cobalt 4320 CCD camera with UBVR1 photometric filter wheel, FLI Kepler 4040 BSI CMOS camera with UBVR1 filter wheel.

The Zeiss-600 reflecting telescope with a mirror size of 600 mm is used for photometric studies of variable stars and other celestial objects, for studying mutual events in satellite systems of major planets, as well as for space debris observations. Small robotic telescopes Astrosib RC-500 and Celestron RASA 11" are designed to monitor events and phenomena in outer space, including the study of optical afterglow of gamma-ray bursts, as well as for comprehensive studies of near-Earth space and ground support of space projects. The advantage of robotic systems is the ability to perform observational tasks either completely without the participation of an operator, or with minimal human intervention in the observation process. The use of such observation systems in hard-to-reach places, for example, high in the mountains or in places with complicated weather conditions, such as Terskol, is especially valuable.

Since 2019, the equipment of the observatory has been significantly upgraded and replenished thanks to the grant support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. New radiation receivers (CCD and CMOS cameras) have appeared at the observatory, auxiliary devices have been renewed.

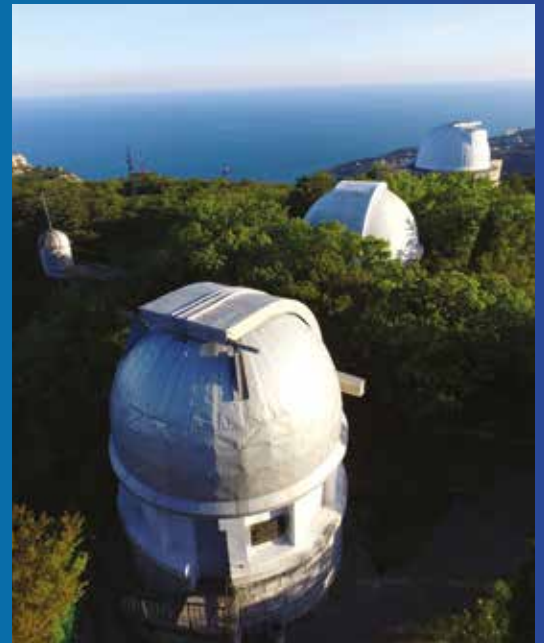
## СИМЕИЗСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ / SIMEIZ OBSERVATORY



Основной инструмент Симеизской обсерватории Цейсс-1000 /  
The main instrument of the Simeiz Observatory Zeiss-1000



Купол телескопа Цейсс-1000 / A dome of the Zeiss-1000 telescope



Вид на Симеизскую обсерваторию /  
A view of the Simeiz Observatory



Компактный спектрограф Baader  
BACHES среднего разрешения,  
установленный на телескопе  
Zeiss-1000 Симеизской  
обсерватории / A compact medium  
resolution spectrograph Baader  
BACHES installed on the Zeiss-1000  
telescope



## СИМЕИЗСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ SIMEIZ OBSERVATORY

Одной из важных наблюдательных площадок Института астрономии РАН является Симеизская обсерватория, расположенная рядом с поселком Симеиз в Крыму, на высоте 346 метров над уровнем моря. С 2019 г. ИНАСАН реализует программу развития обсерватории и модернизации ее научного оборудования. Проведены работы по обновлению системы управления телескопом «Цейсс-1000» и системы управления куполом, изготовлен новый редуктор фокуса, позволяющий увеличить поле зрения телескопа «Цейсс-1000» с 11' до 50', приобретена новая ПЗС-камера FLI PL16803 с колесом фотометрических фильтров системы SDSS и Джонсона-Казинса. Для проведения спектральных наблюдений телескоп «Цейсс-1000» оснастили двумя спектрографами — эшельным спектрографом «Baches» от Baader Planetarium со средним разрешением ( $R = 5000$  и  $18000$ ) и оптоволоконным спектрографом высокого разрешения ( $R = 40000$ ) со стокс-поляризметрической модой, изготовленным в САО РАН. В обсерватории размещен узел для Системы хранения данных Центра коллективного пользования ИНАСАН объемом 40 Тб. Проводятся работы по модернизации сетевой и электрической инфраструктуры обсерватории, установлена метеостанция, датчик облачности и всенебесная камера для определения метеопараметров и условий облачности на обсерватории.

В настоящее время в Симеизской обсерватории астрономами ИНАСАН, ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, ИМП РАН в сотрудничестве с иностранными учеными проводятся исследования по нескольким научным направлениям: измерения лучевых скоростей звезд, фотометрия переменных звезд и звезд в кратных системах, поляриметрия протяженных астрономических объектов, исследование орбитальных и физико-химических характеристик малых тел Солнечной системы, фотометрические исследования транзиентных событий.

One of the important observation sites of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences is the Simeiz Observatory, located near the town of Simeiz in Crimea, at an altitude of 346 meters above the sea level. Since 2019, INASAN has been implementing a program for the development of the observatory and the upgrade of its scientific equipment. Works on updating control systems of the Zeiss-1000 telescope and the dome were carried out. A new focus reducer was manufactured to increase the Zeiss-1000 telescope's field of view from 11' to 50'. A new FLI PL16803 CCD camera with SDSS and Johnson-Cousins photometric filter wheels was acquired. To carry out spectral observations, the Zeiss-1000 telescope was equipped with two spectrographs — the Baches echelle spectrograph from Baader Planetarium with a medium resolution ( $R = 5000$  and  $18000$ ) and a high-resolution fiber-optic spectrograph ( $R = 40000$ ) with a Stokes polarimetric mode manufactured at SAO RAS. The observatory hosts a 40 TB node for the Data Storage System of the INASAN Core Facility Center. Currently the works are carried out on modernization of the network and power supply infrastructure of the observatory. Also a meteorological station, a cloud sensor and an all-sky camera have been installed at the observatory to monitor meteorological parameters and cloud conditions.

Nowadays various studies in several astronomical areas are conducted at the observatory by researchers from INASAN, SAI MSU, IKI RAS and KIAM RAS with participation of foreign colleagues. These are measurements of radial velocities of stars, photometry of variable stars and stars in multiple systems, polarimetry of extended astronomical objects, study of orbital and physicochemical characteristics of small bodies in the Solar system, photometric studies of transient events.

## КИСЛОВДСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ KISLOVODSK OBSERVATORY

Перспективной площадкой для новых наблюдательных средств телескопов ИНАСАН в будущем станет Кисловодская обсерватория на плато Шатджатмаз. Эта местность характеризуется хорошим астроклиматом, что позволяет проводить наблюдения круглогодично.

В 2022 г. в обсерватории планируется установить два телескопа апертурой 50 см и широкоугольный робот-телескоп с апертурой 25 см. Телескопы будут работать в автоматическом или дистанционном режиме, без присутствия оператора на обсерватории.

Телескоп Astrosib RC-500 будет использоваться для проведения фотометрических исследований звезд, в том числе с экзопланетами. На телескопе «Сантел-500», ранее установленном в Звенигородской обсерватории ИНАСАН, будут проводиться поисковые наблюдения космических объектов сближающихся с Землей и техногенных объектов на околоземной орбите. Широкоугольный робот-телескоп на основе двух телескопов VT-78d позволит проводить обзоры небесной сферы для поиска неизвестных космических объектов и оптических транзиентов.

В состав научного оборудования Кисловодской обсерватории будет включен узел системы хранения данных объемом 55 Тбайт для хранения и обработки наблюдательного материала.

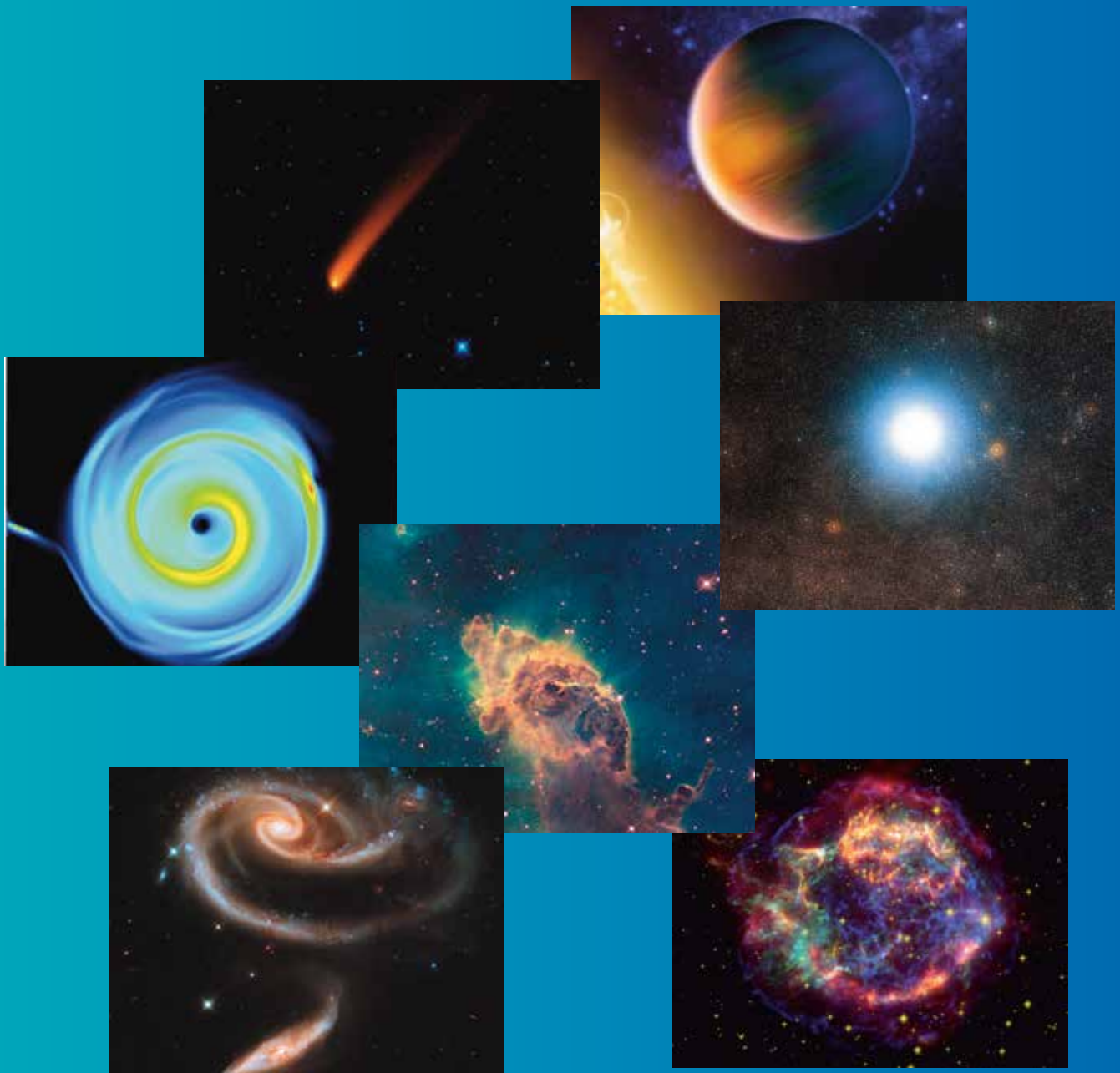
In the future, Kislovodsk Observatory on the Shatdzhatzmaz plateau will become a prospective site for new INASAN observational facilities. This area is characterized by a good astroclimate, which makes it possible to carry out observations all year round.

In 2022, it is planned to install two telescopes with apertures of 50 cm and a wide-angle robotic telescope with an aperture of 25 cm at the observatory. The telescopes will operate in automatic or remote mode, without requiring the presence of an operator at the observatory.

The Astrosib RC-500 telescope will be used for photometric studies of stars, including stars with exoplanets. The Santel-500 telescope, previously installed at Zvenigorod Observatory of INASAN, will perform search observations of Earth-approaching space objects and man-made objects in near-Earth orbit. The wide-angle robotic telescope based on two VT-78d telescopes will allow performing all-sky surveys to search for unknown space objects and optical transients.

The science equipment of Kislovodsk Observatory will include a 55 TB data storage system node for storing and processing observational data.

# НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ



# SCIENTIFIC TASKS



## СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА THE SOLAR SYSTEM



Исследования планет и малых тел Солнечной системы ведутся в ИНАСАН на протяжении многих лет. Их целью является получение новых знаний об объектах Солнечной системы и планетных систем у других звезд, их образовании и эволюции при помощи теоретических моделей и наблюдательных программ. В частности, исследуются процессы воздействия плазмы солнечного ветра на верхние атмосферы планет, сопровождающиеся авроральными явлениями (высыпание частиц с высокими кинетическими энергиями, полярные сияния, полярные ветры убегания нейтральных и ионизованных частиц и др.). Изучение этих явлений чрезвычайно важно, так как выпадающие частицы являются энергетическими агентами для атмосферы и уточнение их характеристик, а также соответствующего отклика атмосферы, позволит существенно продвинуться в понимании солнечно-планетных связей и космической погоды. Исследования движения и происхождения комет направлены на получение новых данных о динамических и физических характеристиках комет, исследование эволюции кометных орбит, изучение миграции комет из внешней части Солнечной системы в околоземное пространство, выяснение особенностей динамических процессов, которые привели к современной структуре транснептуновой зоны и облака Оорта.

Сотрудники, участвующие в работе по теме: А.А. Автаева, Е.С. Баканас, С.И. Барабанов, Н.С. Бахтигараев, Д.В. Бисикало, Г.Т. Болгова, В.В. Бусарев, В.В. Емельяненко, Н.Ю. Емельяненко, Р.В. Золотарев, М.А. Ибрагимов, Е.С. Калиничева, А.П. Карташова, А.А. Ключиков, С.П. Кузин, П.А. Левкина, В.А. Леонов, С.А. Нароенков, Л.В. Рылова, А.К. Терентьева, А.М. Фатеева, М.Л. Ходаченко, И.Н. Чувашев, В.И. Шематович, Б.М. Шустов, М.П. Щербина.

Работа проводится в сотрудничестве с Томским государственным университетом, Институтом лазерной физики СО РАН, Институтом космических исследований РАН, а также научными организациями Австрии, Бельгии, США и Швеции.

Investigations of planets and minor bodies of the Solar System have been carried out in INASAN for many years. The aim of the studies is to obtain new knowledge about the objects of the Solar System and planetary systems around other stars, about their formation and evolution, using theoretical models and observational programs. In particular, the processes of solar wind plasma influence on upper atmospheres of planets, accompanied by auroral phenomena (precipitation of particles with high kinetic energies, auroras, polar winds escape of neutral and ionized particles, etc.), are investigated. The study of these phenomena is extremely important, since precipitating particles are energy agents for the atmosphere, and the elaboration of their characteristics, as well as the corresponding response of the atmosphere, will make it possible to significantly advance our understanding of solar-planetary interaction and space weather. Studies of the motions and origin of comets are aimed at obtaining new data on the dynamic and physical characteristics of comets: evolution of their orbits, migration from the outer part of the Solar System to near-Earth space, clarifying the features of dynamic processes, having led to the modern structure of the trans-Neptunian zone and the Oort cloud.

Researchers involved in the studies: A.A. Avtaeva, E.S. Bakanas, S.I. Barabanov, N.S. Bakhtigaraev, D.V. Bisikalo, G.T. Bolgova, V.V. Busarev, V.V. Emel'yanenko, N.Yu. Emel'yanenko, R.V. Zolotarev, M.A. Ibragimov, E.S. Kalinicheva, A.P. Kartashova, A.A. Kluykov, S.P. Kuzin, P.A. Levkina, V.A. Leonov, S.A. Naroenkov, L.V. Rykhllova, A.K. Terentjeva, A.M. Fateeva, M.L. Khodachenko, I.N. Chuvashhev, V.I. Shematovich, B.M. Shustov, M.P. Shcherbina.

The studies are being carried on in collaboration with Tomsk State University, Institute of Laser Physics SBRAS, Space Research Institute as well as with scientific institutions of Austria, Belgium, USA, and Sweden.

## НАДТЕПЛОВЫЕ ЧАСТИЦЫ В АЭРОНОМИИ И АСТРОХИМИИ SUPRATHERMAL PARTICLES IN AERONOMY AND ASTROCHEMISTRY

В Институте астрономии РАН в рамках исследований по НИР АВРОРА Д.В. Бисикало и В.И. Шематовичем совместно с коллегами разработан кинетический метод Монте-Карло, позволивший на молекулярном уровне описания строго исследовать неравновесные процессы в газовых оболочках астрофизических объектов. В наших работах детально описан кинетический метод Монте-Карло (КММ-К) для исследования на молекулярном уровне описания роли надтепловых (горячих) частиц в аэрономии и астрохимии атмосферы планет и малых тел в Солнечной системе, и представлены полученные за последние годы новые разработки различных модификаций КММ-К, нацеленные на исследование роли надтепловых частиц в газопылевых оболочках, окружающих астрофизические объекты, — дозвездные и протозвездные ядра молекулярных облаков, планеты, их спутники и кометы в Солнечной и внесолнечных планетных системах. В астрохимических приложениях данного подхода показана важная роль фракции надтепловых частиц, наличие которой:

- приводит к локальным изменениям химического состава, так как неравновесные коэффициенты скоростей химических реакций (особенно с высокими энергиями активации) между надтепловыми частицами и окружающей газопылевой оболочкой намного выше, чем для химических реакций при тепловых энергиях;

- вызывает нетепловые свечения газопылевой оболочки;
- усиливает химический обмен между газовой и пылевой фракциями оболочки;

- приводит к образованию протяженных горячих корон у планет в Солнечной и внесолнечных системах, вызывает рост нетепловых атмосферных потерь, тем самым определяя эволюцию атмосферы планеты на астрономических масштабах времени;

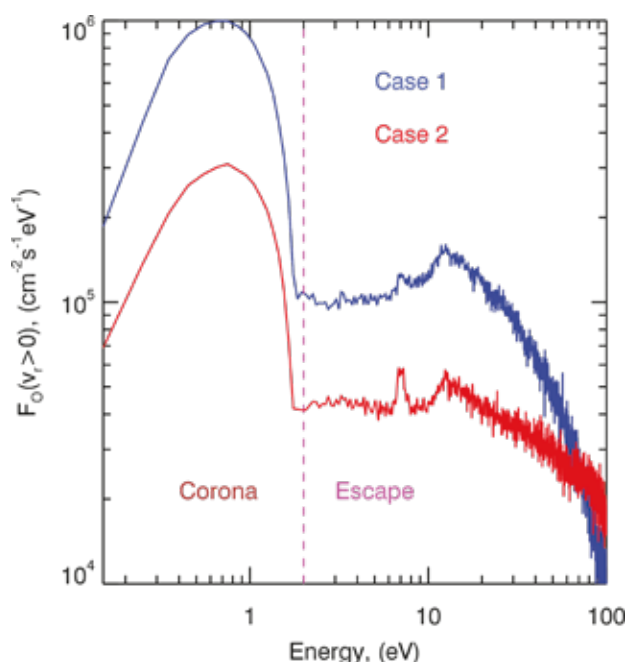
- способствует образованию сложных молекул в газовых и пылевых оболочках астрофизических объектов.

Например, в исследованиях потери атмосферы Марса был впервые исследован вклад процессов высыпания протонов и атомов водорода из солнечного ветра в образование фракции надтепловых атомов кислорода в короне Марса. В качестве источника горячих атомов кислорода рассмотрен процесс переноса импульса и энергии в упругих столкновениях между тепловыми атмосферными атомами кислорода, протонами, высыпаящимися в верхнюю атмосферу Марса, и атомами водорода с высокими кинетическими энергиями из плазмы солнечного ветра. Показано, что экзосфера планеты

At the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences D.V. Bisikalo, V.I. Shematovich and their colleagues are working on the research project AURORA. Within it the kinetic Monte Carlo method was developed, making it possible to rigorously study non-equilibrium processes in the envelopes of astrophysical objects at the molecular level. In our works, we describe the kinetic Monte Carlo method (KMM-K) for investigating the role of suprathermal (hot) particles at the molecular level in aeronomy and astrochemical processes occurring in the atmospheres of planets and small bodies in the Solar System. Also we present new modifications of KMM-K being developed in recent years. They are aimed to study the role of suprathermal particles in envelopes surrounding various astrophysical objects — prestellar and protostellar cores of molecular clouds, planets and their satellites and comets in the Solar and extrasolar planetary systems. In astrochemical applications of this approach, the important role of the fraction of suprathermal particles is shown. The presence of that fraction results in:

- leads to local changes in the chemical composition, since non-equilibrium rate coefficients of chemical reactions (especially with high activation energies) between suprathermal particles and the surrounding envelope are much higher than for chemical reactions at thermal energies;

- causes non-thermal glow of the envelope;
- enhances the chemical exchange between gas and dust fractions of the shell;



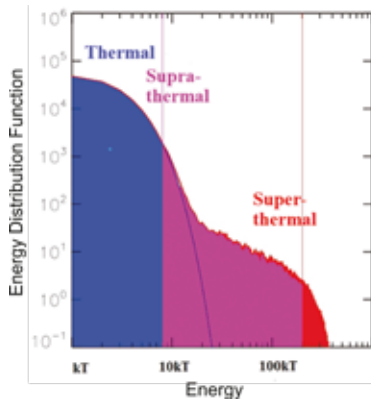
*Энергетические спектры восходящего потока атомов кислорода на высоте экзобазы Марса для различных условий высыпания плазмы солнечного ветра по данным КА NASA MAVEN. Поток уходящего потока расположен справа от прерывистой вертикальной линии / Energy spectra of the ascending flux of oxygen atoms at the altitude of the exobase of Mars for various conditions of solar wind plasma precipitation according to NASA MAVEN data. Escape fluxes are located to the right of the vertical discontinuous line*

- leads to the formation of extended hot corona near planets in the Solar and extrasolar systems, causes an increase in non-thermal atmospheric losses, thereby determining the evolution of the planet's atmosphere on astronomical time scales;
- promotes the formation of complex molecules in the envelopes of the astrophysical objects.

For example, in the studies of the atmospheric loss on Mars, the contribution of the processes of precipitation of protons and hydrogen atoms from the solar wind to the formation of a fraction of suprathermal oxygen atoms in the corona of the planet was first investigated. The source of hot oxygen atoms was considered to be the process of momentum and energy transfer in elastic collisions between thermal atmospheric oxygen atoms, protons precipitating into the upper atmosphere of Mars, and hydrogen atoms with high kinetic energies originating from the solar wind plasma. It is shown that the exosphere of the planet is populated by a significant number of suprathermal oxygen atoms



населяется значительным количеством надтепловых атомов кислорода с кинетическими энергиями вплоть до энергии убегания 2 эВ, т.е., формируется горячая кислородная корона Марса. Перенос энергии от выпадающих протонов и атомов из плазмы солнечного ветра к тепловым атомам кислорода приводит к образованию дополнительного нетеплового потока убегания атомарного кислорода из атмосферы Марса, который является доминантным в условиях экстремальных солнечных событий — солнечных вспышек и корональных выбросов массы, — как показали недавние наблюдения, полученные приборами на борту КА NASA MAVEN и КА РКА/ESA ExoMars TGO-2016.



Схематическое представление фракций тепловых, надтепловых и сверхтепловых частиц в газовых оболочках астрофизических объектов на примере верхней атмосферы Марса / Schematic representation of fractions of thermal, suprathermal and superthermal particles in the envelopes, on the example of the upper atmosphere of Mars

with kinetic energies up to an escape energy of 2 eV, i.e., a hot oxygen corona of Mars is formed. The transfer of energy from precipitating protons and atoms from the plasma of the solar wind to thermal oxygen atoms leads to the formation of an additional non-thermal escape flux of atomic oxygen. As shown by recent observations obtained by instruments on board of the NASA MAVEN and the Roscosmos/ESA ExoMars TGO-2016 spacecrafts, this escape flux is becoming dominant for the atmosphere of Mars in conditions of extreme solar events — solar flares and coronal mass ejections.

#### Основные публикации / Main publications

- V.I. Shematovich, Russian Chemical Reviews, 88, 1013 (2019)
- D.V. Bisikalo, V.I. Shematovich, Proceedings IAU Symposium No. 345, 168 (2020)
- V. Shematovich, D. Bisikalo, Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science. Oxford University Press (2021)
- V.I. Shematovich, E.S. Kalinicheva, Astron. Rep., 64, 628 (2020)

## АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ВЕРХНИХ АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ AURORAL PHENOMENA IN UPPER ATMOSPHERES OF TERRESTRIAL PLANETS

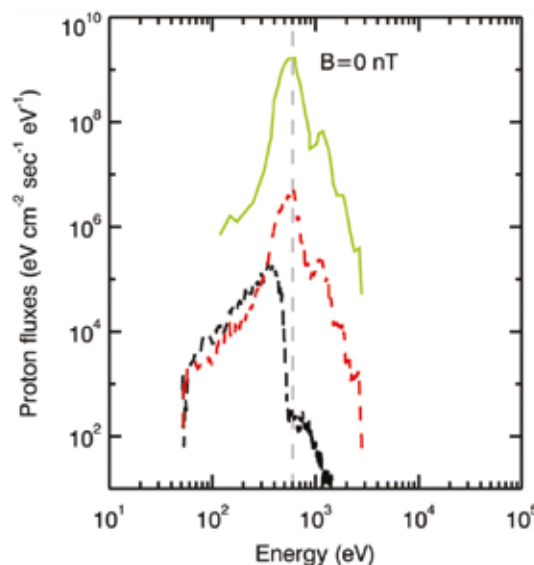
Моделирование процессов выпадения плазмы солнечного ветра в верхние атмосферы планет Солнечной системы проводятся в Институте астрономии РАН на протяжении последних 15 лет. Разработанные модели электронных и протонных полярных сияний использовались для исследования полярных сияний и интерпретации наблюдений в верхних атмосферах Земли (проект NASA IMAGE), Марса (проекты ESA Mars Express и NASA MAVEN), а также, для интерпретации полученных при помощи космического телескопа им. Хаббла наблюдений полярных сияний на планетах-гигантах Юпитере и Сатурне. В настоящее время наши кинетические модели процессов выпадения применяются для исследования различных типов (дискретных, диффузных и протонных) недавно открытых полярных сияний на Марсе, используя доступные данные наблюдений и измерений космических аппаратов ESA Mars Express и NASA MAVEN. Кроме того, исследуется влияние процессов выпадения на верхнюю и среднюю атмосферу Марса в рамках научной программы космического проекта Роскосмоса и ESA "ЭкзоМарс".

Впервые выполнено кинетическое моделирование протонной авроры на Марсе, открытой в наблюдениях КА. Использована усовершенствованная кинетическая модель Монте-Карло для расчетов выпадения протонов и

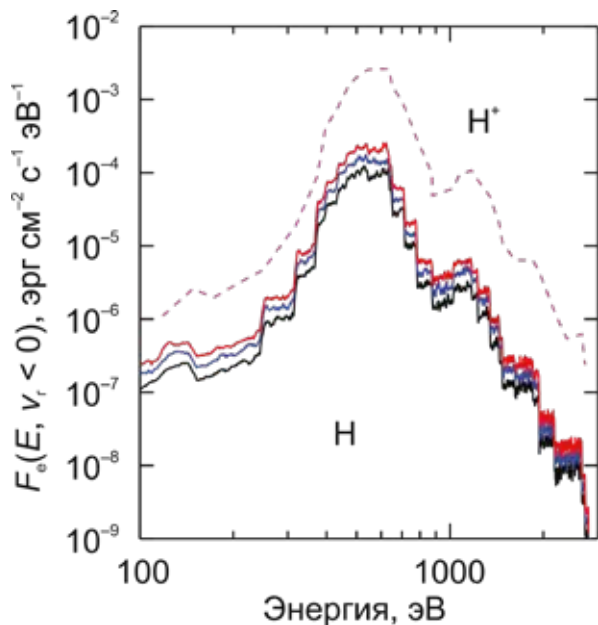
Modeling of solar wind plasma precipitation into the upper atmospheres of the planets of the Solar System has been carried out at the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences for past 15 years. The developed models of electron and proton auroras were used to study auroras and interpret observations in the upper atmospheres of the Earth (NASA IMAGE project) and Mars (ESA Mars Express and NASA MAVEN projects), as well as auroras on the giant planets Jupiter and Saturn obtained with the Hubble Space Telescope.

Currently, our kinetic models of precipitation processes are used to study various types of recently discovered auroras on Mars: discrete, diffuse, and proton — using the available observational and measurement data from the ESA Mars Express and NASA MAVEN spacecrafts. Besides, the influence of precipitation processes on the upper and middle atmosphere of Mars is being investigated within the framework of the scientific program of the Roscosmos and ESA space project "ExoMars".

Kinetic modeling of proton aurora on Mars, discovered by spacecraft observations, was first performed. An improved kinetic Monte Carlo model was used to calculate the precipitation of protons and hydrogen atoms with high energies into the atmosphere of Mars. Comparison of the calculations with the data collected with the Solar Wind Ion Analyzer (MAVEN / SWIA)



Расчетные восходящий (черная линия) и нисходящий (красная линия) потоки протонов на высоте 160 км для случая выпадения атомов водорода с энергетическим спектром солнечного ветра (зеленая линия) / The calculated ascending (black line) and descending (red line) fluxes of protons at an altitude of 160 km for the case of precipitation of hydrogen atoms with the energy spectrum of the solar wind (green line)



Энергетические спектры нисходящего потока атомов водорода, рассчитанные на границе индуцированной магнитосферы для разных значений лучевой концентрации атомарного водорода в короне Марса. Черной сплошной линией показан базовый расчет, синей и красной — варианты с увеличенной в 2 и 5 раз лучевой концентрацией водорода, соответственно. Линия малинового цвета показывает энергетический спектр потока протонов невозмущенного солнечного ветра на верхней границе модели 3000 км / *The energy spectra of the downward flux of hydrogen atoms calculated at the boundary of the induced magnetosphere for different values of column density of atomic hydrogen in the corona of Mars. The black solid line shows the basic calculation, the blue and the red ones show variants with the column density of hydrogen increased by 2 and 5 times, respectively. The pink line shows the proton flux energy spectrum of the unperturbed solar wind at the upper boundary of the model at 3000 km*

атомов водорода с высокими энергиями в атмосферу Марса. Сравнение расчетов с данными, собранными с помощью анализатора ионов солнечного ветра (MAVEN/SWIA), показывают, что модель Монте-Карло воспроизводит некоторые из измеренных потоков. Результаты сравнения расчетов и измерения потоков протонов на малых высотах позволяют сделать вывод об эффективности перезарядки между протонами солнечного ветра и протяженной водородной короной, если одновременно измеряется величина индуцированного магнитного поля. Также установлено, что индуцированное магнитное поле играет важную роль в формировании отраженного атмосферой потока протонов, в существенной степени контролируя его величину.

Проводятся исследования эффективности перезарядки протонов солнечного ветра в протяженной водородной короне Марса. Наличие регулярных вариаций плотности водорода в короне Марса известно давно и связывалось со сменой сезонов на Марсе. Однако недавно были обнаружены и спорадические изменения плотности в верхней атмосфере Марса, обусловленные различными процессами в подстилающей атмосфере, такими как открытые в наблюдениях КА Mars Express и КА Роскосмос/ESA ЭкзоМарс выбросы паров воды и ледяных частиц на высоты вплоть до 100 км вследствие глобальных пылевых бурь.

В расчетах при помощи разработанной нами кинетической Монте-Карло модели установлено, что при увеличении в 2 и 5 раз лучевой концентрации атомов H в короне Марса эффективность перезарядки также возрастает и достигает значений в 6% и 8%, соответственно, по сравнению с базовым значением 4%. Впервые показано, что энергетический спектр проникающих в атмосферу Марса атомов водорода остается идентичным по своей структуре спектру невозмущенных протонов солнечного ветра. Данные оценки совместно с разработанной ранее кинетической моделью выпадения протонов и атомов водорода в планетную атмосферу позволяют проследить все этапы проникновения протонов невозмущенного солнечного ветра в плотные слои атмосферы и провести интерпретацию наблюдаемых характеристик протонных сияний в зависимости от вариаций атомарного водорода в короне Марса.

shows that the Monte Carlo model reproduces some of the measured fluxes. The results of comparison of measured and calculated proton fluxes at low altitudes make it possible to make conclusions on efficiency of charge exchange between protons of the solar wind and an extended hydrogen corona in the case when the value of the induced magnetic field is measured simultaneously. It was also found that the induced magnetic field plays an important role in the formation of the flux of protons reflected by the atmosphere and significantly defines its value.

Also the team carries out investigations on the efficiency of solar wind proton charge exchange in the extended hydrogen corona of Mars. The presence of regular variations in the density of hydrogen in the corona of Mars has been known for a long time and was associated with the change of seasons on Mars. However, recently sporadic changes in density in the upper atmosphere of Mars were also detected. They are caused by various processes in the underlying atmosphere, such as ejections of water vapor and ice particles, caused by global dust storms, to the heights up to 100 km as discovered by Mars Express and the Roscosmos / ESA ExoMars observations.

Our kinetic Monte Carlo model calculations discovered that the increase of 2 and 5 times of column density of atoms of H in the corona of Mars, results in the increase of the charge exchange efficiency with the values of 6% and 8%, respectively; the baseline value is 4%. It was shown for the first time that the energy spectrum of hydrogen atoms penetrating into the Martian atmosphere remains identical in its structure to the spectrum of unperturbed solar wind protons. These estimates, together with the previously developed kinetic model of the precipitation of protons and hydrogen atoms into the planetary atmosphere, make it possible to trace all stages of the penetration of protons of the undisturbed solar wind into the dense layers of the atmosphere and to interpret the observed characteristics of proton auroras in correlation with the variations of atomic hydrogen in the corona of Mars.

#### Основные публикации / Main publications

- D.V. Bisikalo, V.I. Shematovich, J.-C. Gérard, B. Hubert, J. of Geophys. Res.: Space Phys., 123, 5850 (2018)  
 V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, Astron. Rep., 64, 863 (2020)  
 V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, A. G. Zhilkin, Astron. Rep., 65, 203 (2021)



## СБЛИЖЕНИЯ С СОЛНЦЕМ И ЭВОЛЮЦИЯ АСТЕРОИДОВ И КОМЕТ SOLAR ENCOUNTERS AND EVOLUTION OF ASTEROIDS AND COMETS

Изучена роль сближений с Солнцем в эволюции астероидов и комет. Из работ по динамике околоземных объектов известно, что практически все околоземные объекты в процессе эволюции проходят через околосолнечные состояния. Естественно предполагать, что малые тела испытывают большие изменения (и даже разрушение) вблизи Солнца вследствие очень больших приливных и тепловых воздействий, а также возможного взаимодействия с солнечной атмосферой.

Интерес к сближениям с Солнцем как возможному процессу, играющему главенствующую роль в физической эволюции околоземных объектов, значительно усилился после Челябинского события, поскольку сотрудниками ИНАСАН была установлена большая вероятность прохождения Челябинского объекта вблизи Солнца приблизительно 1 миллион лет назад. Для получения такого вывода была определена доатмосферная орбита этого объекта непосредственно на основе его астрометрических положений. Это позволило определить доверительную область для элементов орбиты и провести интегрирование уравнений движения в прошлом для большого числа виртуальных частиц с начальными орбитами из доверительной области. Было установлено, что более семидесяти процентов этих частиц в прошлом были на орбитах с перигелийными расстояниями менее 0.1 а.е. Наиболее вероятное время сближения Челябинского объекта с Солнцем, определенное из динамических соображений, находится в хорошем согласии с космическим возрастом Челябинского метеорита.

Исследованы динамические особенности процесса перехода околоземных объектов на орбиты с малыми перигелийными расстояниями. На коротких промежутках времени порядка тысяч лет эффективность таких переходов обеспечивается действием механизма вековых возмущений Лидова-Козаи, а на значительно более длительных промежутках времени — действием вековых резонансов. Отмечено, что околосолнечная стадия в эволюции малых тел играет большую роль в формировании физических свойств, распределения по размерам и динамических особенностей околоземных объектов.

Установлено, что в 2017 г. лишь семь обнаруженных астероидов совершали движение по орбитам с перигелийными расстояниями  $q < 0.1$  а.е. Однако астероиды, проходившие вблизи Солнца, к настоящему времени могли перейти на орбиты, удаленные от Солнца, вследствие действия механизма вековых возмущений Лидова-Козаи. В нашей работе найдены астероиды, которые в недалеком прошлом имели орбиты с перигелийными расстояниями  $q < 0.1$  а.е. Время пребывания астероидов на таких орбитах варьируется от сотен лет до десятков тысяч лет.

Одной из неожиданностей в исследовании малых тел Солнечной системы в начале этого века стало обнаружение

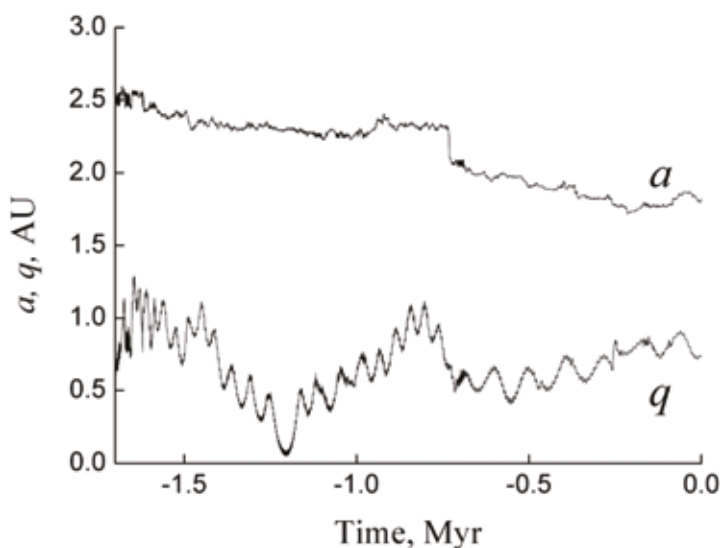
Studies of the role of encounters with the Sun in the evolution of asteroids and comets were carried out. As follows from dynamical studies of near-Earth objects, in the course of evolution, most near-Earth objects pass through the near-Sun states. It is natural to assume that small bodies undergo large changes (and even destruction) near the Sun as they are subjected to very strong tidal and thermal influences and directly interact with the solar atmosphere.

Interest in encounters with Sun as a possible process playing a dominant role in the physical evolution of near-Earth objects increased significantly after the Chelyabinsk event, since INASAN researchers established that the Chelyabinsk object with the high probability passed near the Sun about 1 million years ago. To reach such a conclusion, the pre-atmospheric orbit of this object was determined directly on the basis of its astrometric positions. It allowed determining the confidence interval for orbital parameters and integrating the equations of motion in the past for a large number of virtual particles with initial orbits from the confidence interval. It was found that in the past more than seventy percent of these particles were in orbits with perihelion distances of less than 0.1 AU. The most probable time of the approach of the Chelyabinsk object to the Sun, determined from dynamic considerations, is in good agreement with the cosmic-ray exposure age of the Chelyabinsk meteorite.

The dynamic features of the process of transition of near-Earth objects to orbits with small perihelion distances are investigated. At short time intervals of the order of thousands of years, the effectiveness of such transitions is provided by the action of the Kozai-Lidov secular perturbation mechanism, and at much longer time intervals — by the action of secular resonances. It is noted that the near-Sun states in the course of the evolution of asteroids, should be important for forming the physical properties, size distribution, and dynamical behavior of near-Earth objects.

As it was discovered in 2017, only seven of the discovered asteroids moved along orbits with perihelion distances  $q < 0.1$  AU. However, due to the Kozai-Lidov secular perturbations, the asteroids, having recently passed near the Sun, could by now have moved to orbits farther from the Sun. In this study, we found asteroids that have been recently orbiting with perihelion distances  $q < 0.1$  AU. Asteroids may stay on such orbits for hundreds to tens of thousands of years.

At the beginning of this century, the SOHO space observatory discovered near-Sun comets with perihelion distances  $q \approx 0.05$  AU, which remained observable over several close encounters with the Sun. This became one of the surprises in studying the small bodies of the Solar System. Currently, there are objects that have already been observed in four (342P) and five (321P, 322P, and 323P) apparitions. In the present work, the estimates of non-gravitational effects are



Эволюция Челябинского метеорита на околосолнечную орбиту / Transition of Chelyabinsk meteorite to near-Solar orbit

космической обсерваторией SOHO околосолнечных комет, движущихся по орбитам с перигелийными расстояниями порядка 0.05 а.е., которые оставались наблюдаемыми в течение нескольких проходов вблизи Солнца. В настоящее время имеются объекты, которые наблюдались уже в четырех (342P), пяти (321P, 322P) и шести (323P) появлениях. Для этих объектов получены оценки негравитационных эффектов на основе попарного объединения появлений. Проведенные вычисления показали, что наблюдения изученных объектов плохо объяснимы на основе учета только гравитационных сил. Негравитационные эффекты имеют явно нерегулярный характер.

obtained for these objects based on the pair-wise linkage of the apparitions. The calculations show that the observations of these objects are poorly represented if solely the gravitational forces are considered. The non-gravitational effects are clearly irregular.

#### Основные публикации / Main publications

- V.V. Emel'yanenko, Proceedings of the IAU Symp. 318, 359 (2016)  
 V.V. Emel'yanenko, Solar System Res., 51, 59 (2017)  
 V.V. Emel'yanenko, S.A. Naroenkov, Solar System Res., 52, 64 (2018)

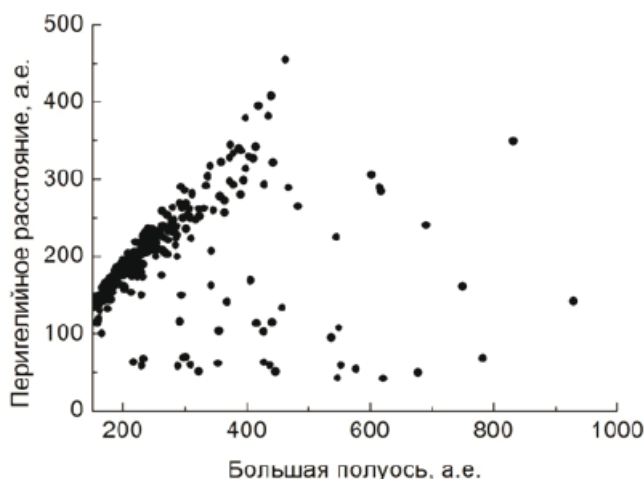
## ПРОИСХОЖДЕНИЕ ДАЛЕКИХ ТРАНСНЕПТУНОВЫХ ОБЪЕКТОВ ORIGIN OF EXTREME TRANSNEPTUNIAN OBJECTS

Открытие далеких транснептуновых объектов, движущихся по орбитам с большими полуосями  $a > 150$  а.е. и перигелийными расстояниями  $q > 30$  а.е. дало неожиданную информацию о строении внешней части Солнечной системы. В распределении угловых элементов этих объектов была обнаружена концентрация вблизи определенных значений, что стало основой для предположения о существовании далекой девятой планеты. Дальнейшее исследование, проведенное в ИНАСАН, позволило выявить новые особенности в распределении орбит транснептуновых объектов с перигелийными расстояниями  $q > 40$  а.е. и большими полуосями  $a > 150$  а.е. Наблюдаемое распределение орбит указывает на существование двух групп далеких транснептуновых объектов с различными динамическими свойствами. Поскольку обнаруженные свойства трудно объяснить в рамках гипотезы о существовании девятой планеты Солнечной системы, предложена новая модель, которая основана на концепции о формировании и эволюции гигантских газопылевых сгущений, образующихся в результате гравитационной неустойчивости и фрагментации протопланетного диска. В этой модели рассматривается динамическая эволюция гигантских газопылевых сгущений, движущихся по орбитам с разными наклонами, и планетезималей, расположенных первоначально в сферах Хилла сгущений. Показано, что распределение орбит планетезималей в рассматриваемой модели хорошо согласуется с наблюдаемым распределением орбит далеких транснептуновых объектов.

В дальнейшей работе были изучены динамические особенности массивного диска далеких транснептуновых объектов в этой модели. Рассмотрена эволюция орбит малых тел под действием гравитационных возмущений от внешних планет и самогравитации диска в течение нескольких миллиардов лет. Показано, что вековые эффекты гравитационного влияния массивного диска малых тел приводят к увеличению эксцентриситетов орбит отдельных объектов. Результатом такого динамического поведения является создание потока малых тел, подходящих близко к

The recent discovery of distant trans-Neptunian objects moving in orbits with semimajor axes  $a > 150$  AU, gave new and rather unexpected information about the structure of the outer part of the Solar System. In the distribution of the angular orbital elements of these objects, an unusual grouping was found near certain values, leading to an assumption on the existence of the distant ninth planet producing this effect. Further research performed at INASAN revealed new features of the distribution of orbits for trans-Neptunian objects with perihelion distances of  $q > 40$  AU and semimajor axes of  $a > 150$  AU. The observed distribution of orbits indicates the existence of two groups of distant trans-Neptunian objects with different dynamic properties. Since the discovered properties are difficult to explain within the framework of the hypothesis of the existence of the ninth planet of the Solar System, a new model, based on the concept of the formation and evolution of giant clusters, formed as a result of gravitational instability and fragmentation of the protoplanetary disk, was proposed. The model considers the dynamic evolution of giant clusters moving in orbits with different inclinations, and planetesimals initially located in the Hill spheres of the clusters. It was shown that the orbital distribution of planetesimals in the considered model is consistent with the observed orbital distribution of distant trans-Neptunian objects.

In the later studies the dynamical features of a massive disk of distant trans-Neptunian objects were considered within in frames of the model. The dynamical evolution of the orbits of small bodies under the action of gravitational perturbations from the outer planets and self-gravity of the disk has been studied for a time interval of the order of a billion years. It is shown that the secular effects of the gravitational influence of a massive disk of small bodies lead to an increase in the eccentricities of the orbits of individual objects. The result of



*Распределение больших полуосей и перигелийных расстояний для объектов с  $q > 30$  а.е.,  $150 < a < 1000$  а.е. через 1.2 миллиарда лет эволюции при начальной массе диска, равной десяти массам Земли / Distribution of semimajor axes and perihelion distances for objects with  $q > 30$  AU,  $150 < a < 1000$  AU after 1.2 billion years of evolution at disk mass equal to 10 Earth masses*

this dynamical behavior is the appearance of a flux of small bodies coming close to the orbit of Neptune. The change in the number of objects surviving in the observable region of distant trans-Neptunian objects (the region of orbits with perihelion distances of  $40 < q < 80$  AU and semimajor axes



орбите Нептуна. Изменение числа объектов, сохраняющихся в области наблюдения далеких транснептуновых объектов (область орбит с перигелийными расстояниями  $40 < q < 80$  а.е. и большими полуосями  $150 < a < 1000$  а.е.), с течением времени зависит от начальной массы диска. Для дисков с массой, превышающей массу Земли, имеется тенденция к уменьшению числа далеких транснептуновых объектов, сохранившихся в области наблюдаемости после эволюции в течение промежутка времени порядка возраста Солнечной системы, с увеличением начальной массы. С другой стороны, для большинства объектов эксцентриситеты орбит уменьшаются под влиянием самогравитации диска. Поэтому основная часть диска сохраняется в области гелиоцентрических расстояний, превышающих 100 а.е.

$150 < a < 1000$  AU), over time depends on the initial mass of the disk. For disks with masses exceeding several Earth masses, there is a tendency to a decrease in the number of distant trans-Neptunian objects surviving in the observable region after evolution for a time interval of the order of the age of the Solar System, with an increase in the initial mass. On the other hand, for most objects, orbital eccentricities decrease under the influence of the self-gravity of the disk. Therefore, the main part of the disk is preserved in the region of heliocentric distances exceeding 100 AU.

#### Основные публикации / Main publications

V.V. Emel'yanenko, A&A, 642, id. L20 (2020)

V.V. Emel'yanenko, Solar System Res., 54, 64 (2020)

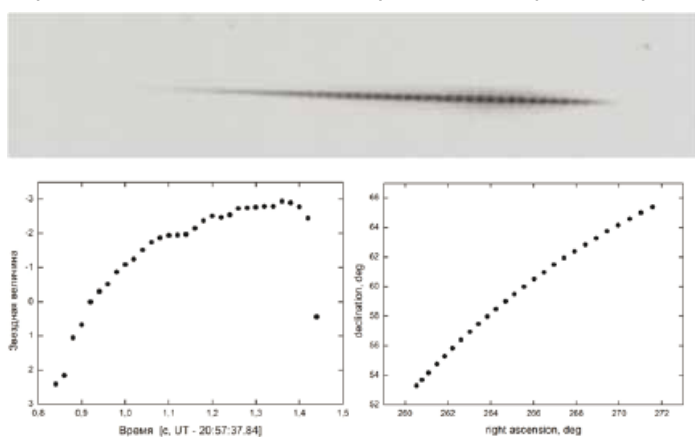
## ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ПО ДАННЫМ ИХ ВХОЖДЕНИЯ В АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ STUDIES OF MINOR BODIES OF THE SOLAR SYSTEM USING DATA ON THEIR ENTRANCE TO THE EARTH ATMOSPHERE

Наблюдения метеоров важны как для исследования фундаментальных научных проблем (например, для изучения динамики малых тел Солнечной системы), так и для решения прикладных задач (например, для создания эффективной противометеоритной защиты космических аппаратов). В последние годы количество метеорных установок, используемых профессиональными метеорными группами в сотрудничестве с астрономами-любителями, резко возросло. Они расположены по всему миру и образуют плотные метеорные сети. Для метеорных исследований одним из важных условий является проведение наблюдений со станций, разнесенных по долготе. Такое расположение позволит оценить вариацию потока метеорных частиц по долготе. Постоянный мониторинг на продолжительном интервале времени позволяет получать индивидуальные характеристики (например, звездные величины) каждой метеорной частицы и проводить анализ всего метеорного вещества в околоземном пространстве. В Институте астрономии РАН в течение ряда лет проводится мониторинг метеорных событий с нескольких пунктов. К 2021 г. по программам наблюдений метеоров получено несколько тысяч метеорных регистраций.

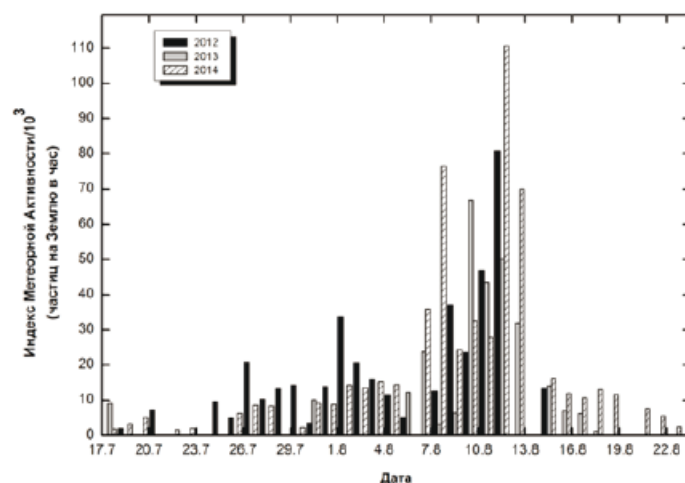
Проводятся исследования метеорных потоков и спорадического фона по данным базисных телевизионных наблюдений. Например, было проведено исследование распределения частиц (в виде индекса метеорной активности) потока Персеиды за 2012–2013 гг. и спорадического фона в период

Observations of meteors are important both for the study of fundamental scientific problems (for example, for studying the dynamics of small bodies in the Solar System) and for solving applied problems (for example, for creating an effective anti-meteorite protection for spacecrafts). In recent years, the number of meteor systems used by professional meteor teams in collaboration with amateur astronomers has increased significantly. They are located all over the world and form dense meteor networks. For meteor research, one of the important conditions is to make observations from stations distributed in longitude: such an arrangement allows estimating the variation in longitude of the flux of meteor particles. On the other hand, continuous monitoring over a long time interval allows one to obtain individual characteristics of each particle (for example, the magnitude of meteor particles) and to analyze all meteoric matter in near-Earth space. Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences has been monitoring meteor events from several points for a number of years. By 2021, several thousand meteor registrations have been received.

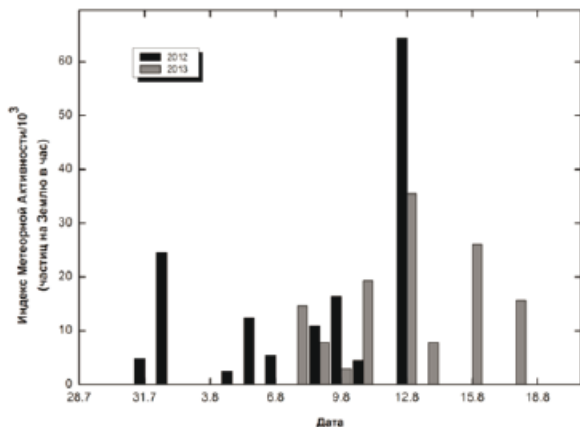
Using the data of double-station television observations investigations of meteor fluxes and sporadic background are carried out. For example, the studies of the distribution of particles (in the form of an index of meteor activity) of the Perseid meteor shower for 2012–2013 as well as the sporadic background during the period of this shower.



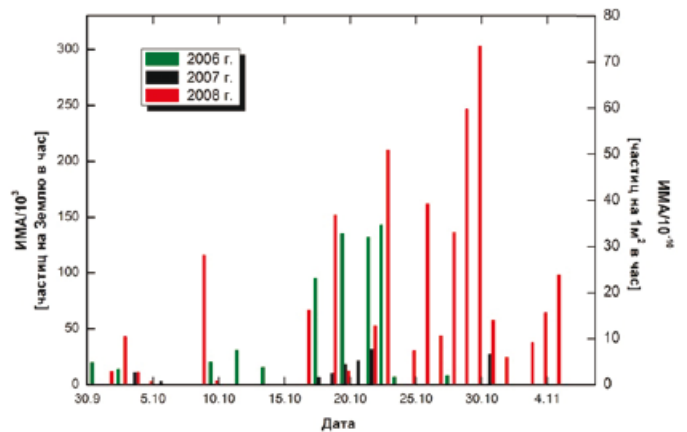
Пример кадра с метеором, распределение значений звездной величины каждой точки метеорного трека и их координат / An example of a frame with a meteor: the distribution of magnitude for each point of the meteor track and their coordinates



Распределение индекса метеорной активности Персеид в 2012–2013 гг. / Distribution of the index of meteor activity for Perseids in 2012–2013



Распределение индекса метеорной активности спорадических метеоров в 2012–2013 гг / Distribution of the index of meteor activity for sporadic meteors in 2012–2013



Индекс метеорной активности сильного метеорного потока Ориониды в 2006–2008 гг / Distribution of the index of meteor activity for the strong meteor stream Orionids in 2012–2013

действия данного потока.

Исследование метеорных характеристик проводилось также с уникальной установкой FAVOR. Эта широкоугольная камера (поле зрения  $18^\circ \times 20^\circ$ ) позволяла регистрировать метеоры до  $+9^m$ , что позволило впервые детально исследовать слабые метеоры в метеорных потоках Ориониды, Северные и Южные Тауриды.

Дальнейший мониторинг метеорных событий позволит продолжить исследования свойств известных метеорных потоков, выявлять и изучать новые потоки, а также совершенствовать модели взаимодействия частиц с атмосферой и методы определения масс и других параметров метеороидов.

Падение космических тел на Землю может представлять реальную угрозу для человечества. Даже скромные по астрономическим меркам события, например Челябинский метеорит (около 20 метров в диаметре), способны нанести довольно существенный материальный урон (в случае Челябинского события — порядка 1 млрд. руб.), и вызвать огромный общественный резонанс. Поэтому знание свойств метеорных тел важно для понимания распределения тел в Солнечной системе (для тел размером 1 м и более), их химических свойств, происхождения и эволюции таких объектов, а также оценки опасности, которую они могут вызвать. Для поиска выпавших метеоритов, для исследования эволюции, для исследования характеристик космических тел необходимо получать их траекторию и кинематические параметры. Сотрудники ИНАСАН принимают участие в исследованиях таких космических тел по наблюдениям их вхождения в атмосферу Земли (по наблюдениям метеоров, болидов). Одно из вхождений космического тела в атмосферу Земли было зарегистрировано 21 июня 2018 г. (1:16 UTC) над территорией России. Вхождение болида и его пылевой след были зарегистрированы автомобильными регистраторами, космическими спутниками, инфразвуковыми станциями (CNEOS). Были собраны полные сведения о событии как по результатам специально организованной экспедиции, так и по данным из других источников: данные с регистраторов, космических аппаратов, инфразвуковых станций. Собранные на месте падения фрагменты метеорита Озерки классифицированы как обычный хондрит (L6). Метеорит получил название Озерки.



Траектория и места падений метеоритов / Meteorite trajectories and fall locations

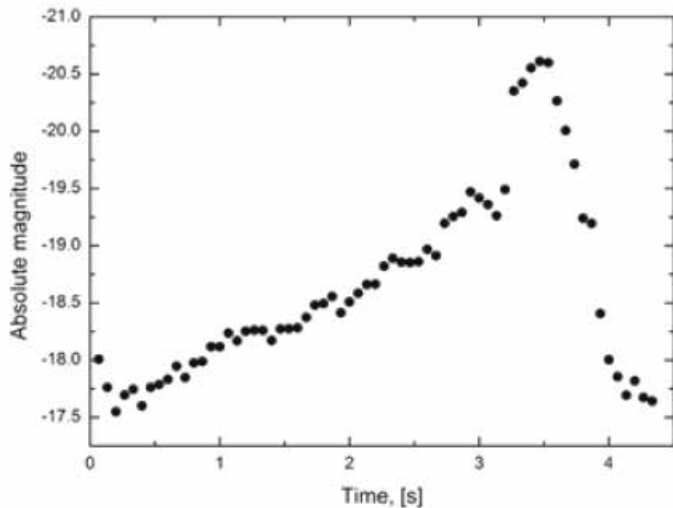
The study of meteor characteristics was also carried out with the unique FAVOR system. This wide-angle camera (field of view  $18^\circ \times 20^\circ$ ) allows registering meteors up to  $+9^m$ , which allowed detailed investigation of faint meteors in the Orionids, North and South Taurids meteor shower for the first time.

Further monitoring of meteor events will make it possible to continue studies of the properties of the known meteor showers and to identify and study the new ones, as well as to improve the models of interaction of particles with the atmosphere and the methods for determining masses and other parameters of meteoroids.

The fall of cosmic bodies on Earth can pose a real danger to humanity. Even events modest by astronomical meteorite (about 20 meter in diameter) can cause (about 20 meters in diameter), can cause quite significant material damage (in the case of the Chelyabinsk event about 1 billion rubles), and also have a huge public response. Therefore, the knowledge of the properties of meteor bodies is important for both understanding the distribution of bodies in the Solar System (for bodies of 1m or more in size), their chemical properties, the origin and evolution of such objects, and assessing the danger they could cause. To search for fallen meteorites, to study evolution and the characteristics of cosmic bodies, it is necessary to obtain their trajectory and kinematic parameters. Researchers of INASAN take part in such studies by observing their entry into the Earth's atmosphere (by meteor and bolide observations). One of the entries of a space body into the Earth's atmosphere was recorded on June 21, 2018 (1:16 UTC) over the territory of Russia. The entry of the bolide and its dust



a	q	e	i	$\Omega$	$\omega$	$V_{\infty}$	D
AU	AU		°	°	°	км/с	м
$0.84 \pm 0.02$	$0.673 \pm 0.04$	$0.199 \pm 0.03$	$18.443 \pm 3.047$	89.656	$335.286 \pm 5.147$	$14.9 \pm 1$	$3.7 \pm 0.5$



*Кривая блеска метеороида Озерки / A light curve for the Ozerki meteoroid*

Были получены динамические характеристики данного космического объекта: траектория, скорость и угол входа, орбита, были оценена масса и размер. Для измерения абсолютной звездной величины, а впоследствии и массы (энергии) впервые был применен новый метод.

В результате был оценен размер метеороида Озерки —  $3.7 \pm 0.5$  м. Масса космического тела составляла примерно 94 т, энергия, выделившаяся при вхождении тела в атмосферу Земли, варьируется от 1.96 до 3.5. кт TNT (в зависимости от метода наблюдений).

Разработанные методы применяются и будут применяться в будущем для определения параметров других метеороидов (астероидов) при их вхождении в атмосферу Земли.

trail were recorded by dash cameras, space satellites, infrasound stations (CNEOS). Complete information on the event was collected from both the results of a specially organized expedition and the data from other sources: data from dash cameras, spacecrafts, infrasound stations. The found material was called Ozerki meteorite and classified as an ordinary chondrite (L6).

The dynamic characteristics of this space object were obtained: the trajectory, the velocity and the entry angle, the orbit, the mass and the size were estimated. A new method to measure the absolute magnitude and the mass (energy) was used for the first time.

As a result, the size of the Ozerki meteoroid was estimated -  $3.7 \pm 0.5$  m. The mass of the cosmic body was about 94 tons, the estimations for the energy released when the body entered the Earth's atmosphere vary from 1.96 to 3.5. kt TNT (depending on the method of observation).

The developed methods are and will be applied in the future to determine the parameters of other meteoroids (asteroids) when they enter the Earth's atmosphere.

#### Основные публикации / Main Publications

A.P. Kartashova, PHD thesis, Pulkovo Observatory, Saint-Petersburg (2016)

A. Kartashova, A. Golubaev, A. Mozgova, I. Chuvashov, G. Bolgova, D. Glazachev, V. Efremov, Planetary and Space Science, 193, p. 105034 (2020)

A.V. Efimov, A.P. Kartashova, A.K. Murtazov, Meteoritics & Planetary Science, 54, 6334 (2019)



*Один из метеоритов Озерки, найденных в ходе экспедиции (находка А.П. Карташовой) / One of Ozerki meteorites found during the expedition (find by A.P. Kartashova)*



## ЭКЗОПЛАНЕТЫ EXTRASOLAR PLANETS



В последние годы наблюдается значительный прогресс в понимании физики атмосфер и газовых оболочек экзопланет. Большой объем данных накоплен при помощи спектроскопических наблюдений транзитов экзопланет на космических и наземных наблюдательных инструментах. В экзопланетных системах отдельные планеты могут иметь твердые, газовые и жидкие оболочки. Их характеристики варьируются от планет земного типа через суб-нептуну и нептуну до газовых гигантов. Образование вторичных атмосфер и потенциальная обитаемость экзо- и супер-земель имеют первостепенное значение для ряда современных естественнонаучных проблем, важнейшими из которых являются космогония Солнечной системы и происхождение жизни на Земле. Решение этих проблем требует тщательного исследования газовых оболочек экзопланет.

В Институте астрономии РАН моделируются первичные и вторичные атмосферы и оболочки экзопланет, а также изучаются процессы, индуцированные активностью родительской звезды. Разрабатываемые в институте вычислительные инструменты создают отличный задел для интерпретации будущих наблюдений экзопланет на космических и наземных телескопах (TESS, PLATO, NGTS, ESPRESSO, Спектр-УФ и др.). В конце 2020 г. опубликована монография Бисикало Д.В., Шематович В.И., Кайгородов П.В., Жилкин А.Г. «Газовые оболочки экзопланет – горячих юпитеров» М.: Наука, 252 стр., 2020.

Сотрудники, участвующие в работе по теме: А.А. Автаева, Д.В. Бисикало, А.Г. Жилкин, П.В. Кайгородов, Е.С. Калиничева, Е.П. Курбатов, В.И. Шематович.

Работа проводится в сотрудничестве с ГЕОХИ РАН, Институтом лазерной физики СО РАН, Институтом космических исследований РАН научными организациями США, Бельгии, Австрии и Швеции.

In recent years, significant progress in understanding the physics of atmospheres and gas envelopes of exoplanets was made. A large amount of data has been accumulated from spectroscopic observations of exoplanet transits from both space and ground-based observational instruments. In exoplanetary systems, individual planets can have solid, gas and liquid envelopes. Their characteristics range from terrestrial planets through sub-neptunes and neptunes to gas giants. The formation of secondary atmospheres and the potential habitability of exo- and super-earths are of paramount importance for a number of modern natural science problems, the most important of which are the cosmogony of the Solar System and the origin of life on Earth. Solving these problems requires a thorough study of the gas envelopes of exoplanets.

Researchers from the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences simulate primary and secondary atmospheres and envelopes of exoplanets, and also study the processes induced by the activity of the parent star. The computational tools being developed at the institute provide an excellent groundwork for the interpretation of future observations of exoplanets through space and ground-based telescopes (TESS, PLATO, NGTS, ESPRESSO, WSO-UV etc.). At the end of 2020, a monograph was published by Bisikalo D.V., Shematovich V.I., Kaigorodov P.V., Zhilkin A.G. "Gas envelopes of exoplanets — hot Jupiters" Moscow: Nauka, 252 pages, 2020.

Researchers involved in the studies: A.A. Avtaeva, D.V. Bisikalo, A.G. Zhilkin, P.V. Kaygorodov, E.S. Kalinicheva, E.P. Kurbatov, V.I. Shematovich.

The studies are being carried on in collaboration with Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Institute of Laser Physics SB RAS, Space Research Institute RAS as well as with scientific institutions of USA, Belgium, Austria and Sweden.



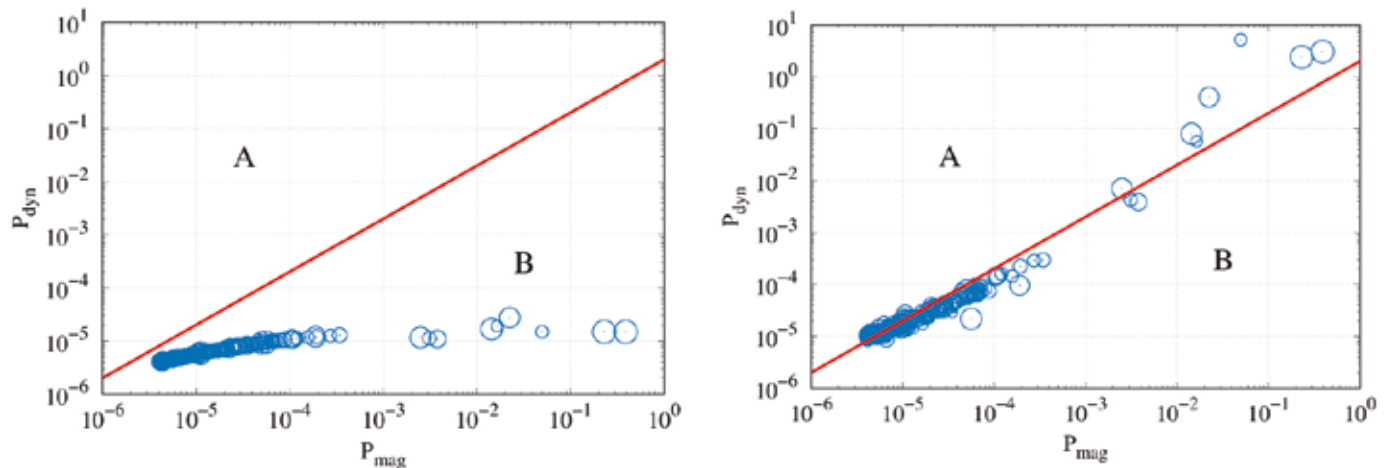
## ВОЗМОЖНЫЕ ТИПЫ МАГНИТОСФЕР ГОРЯЧИХ ЮПИТЕРОВ POSSIBLE TYPES OF HOT JUPITER MAGNETOSPHERES

В процессе обтекания звездным ветром атмосферы горячего юпитера важную роль играет магнитное поле ветра. Это обусловлено тем, что практически все горячие юпитеры располагаются в суб-альфвеновской зоне звездного ветра, где скорость ветра меньше его альфвеновской скорости. Скорость обтекания, учитывающая скорость орбитального движения планеты, при этом оказывается близкой к альфвеновской скорости. Это означает, что обтекание может происходить как в суб-альфвеновском, так и в сверх-альфвеновском режимах. В первом случае в структуре магнитосферы будет отсутствовать головная ударная волна. Такие горячие юпитеры должны иметь безударные наведенные (индуцированные) магнитосферы, аналогов которых в Солнечной системе, по-видимому, нет. Во втором случае магнитосфера горячего юпитера будет содержать все основные элементы, присутствующие в магнитосферах планет Солнечной системы.

### Основные публикации / Main publications

A.G. Zhilkin, D.V. Bisikalo, Astron. Rep., 63, 550 (2019)

D.V. Bisikalo, V.I. Shematovich, P.V. Kaygorodov, A.G. Zhilkin. Gas envelopes of exoplanets — hot jupiters, Moskva: Nauka, 2020



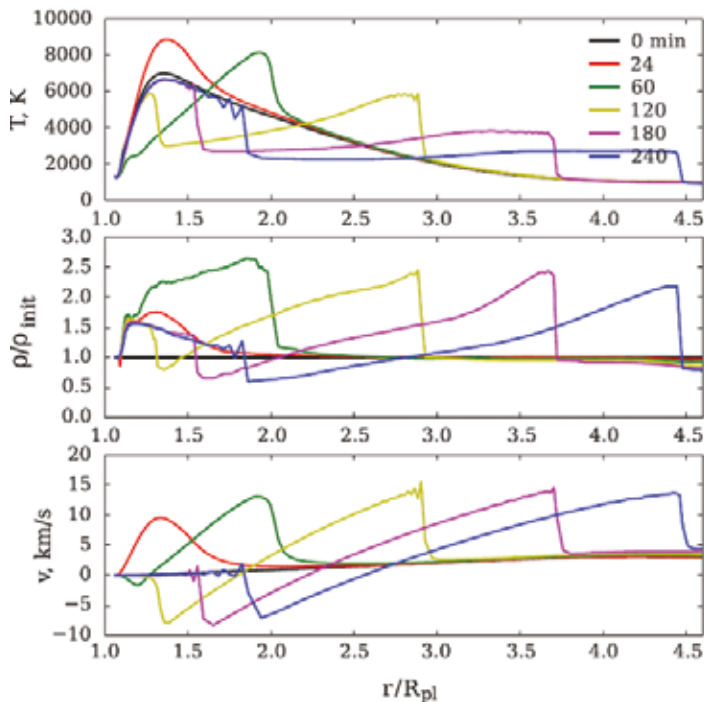
Распределение горячих юпитеров в плоскости переменных магнитное давление — динамическое давление. На левой диаграмме в динамическом давлении учтена только скорость ветра, на правой диаграмме учтены орбитальные скорости планет. Данные для горячих юпитеров взяты из базы данных сайта [www.exoplanet.eu](http://www.exoplanet.eu). Размеры кружков в логарифмическом масштабе соответствуют массам планет. Сплошная линия показывает положение альфвеновской точки. Буквами обозначены сверх-альфвеновская зона (A) и суб-альфвеновская зона (B) / Distribution of hot Jupiters in the plane of the variables magnetic pressure — dynamic pressure. On the left diagram, only wind speed is taken into account in the dynamic pressure, on the right diagram, the orbital velocities of the planets are also taken into account. The data for hot Jupiters are taken from the [www.exoplanet.eu](http://www.exoplanet.eu) database. The sizes of the circles on a logarithmic scale correspond to the masses of the planets. The solid line shows the position of the Alfvén point. The letters indicate the super-Alfvén zone (A) and the sub-Alfvén zone (B)

## ВЛИЯНИЕ ЗВЕЗДНОЙ ВСПЫШКИ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ АТМОСФЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТЫ HD 209458B INFLUENCE OF A STELLAR FLARE ON A DYNAMICAL STATE OF ATMOSPHERE OF HD 209458B EXOPLANET

С помощью одномерной аэрономической модели, корректно учитывающей нагрев и химические процессы в атмосфере, произведены расчеты газодинамического отклика атмосферы горячего юпитера HD209458b на супервспышки звезд, подобных Солнцу. Впервые показано, что атмосферное поглощение дополнительной энергии во время вспышки приводит к локальному нагреву атмосферы, сопровождаемому образованием двух распространяющихся ударных волн.

Исследованы возможные наблюдательные проявления формирующихся ударных волн, и сделаны оценки дополнительной потери вещества атмосферой.

Using a one-dimensional aeronomic model, correctly taking into account heating and chemical processes in the atmosphere, we calculated the gas dynamic response of the atmosphere of hot Jupiter HD209458b to superflares of stars like the Sun. It is shown for the first time that atmospheric absorption of additional energy during a flare leads to local heating of the atmosphere, accompanied by the formation of two propagating shock waves. Possible observational manifestations of forming shock waves are investigated, and estimates of the additional loss of matter by the atmosphere are made.



Результаты расчетов реакции верхней атмосферы горячего юпитера HD 209458b на воздействие звездной вспышки со 100-кратным ростом энергии ( $100 \times 10^{32}$  эрг/с). Показаны радиальные профили температуры (верхняя панель), отношение массовой плотности текущего состояния к плотности газа до вспышки (средняя панель) и скорости (нижняя панель) в атмосфере горячего юпитера HD 209458b до начала (линия черного цвета), во время звездной вспышки и после ее завершения (линии разного цвета в соответствии с легендой на верхней панели) / *The results of calculations of the reaction of the upper atmosphere of hot Jupiter HD 209458b to the effect of a stellar flare with a 100 times increase in energy ( $100 \times 10^{32}$  erg/s). Shown are the radial temperature profiles (top panel), the ratio of the mass density of the current state to the gas density before the flare (middle panel), and the velocity (bottom panel) in the atmosphere of hot Jupiter HD 209458b before the onset (black line), during and after a stellar flare completion (meaning of lines of different colors is indicated in the legend on the top panel)*

Показано, что на уровне экзобазы скорость потери массы возрастает в 1.9, 4, и 17.5 раз при увеличении XUV потока в 10, 100, и 1000 раз, соответственно. Проведенное исследование показало, что современные аэрономические модели необходимо расширить за счет включения в рассмотрение спорадической звездной активности — супервспышек, корональных выбросов массы и др.

It is shown that at the exobase level, the mass loss rate increases by 1.9, 4, and 17.5 times with an increase in the XUV flow by 10, 100, and 1000 times, respectively. The study showed that modern aeronomic models need to be expanded by including sporadic stellar activity — superflares, coronal mass ejections, etc.

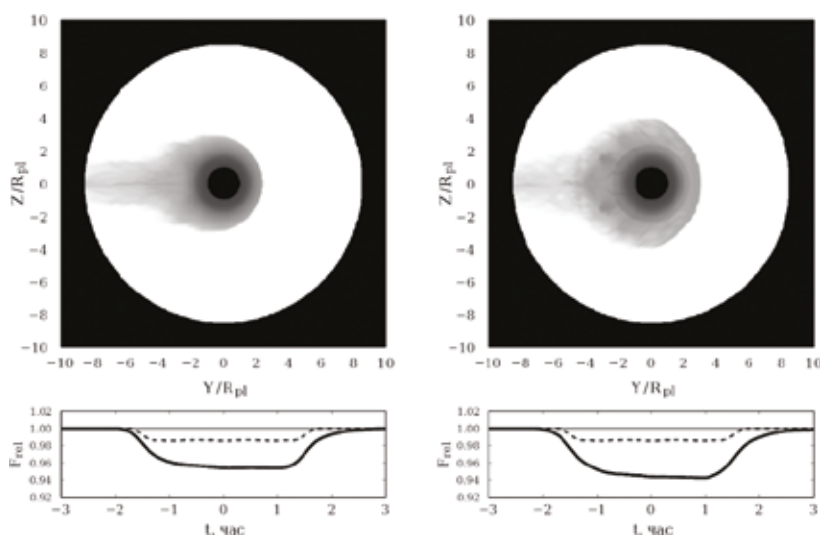
#### Основные публикации / Main publications

D. V. Bisikalo, A. A. Cherenkov, V. I. Shematovich, L. Fossati, C. Möstl, *Astron. Rep.*, 62, 648 (2018)

D.V. Bisikalo, V.I. Shematovich, A.A. Cherenkov, L. Fossati, C. Möstl, *ApJ*, 869, id. 108 (2018)

A. A. Cherenkov, I. F. Shaikhislamov, D. V. Bisikalo, V. I. Shematovich, L. Fossati, C. Möstl, *Astron. Rep.*, 63, 94 (2019)

Увеличение поглощения в линии Ly- $\alpha$  вследствие выброса вещества из атмосферы при вспышке 100-кратной силы. Слева — затмение в линии Ly- $\alpha$  для стационарного решения, справа — для момента максимального затмения ( $t = 5$  ч с начала вспышки). Затмение увеличивается на несколько процентов на время порядка нескольких часов. Пунктирной линией показано затмение, вызываемое только диском планеты в оптическом диапазоне (1.8%) / *An increase in absorption in the Ly- $\alpha$  line due to the ejection of matter from the atmosphere in a 100-fold flare. Left: the eclipse in the Ly- $\alpha$  line for the stationary solution, right: for the moment with the maximum eclipse ( $t = 5$  h from the beginning of the flare). The eclipse increases by several percent for a time of the order of several hours. The dotted line shows an eclipse caused only by the planet's disk in the optical range (1.8%)*



### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ОБОЛОЧКЕ ГОРЯЧЕГО ЮПИТЕРА С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ STUDY OF THE FLOW IN THE ENVELOPE OF HOT JUPITER WITH MAGNETIC FIELD

Протяженные оболочки горячих юпитеров возникают в результате истечения верхней атмосферы через окрестности точек Лагранжа  $L_1$ ,  $L_2$  и могут многократно превосходить по размерам саму планету. С помощью разработанной ранее газодинамической численной модели было впервые показано, что в реалистичном диапазоне параметров могут формироваться квазизамкнутые оболочки, стабилизируемые за счет динамического давления звездного ветра. В 2017 году

The extended envelopes of hot Jupiters form as a result of the outflow of the upper atmosphere through the vicinity of the Lagrange points  $L_1$ ,  $L_2$  and can be many times larger than the planet itself. Using the previously developed gas dynamic numerical model, it was shown for the first time that in a realistic range of parameters, the quasi-closed envelopes can be formed, stabilized by the dynamic pressure of the stellar wind. In 2017, for the first time, three-dimensional numerical



впервые были проведены трехмерные численные расчеты с учетом собственного дипольного магнитного поля горячего юпитера. Результаты моделирования позволяют заключить, что наличие даже сравнительно слабого дипольного магнитного момента (порядка 10% от магнитного момента Юпитера) существенно меняет картину течения в оболочке (см. Рисунок). В частности, магнитное поле расширяет диапазон параметров, при котором может существовать квазизамкнутая оболочка. Также моделирование показало, что в присутствии магнитного поля истечение через окрестность точки L1 может иметь пульсационный характер.

#### Основные публикации / Main publications

A. S. Arakcheev, A. G. Zhilkin, P. V. Kaigorodov, D. V. Bisikalo, A. G. Kosovichev, *Astron. Rep.*, 61, 932 (2017)

D. V. Bisikalo, A. S. Arakcheev, P. V. Kaigorodov, *Astron. Rep.*, 61, 925 (2017)

calculations were carried out taking into account the intrinsic dipole magnetic field of hot Jupiters. The simulation results allow us to conclude that the presence of even a relatively weak dipole magnetic moment (about 10% of the magnetic moment of Jupiter) significantly changes the flow pattern in the envelope (see Figure). In particular, the magnetic field expands the range of parameters with which a quasi-closed shell can exist. Simulation also showed that in the presence of a magnetic field, the outflow through the vicinity of point L1 can have a pulsating character.



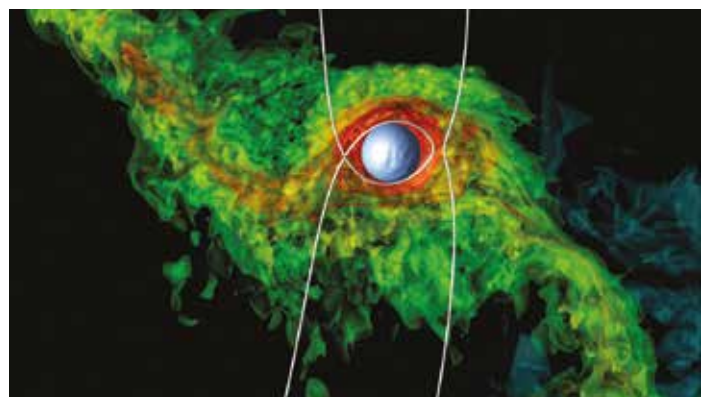
*Изоповерхности плотности и силовые линии магнитного поля в протяженной оболочке горячего юпитера / Density isosurfaces and magnetic field lines in the extended envelope of hot Jupiter*

## ВЛИЯНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ НА ГАЗОДИНАМИКУ АТМОСФЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТ ТИПА «ГОРЯЧИЙ ЮПИТЕР» INFLUENCE OF A CORONAL MASS EJECTION ON THE GAS-DYNAMICS OF ATMOSPHERES OF HOT JUPITER EXOPLANETS

Впервые проведено трехмерное численное моделирование процесса взаимодействия протяженной оболочки горячего юпитера с корональным выбросом массы (КВМ). Экзопланеты, относящиеся к классу «горячих юпитеров» находятся на очень низких орбитах и, соответственно, должны быть подвержены сильному влиянию вспышек их родительских звезд. По результатам расчетов установлено, что даже слабые корональные выбросы массы звезд солнечного типа существенно (на порядок величины) увеличивают потерю

For the first time, a three-dimensional numerical simulation of the interaction of an extended shell of a hot Jupiter with a coronal mass ejection (CME) has been carried out. Exoplanets belonging to the “hot Jupiters” class are in very low orbits and, accordingly, should be strongly influenced by the outbursts of their parent stars. According to the results of calculations, it was found that even weak coronal mass ejections of solar-type stars significantly (by an order of magnitude) increase the mass loss by exoplanets of the “hot Jupiter” type, thereby

*Протяженная оболочка горячего юпитера в процессе разрушения корональным выбросом массы. Показаны изоповерхности плотности (в разрезе), а также изолиния потенциала Роша, проходящая через внутреннюю точку Лагранжа системы звезда-планета / Extended envelope of hot Jupiter in the process of destruction by a coronal mass ejection. The density isosurfaces (in section) and the Roche potential isoline passing through the inner Lagrange point of the star-planet system are shown*



массы экзопланетами типа «горячий юпитер», тем самым значительно ограничивая время жизни таких объектов. Ранее нами была открыта возможность формирования протяженных несимметричных квазизамкнутых оболочек у горячих юпитеров. Внешние части такой оболочки слабо гравитационно связаны с планетой, именно поэтому даже слабого КВМ достаточно, чтобы значительная часть атмосферы была сорвана и унесена от экзопланеты.

### Основные публикации / Main publications

D. V. Bisikalo, A. A. Cherenkov, *Astron. Rep.*, 60, 183 (2016)

A. Cherenkov, D. Bisikalo, L. Fossati, C. Möstl, *ApJ*, 846, id. 31, (2017)

significantly limiting the lifetime of such objects. Earlier, we discovered the possibility of forming extended asymmetric quasi-closed shells in hot Jupiters. The outer parts of such a shell are weakly gravitationally bound to the planet, which is why even a weak CME is enough for a significant part of the atmosphere to be ripped off and carried away from the exoplanet.

## САМОСОГЛАСОВАННАЯ АЭРОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ГОРЯЧЕГО ЮПИТЕРА SELF-CONSISTENT AERONOMIC MODEL OF A HOT JUPITER UPPER ATMOSPHERE

Звездное жесткое (мягкий рентген и вакуумный ультрафиолет — XUV) излучение в основном влияет на верхние атмосферы и экзосферы планет. Аэрономия верхних атмосфер и экзосфер планет определяют эффективность атмосферного

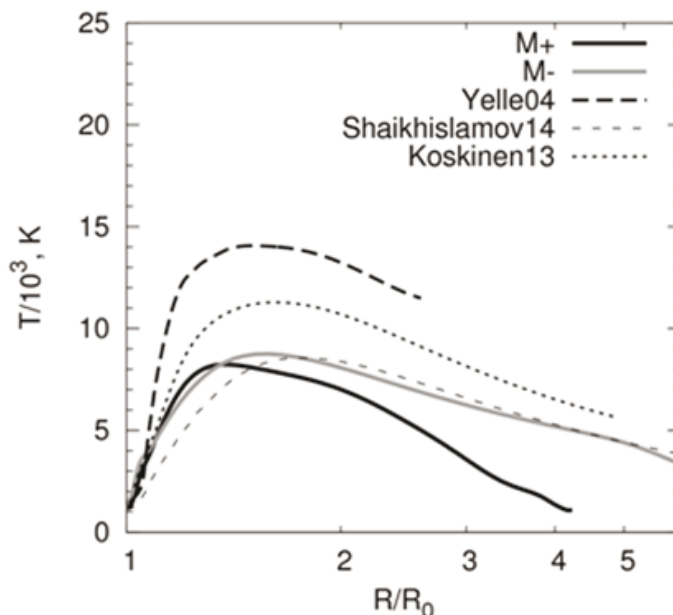
убегания для планет. Наиболее часто используемыми методами исследования верхних атмосфер планет Солнечной системы являются наблюдения и измерения атмосферных свечений, включая ночные, сумеречные, дневные свечения и полярные сияния. Измерения атмосферных свечений и поглощения звездного излучения в УФ диапазоне волн очень важны, поскольку такие свечения индуцируются возбуждением электронных состояний атомов, молекул и их ионов. Поэтому ультрафиолетовые наблюдения дают информацию об основных энергетических агентах и физических процессах в верхних слоях атмосферы планеты. Космические наблюдения особенностей экзосферных свечений

показывают, что планетные экзосферы содержат как фракцию тепловых нейтральных частиц со средней кинетической энергией, соответствующей экзосферной температуре, так и фракцию горячих нейтральных частиц со средней кинетической энергией, значительно превышающей тепловую энергию. Существование горячей экзосферной составляющей указывает на важность нетепловых процессов в планетных атмосферах. Эта новая область планетной аэрономии — исследование роли надтепловых частиц (т. е. частиц с избытком кинетической энергии) в физике и химии верхних атмосфер планет активно развивается в Институте астрономии РАН.

Фотолитиз атмосфер планетных тел в Солнечной системе и

Stellar hard (soft X-ray and vacuum ultraviolet — XUV) radiation mainly affects the upper atmospheres and exospheres of planets. Aeronomy of the upper atmospheres and exospheres of planets determines the efficiency of

atmospheric escape for planets. The most commonly used methods for studying the upper atmospheres of planets in the Solar System are observations and measurements of the atmospheric glow, including night, twilight, daytime and auroras. Measurements of atmospheric luminescence and absorption of stellar radiation in the UV range are very important, since such luminescence is induced by the excitation of the electronic states of atoms, molecules, and their ions. Therefore, ultraviolet observations provide information on the main energetic agents and physical processes in the upper atmosphere of the planet. Space observations of the features of exospheric glow show that planetary exospheres contain both a fraction of thermal neutral



Высотный профиль температуры из статей других авторов в сравнении с высотными профилями, полученными при помощи самосогласованной аэрономической модели без учета надтепловых электронов (M-) и с их учетом (M+).  $R_0$  — радиус планеты / *The altitude profile of temperature from articles by other authors in comparison with the altitude profiles obtained using a self-consistent aeronomic model without taking into account epithermal electrons (M-) and taking them into account (M+).  $R_0$  is the radius of the planet*

particles with an average kinetic energy corresponding to the exospheric temperature, and a fraction of hot neutral particles with an average kinetic energy significantly exceeding thermal energy. The existence of a hot exospheric component indicates the importance of nonthermal processes in planetary atmospheres. This new area of planetary aeronomy — the study of the role of suprathermal particles (i.e., particles with an excess of kinetic energy) in the physics and chemistry of the upper atmospheres of planets — is being actively developed at the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences.

Photolysis of the atmospheres of planetary bodies in the Solar System and exoplanets in orbits close to the parent star



экзопланет на тесных (близких) к родительской звезде орбитах солнечным/звездным XUV излучением и плазмой солнечно-го/звездного ветра приводит к образованию надтепловых частиц — первичных фотоэлектронов в ионизационных процессах и энергетических атомов в процессах диссоциации и диссоциативной ионизации. Эти частицы с избыточной кинетической энергией являются важным источником тепловой энергии в верхних слоях атмосферы планет богатых летучими газами. В развиваемых в Институте астрономии РАН аэрономических моделях особое внимание уделено изучению кинетики надтепловых частиц на основе самосогласованного подхода, который включает решение кинетического уравнения Больцмана для нетепловых фракций этих частиц.

Исследования планетных экзосфер не могут быть успешными без рассмотрения подстилающих термосфер и ионосфер, которые обычно называются верхними атмосферами. Верхняя атмосфера планеты под сильным звездным XUV излучением может расширяться на большие расстояния от центра планеты и вызывать быстрые атмосферные потери. Этот феномен, так называемое гидродинамическое убегание, был лишь теоретически изучен десятилетия назад для планет Солнечной системы на ранних стадиях их эволюции. Только в последнее десятилетие появились возможности наблюдений гидродинамического убегания для нескольких близких экзопланет и были предприняты попытки численного моделирования аэрономии этого явления.

При помощи разработанной в Институте астрономии РАН аэрономической модели верхней атмосферы горячей экзопланеты показано, что учет надтепловых электронов при моделировании атмосфер горячих юпитеров сильно меняет скорости нагрева и ионизации газа. Данные процессы влияют на темп потери атмосферы планеты, в частности, в режиме гидродинамического убегания. Впервые была представлена самосогласованная аэрономическая модель верхней атмосферы горячего юпитера, в которой учтены реакции с участием надтепловых фотоэлектронов. С помощью модели горячего юпитера HD 209458b рассчитаны высотные профили плотности, скорости и температуры газа. Показано, что учет надтепловых электронов при вычислении функций нагрева и охлаждения снижает темп оттока в пять раз, и таким образом увеличивает оценочное время жизни планеты.

В проведенных исследованиях аэрономии верхней атмосферы горячих экзопланет показана необходимость более детального изучения отношения потока приходящей звездной XUV энергии и скорости убегания из атмосферы планеты, определяющего темп потери атмосферы. А именно, необходим детальный учет не только всех потоков энергии жесткого звездного излучения, преобразуемой в совокупности процессов атмосферной химии, но и учет энергии, переносимой в пределах термосферы посредством надтепловых частиц — фото- и вторичных электронов. Действительно, учет фотоэлектронов в построенной аэрономической модели приводит к снижению оценки темпа оттока атмосферного газа в несколько раз, что может быть одной из причин неполной потери экзопланетами первичной атмосферы с преобладанием водорода. Соответственно, расчеты эффективности нагрева с учетом надтепловых частиц, как было продемонстрировано в предложенной аэрономической модели, еще более усложняются, но именно такие модели позволяют более строго изучить космогонию образования и потери атмосфер экзопланет.

#### **Основные публикации / Main publications**

D. E. Ionov, V. I. Shematovich, Ya. N. Pavlyuchenkov, *Astron. Rep.*, 61, 387 (2017)

D.E. Ionov, Y.N. Pavlyuchenkov, V.I. Shematovich, *MNRAS*, 476, 5639 (2018)

by solar/stellar XUV radiation and solar/stellar wind plasma leads to the formation of suprathermal particles — primary photoelectrons in ionization processes and energetic atoms in dissociation and dissociative ionization processes. These particles with excess kinetic energy are an important source of thermal energy in the upper atmosphere of planets rich in volatile gases. In aeronomic models developed at the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, special attention is paid to the study of the kinetics of suprathermal particles on the basis of a self-consistent approach, which includes the solution of the Boltzmann kinetic equation for nonthermal fractions of these particles.

Studies of planetary exospheres cannot be successful without considering the underlying thermospheres and ionospheres, which are usually called the upper atmospheres. The planet's upper atmosphere under strong stellar XUV radiation, can expand to long distances from the center of the planet and cause rapid atmospheric losses. This phenomenon, the so-called hydrodynamic escape, was studied only theoretically decades ago for the planets of the Solar System at the early stages of their evolution. Only in the last decade it became possible to observe hydrodynamic escape for several nearby exoplanets, and attempts were made to numerically model the aeronomy of this phenomenon.

Using the aeronomic model of the upper atmosphere of a hot exoplanet developed at the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, it was shown that taking into account suprathermal electrons in modeling the atmospheres of hot Jupiters strongly changes the heating and ionization rates of the gas. These processes affect the rate of loss of the planet's atmosphere, in particular, in the regime of hydrodynamic escape. For the first time, a self-consistent aeronomic model of the upper atmosphere of a hot Jupiter was presented, in which reactions involving suprathermal photoelectrons were taken into account. The hot Jupiter model HD 209458b was used to calculate the altitude profiles of gas density, velocity, and temperature. It is shown that taking into account suprathermal electrons in calculating the heating and cooling functions reduces the outflow rate by a factor of five, and thus increases the estimated lifetime of the planet.

In the studies of the aeronomy of the upper atmosphere of hot exoplanets, the need for a more detailed study of the ratio of the incoming stellar XUV energy flux and the escape velocity from the planet's atmosphere, which determines the rate of atmospheric loss, is shown. Namely, it is necessary to take a detailed account of not only all streams of energy of hard stellar radiation, converted in the totality of atmospheric chemistry processes, but also an account of the energy transferred within the thermosphere by means of suprathermal particles — photo- and secondary electrons. Indeed, the inclusion of photoelectrons in the constructed aeronomic model leads to a decrease in the estimate of the rate of outflow of atmospheric gas by several times, which may be one of the reasons for the incomplete loss of the primary atmosphere by exoplanets with a predominance of hydrogen. Accordingly, calculations of the heating efficiency taking into account suprathermal particles, as was demonstrated in the proposed aeronomic model, become even more complicated, but it is exactly these models that make it possible to more rigorously study the cosmogony of formation and loss of exoplanet atmospheres.

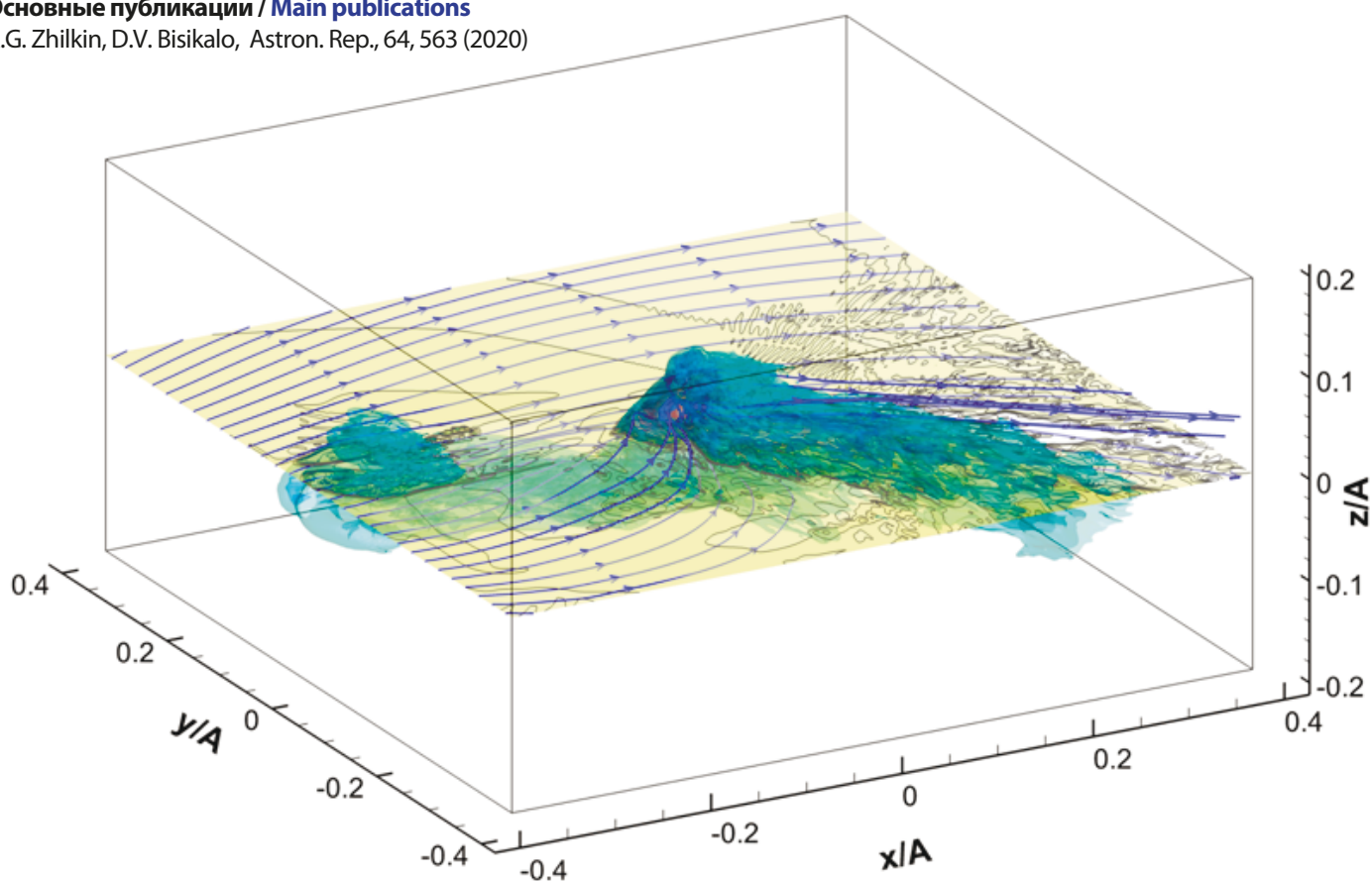
## ВОЗМОЖНЫЙ НОВЫЙ ТИП ОБОЛОЧЕК ГОРЯЧИХ ЭКЗОПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ POSSIBLE NEW ENVELOPE TYPES OF HOT JUPITERS

Протяженная ионосферная оболочка горячего юпитера, формирующаяся в условиях суб-альфвеновского режима обтекания планеты звездным ветром, принципиально отличается по своей структуре от соответствующей оболочки, формирующейся как в чисто газодинамическом случае, так и в условиях сверх-альфвеновского режима обтекания. В сверх-альфвеновском режиме скорость обтекания превышает альфвеновскую скорость и ионосферная оболочка вытягивается вдоль баллистической траектории, начинающейся из внутренней точки Лагранжа. В суб-альфвеновском режиме, когда скорость обтекания меньше альфвеновской скорости, ионосферная оболочка вытягивается вдоль силовых линий магнитного поля звездного ветра. При этом вещество оболочки движется непосредственно к звезде. Таким образом, в случае сильного магнитного поля ветра обнаруживается некоторый новый тип ионосферных оболочек, дополняющий классификацию, полученную ранее на основе результатов чисто газодинамического моделирования. Исследование особенностей наблюдательных проявлений сверх-альфвеновских и суб-альфвеновских оболочек открывает дополнительные возможности для диагностики параметров звездного ветра от родительских звезд горячих экзопланет-гигантов.

The extended ionospheric envelope of a hot Jupiter, forming under the conditions of the sub-Alfvén regime of the stellar wind flow around the planet, is fundamentally different in structure from the corresponding shell, forming both in the purely gas-dynamic case and under the conditions of the super-Alfvén flow regime. In the super-Alfvén regime, the flow velocity exceeds the Alfvén velocity and the ionospheric envelope stretches along a ballistic trajectory starting from the inner Lagrange point. In the sub-Alfvén regime, when the flow velocity is less than the Alfvén velocity, the ionospheric envelope stretches along the lines of force of the stellar wind magnetic field. In this case, the material of the envelope moves directly to the star. Thus, in the case of a strong magnetic wind field, a new type of ionospheric envelopes is revealed, which complements the classification obtained earlier on the basis of the results of purely gas dynamic modeling. Investigation of the features of observational manifestations of super-Alfvén and sub-Alfvén shells opens up additional possibilities for diagnosing stellar wind parameters from parent stars of hot giant exoplanets.

### Основные публикации / Main publications

A.G. Zhilkin, D.V. Bisikalo, Astron. Rep., 64, 563 (2020)



Структура течения в протяженной ионосферной оболочке типичного горячего юпитера в суб-альфвеновском режиме обтекания звездным ветром. Показано распределение десятичного логарифма плотности (градиация цвета и изолинии в орбитальной плоскости планеты, а также изоповерхности в пространстве) и магнитного поля (трехмерные линии со стрелками). Планета расположена в центре рисунка и обозначена красной сферой / The structure of the flow in the extended ionospheric envelope of a typical hot Jupiter in the sub-Alfvén regime of stellar wind flow. The distribution of the decimal logarithm of the density (gradation of color and isolines in the orbital plane of the planet, as well as the isosurface in space) and magnetic field (three-dimensional lines with arrows) is shown. The planet is located in the center of the figure and is indicated by a red sphere



## АКТИВНОСТЬ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД С ПЛАНЕТНЫМИ СИСТЕМАМИ ПО ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ КЕПЛЕР И TESS ACTIVITY OF YOUNG STARS WITH PLANETARY SYSTEMS ACCORDING TO PHOTOMETRY DATA FROM KEPLER AND TESS

При анализе наблюдательного материала из архива наблюдений космической миссии Кеплер и ее продолжения K2 стали возможны высокоточные фотометрические исследования активности звезд с планетными системами в молодых скоплениях (с возрастом до 1 млрд. лет).

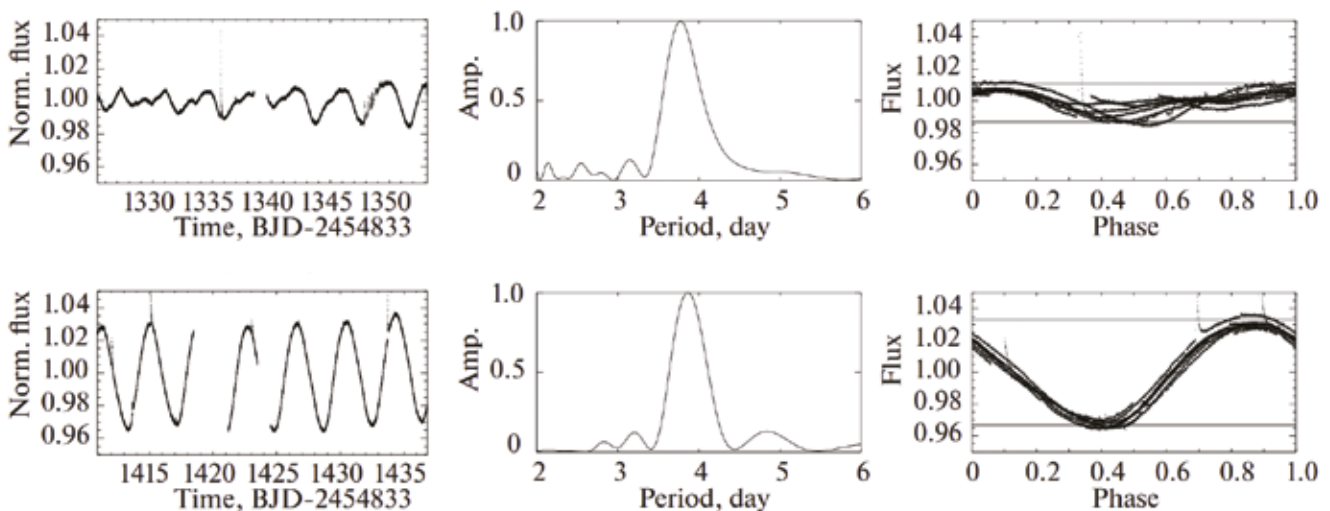
В таких молодых системах на физические и химические свойства формирующихся планет в значительной мере могут влиять как продолжающийся процесс выпадения планетезималей, так и магнитная активность центральной молодой звезды (выражающаяся в избыточном УФ и рентгеновском излучении, а также в корональных выбросах), которая может изменять физические свойства атмосфер близких планет и даже приводить к разрушению этих атмосфер. В современном понимании демографии экзопланет сильно преобладают более старые планетные системы (>1 млрд. лет), в то время как механизмы формирования и эволюции планет наиболее динамичны в первые несколько сотен миллионов лет после образования планетных систем. В ходе анализа были рассмотрены объекты из скоплений Плеяды, Гиады, Ясли и ассоциации Sco-Cen (подгруппа Upper Scorpius). По мере доступности данных архива наблюдений миссии TESS список пополняется дополнительными объектами.

Исследования активности молодых звезд включают результаты изучения M карлика EPIC 210490365 (K2-25, 2MASS J04130560+1514520), расположенного в скоплении Гиады (650–800 млн. лет), звезд EPIC 211901114 из скопления Ясли и EPIC 205117205 (K2-33) из подгруппы Upper Scorpius ассоциации Sco-Cen. Для EPIC 211901114 и K2-33 сотрудники института зарегистрировали 32 и 7 вспышек, соответственно, а также оценили частоты и амплитуды этих вспышек, их энергии, времена их возгорания и угасания. В дальнейшем было проведено исследование активности пяти молодых звезд с планетными системами: K2-231, EPIC 219388192, K2-136, Kepler-66 и Kepler-67, возраст которых был определен по их принадлежности к скоплениям. Было изучено положение объектов на диаграммах S — возраст, S — период вращения и S — числа Россби, и сделан вывод о его соответствии общему характеру

When analyzing observational material from the archive of observations of the Kepler space mission and its continuation K2, high-precision photometric studies of the activity of stars with planetary systems in young clusters (with an age of up to 1 billion years) became possible.

In such young systems, the physical and chemical properties of the forming planets can be significantly influenced by both the ongoing process of planetesimal fallout and the magnetic activity of the central young star (expressed in excess UV and X-ray radiation, as well as in coronal ejections), which can change the physical properties of the atmospheres of nearby planets and even lead to the destruction of these atmospheres. In the modern understanding of the demography of exoplanets, older planetary systems (> 1 billion years) strongly prevail, while the mechanisms of planetary formation and evolution are most dynamic in the first several hundred million years after the formation of planetary systems. During the analysis, objects from the Pleiades, Hyades, Praesepe clusters and the Sco-Cen association (Upper Scorpius subgroup) were considered. As the data from the TESS mission observation archive becomes available, the list is supplemented with additional objects.

Studies of the activity of young stars include the results of studying the M dwarf EPIC 210490365 (K2-25, 2MASS J04130560+1514520) located in the Hyades cluster (650–800 Ma), the stars EPIC 211901114 from the Praesepe cluster and EPIC 205117205 (K2-33) from subgroups Upper Scorpius of the Sco-Cen association. For EPIC 211901114 and K2-33, the researchers of the institute registered 32 and 7 flares, respectively, and also estimated the frequencies and amplitudes of these flares, their energies, and the times of their ignition and extinction. Subsequently, the studies of the activity of five young stars with planetary systems: K2-231, EPIC 219388192, K2-136, Kepler-66 and Kepler-67 were carried out. The age of the objects was determined by their membership in the clusters. The position of objects on the diagrams S — age, S — rotation period and S — Rossby



Слева: кривая блеска AB Pic. В центре: спектр мощности переменности блеска. Справа: фазовая диаграмма переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Хорошо видны вспышки. Данные приведены для наблюдений в секторах TESS 1 и 4 / Left: AB Pic light curve. Center: power spectrum of brightness variability. Right: phase diagram of brightness variability (horizontal lines characterize the amplitude of brightness variability). Flares are clearly visible. Data are given for observations in TESS 1 and 4 sectors

зависимостей, установленных нами ранее для 1570 M карликов, а затем для 18000 одиночных звезд.

Сотрудниками Института детально проанализирована фотосферная и хромосферная активность звезды DS Tuc, которая является членом группы Tucana-Horologium (Tuc-Hor) с возрастом порядка 45 млн. лет. DS Tuc может рассматриваться как прототип молодого Солнца, а планетная система — как прототип молодой Солнечной системы. Период вращения звезды равен  $P = 2.85 \pm 0.18$  суток, а доля  $S$  поверхности звезды, покрытой холодными пятнами, составляет порядка 3.3%. По наблюдениям обзора All Sky Automated Survey впервые получена оценка возможного цикла активности DS Tuc, равного 1610 суткам (4.4 года).

На основе высокоточного материала из архива космической миссии TESS проведено исследование фотометрической переменности карлика спектрального класса K1 AB Pic (HD 44627), обладающего удаленной планетой-гигантом с массой 13.5 масс Юпитера, также члена ассоциации Tuc-Hor. За интервал наблюдений с миссией TESS на звезде было зарегистрировано 48 вспышек с энергией  $6.1 \cdot 10^{32}$  эрг –  $3.4 \cdot 10^{35}$  эрг. Выполнены оценки периода вращения звезды  $P = 3.860 \pm 0.020$  суток, амплитуды переменности блеска и параметра запятненности. Площадь пятен на поверхности AB Pic существенно превосходит площадь пятен на Солнце. Высказано предположение, что в течение интервала наблюдений площадь пятен на поверхности звезды демонстрировала циклические изменения длительностью 233 суток, аналогом которых может быть цикл Ригера на Солнце. Оценки более длительных интервалов активности AB Pic указали на возможные циклы в 3.1 года и 7.2 года.

Сотрудники Института изучили фотометрическую переменность еще двух молодых аналогов Солнца с планетными системами — звезд HD 63433 (TOI 1726), члена движущейся группы звезд Ursa Major с возрастом 410 млн. лет, и TOI 451 (CD-38 1467) из звездного потока Рыбы-Эридан (Psc-Eri) с возрастом 120 млн. лет. Были оценены периоды вращения звезд и амплитуды переменности блеска, а также параметр запятненности  $A$  в абсолютной мере. Площадь пятен на поверхности HD 63433 и TOI 451 существенно превосходит площадь пятен на Солнце и составляет 24500 м.д.п. (миллионных долей площади видимой поверхности Солнца) и 12600–33200 м.д.п., соответственно. Оценки активности TOI 451 указали на возможные циклы в 125 и 1280 суток. Данные для HD 63433 свидетельствуют о наличии долговременных изменений блеска, но недостаточны для количественных оценок.

Изученные сотрудниками Института планетные системы открывают перспективы для транзитной спектроскопии как с помощью Космического телескопа Хаббла и Космического телескопа Джеймса Уэбба, так и, в перспективе, космической миссии Спектр-УФ. Предполагаемые исследования предоставят возможность изучения атмосфер планет, которые, вероятно, все еще находятся на ранних стадиях эволюции. Рассмотренные системы могут сыграть важную роль в нашем понимании эволюции планетных систем в течение первого миллиарда (и даже нескольких сотен миллионов) лет после их образования.

### Основные публикации / Main publications

- E.S. Dmitrienko, I.S. Savanov, *Astron. Rep.*, 61, 122 (2017)
- E.S. Dmitrienko, I.S. Savanov, *Astron. Rep.*, 61, 871 (2017)
- I.S. Savanov, E.S. Dmitrienko, *Astron. Rep.*, 62, 532 (2018)
- I.S. Savanov, E.S. Dmitrienko, *Astron. Rep.*, 63, 595 (2019)
- I.S. Savanov, E.S. Dmitrienko, *INASAN Science Reports*, 5, 17 (2020)
- I.S. Savanov, *Astron. Lett.*, 47, 175 (2021)

number was studied, and it was concluded that it corresponded to the general nature of the dependences that we established earlier for 1570 M dwarfs, and then for 18000 single stars.

The researchers of the institute analyzed in detail the photospheric and chromospheric activity of the star DS Tuc, which is a member of the Tucana-Horologium (Tuc-Hor) group with an age of about 45 million years. DS Tuc can be viewed as a prototype for a young Sun, and a planetary system as a prototype for the young Solar System. The rotation period of the star is  $P = 2.85 \pm 0.18$  days, and the fraction  $S$  of the star's surface covered with cold spots is about 3.3%. According to the observations of the All Sky Automated Survey, for the first time, an estimate of the possible cycle of DS Tuc activity, equal to 1610 days (4.4 years), was obtained.

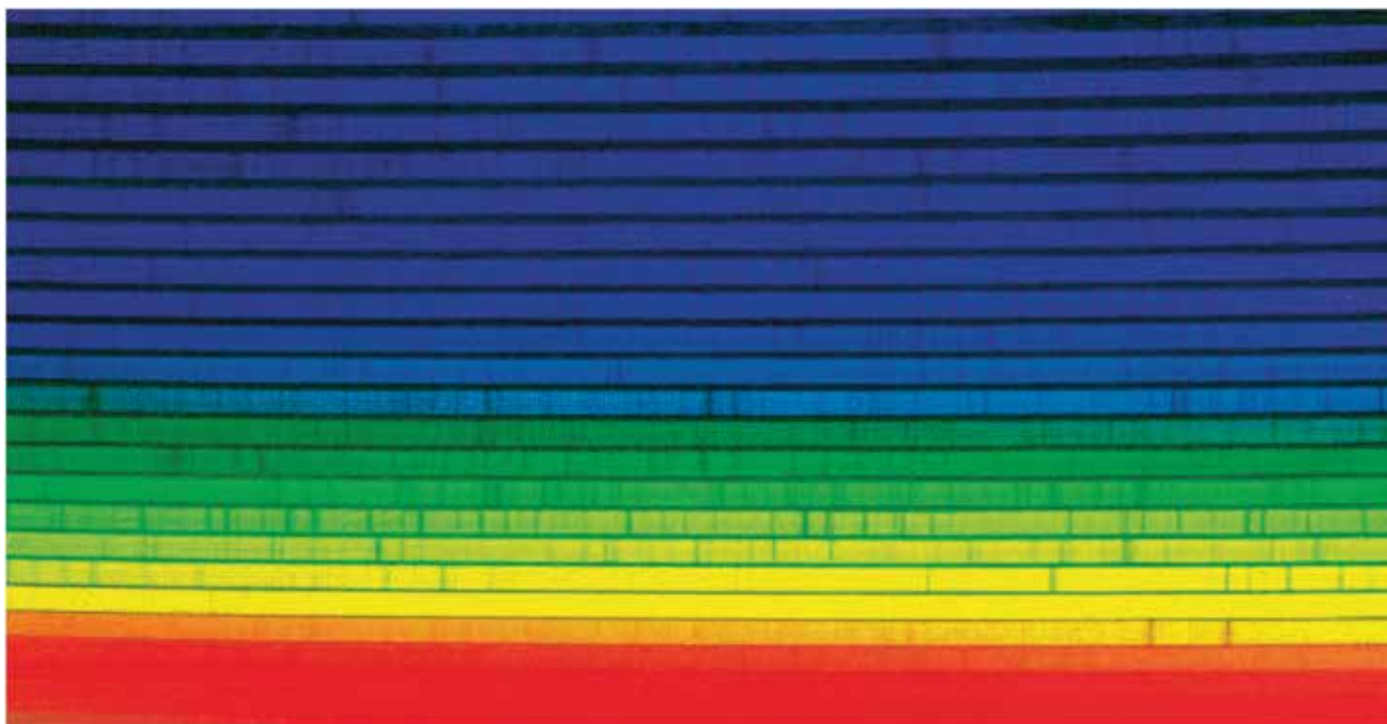
Based on high-precision material from the TESS space mission archive, a study of the photometric variability of a K1 AB Pic (HD 44627) dwarf with a distant giant planet, having mass of 13.5 Jupiter masses, also a member of the Tuc-Hor association, was carried out. During the observation interval of the TESS mission, 48 flares on the star with energies  $6.1 \cdot 10^{32}$  erg –  $3.4 \cdot 10^{35}$  erg were recorded. The estimates of the rotation period of the star,  $P = 3.860 \pm 0.020$  days, the amplitude of the brightness variability, and the spottedness parameter have been obtained. The area of spots on the surface of AB Pic significantly exceeds the area of the ones on the Sun. It was suggested that during the observation interval, the area of spots on the surface of the star showed cyclical changes lasting 233 days, which can be analogous to the Rieger cycle on the Sun. Estimates of longer intervals of AB Pic activity indicated possible cycles of 3.1 and 7.2 years.

The researchers of the Institute studied the photometric variability of two more young analogues of the Sun with planetary systems — the stars HD 63433 (TOI 1726), a member of the Ursa Major moving group with an age of 410 million years, and TOI 451 (CD-38 1467) from the Pisces-Eridanus stellar stream (Psc-Eri) with an age of 120 million years. The periods of rotation of the stars and the amplitude of brightness variability were estimated, as well as the spottedness parameter  $A$  in absolute measure. The area of starspots on the surfaces of HD 63433 and TOI 451 significantly exceeds the area of sunspots and is 24500 mh (millionth of visible hemisphere of the Sun) and 12600–33200 mh, respectively. Estimates of TOI 451 activity indicated possible cycles of 125 and 1280 days. The data for HD 63433 indicate the presence of long-term brightness changes, but are insufficient for quantitative estimates.

The planetary systems studied by the Institute's researchers open up prospects for transit spectroscopy both with the Hubble Space Telescope and the James Webb Space Telescope, and, in the future, with the WSO-UV space mission. The proposed research will provide an opportunity to study the atmospheres of planets that are probably still in the early stages of evolution. The considered systems can play an important role in our understanding of the evolution of planetary systems during the first billion (and even several hundred million) years after their formation.



## ЗВЕЗДНЫЕ АТМОСФЕРЫ STELLAR ATMOSPHERES



Главный инструмент для исследования явлений, происходящих на звездах — получение и анализ звездных спектров. Формирование спектральной линии в атмосфере звезды представляет собой сложный процесс, без понимания деталей которого невозможно уверенно интерпретировать результаты наблюдений. Поэтому в Институте астрономии РАН проводятся разносторонние исследования в области теории звездных спектров. Полученные результаты успешно применяются для изучения механизмов возникновения аномалий химического состава в атмосферах.

Сотрудники, участвующие в работе по теме: Л.И. Машонкина, М.Д. Неретина, Ю.В. Пахомов, А.М. Романовская, Т.А. Рябчикова, Т. М. Ситнова, Н.Н. Чугай.

Работа проводится в сотрудничестве с Государственным астрономическим институтом им. П.К. Штернберга МГУ, Крымской астрофизической обсерваторией РАН, Российским государственным педагогическим университетом имени А. И. Герцена, Специальной астрофизической обсерваторией РАН, а также научными организациями Австрии, Бельгии, Германии, Китая, США, Франции, Швейцарии и Швеции.

Observations and analysis of stellar spectra are the main instrument used for study of phenomena that take place in stars. Formation of a spectral line in the atmosphere of a star is a very complex process and for correct interpretation of observations requires deep understanding of details. In the Institute of Astronomy RAS the comprehensive research in the field of stellar spectra theory is carried on. The results are successfully applied to study the mechanisms of the anomalies in the chemical composition of atmospheres.

Researchers involved in the studies: L.I. Mashonkina, M.D. Neretina, Yu.V. Pakhomov, A.M. Romanovskaya, T.A. Ryabchikova, T.M. Sitnova, N.N. Chugai.

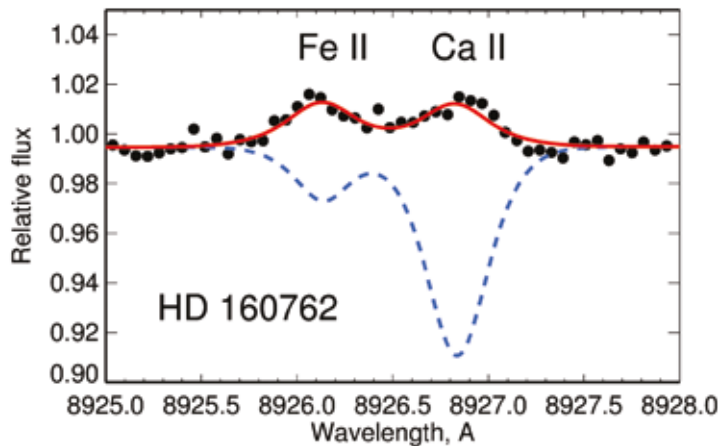
The studies are being carried on in collaboration with Sternberg Astronomical Institute MSU, Crimean Astrophysical Observatory, Herzen State Pedagogical University of Russia, Special Astrophysical Observatory RAS as well as with scientific institutions of Austria, Belgium, Germany, China, USA, France, Switzerland and Sweden.

## ТЕОРИЯ ЗВЕЗДНЫХ СПЕКТРОВ STELLAR SPECTRA THEORY

Исследование физических условий и химического состава вещества в атмосферах звезд основано на изучении их спектров. Интенсивность линий поглощения в спектрах определяется состоянием ионизации и возбуждения атомов под действием излучения и столкновений с частицами. В общем случае расчет теоретического спектра — сложная физическая и математическая проблема. В классическом подходе конкретные процессы возбуждения и ионизации ионов не рассматриваются, — ради упрощения предполагается, что состояние вещества описывается локальным термодинамическим равновесием (ЛТР). Однако во внешних слоях атмосферы это предположение может быть далеко от реальности, ибо излучение здесь не находится в равновесии с веществом. Сотрудники ИНАСАН разработали эффективные методы

Study of physical parameters and chemical abundances of stellar atmospheres is based on analysis of observed stellar spectra. The amount of energy absorbed in a given spectral line depends on the ionisation and excitation state of atoms, which is defined by their interactions with photons and particles. In general, computing spectral line formation is a complicated physical and mathematical problem. In the classical approach, elementary processes in atom are not considered. Instead, to facilitate the solution, one assumes the local thermodynamic equilibrium (LTE). However, this assumption is not valid in the outer atmospheric layers, where the radiation field is far from equilibrium. In INASAN, effective methods of modelling spectral line formation are developed for various chemical species, e.g. Mg I-II, Si I-II-III, K I, Fe I-II-III,

моделирования формирования спектральных линий для различных элементов, например, Mg I-II, Si I-II-III, K I, Fe I-II-III, в рамках общей теории, не предполагающей ЛТП. О необходимости такого подхода можно судить на примере анализа эмиссионных линий ионов кальция (Ca II) и железа (Fe II), а также линий поглощения нейтрального и ионизованного кремния (Si I и Si II) в звездах спектрального класса В. Расчеты в рамках общей теории позволили понять происхождение эмиссионных линий Ca II и Fe II в спектрах этих звезд и согласовать содержание кремния, получаемое по разным линиям.

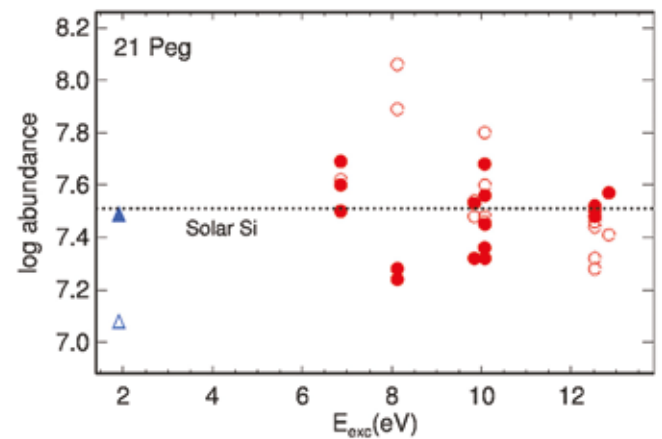


Профиль эмиссионных блендирующих линий Fe II 8926.1 Å и Ca II 8926.8 Å в спектре звезды HD 160762 (B3 IV, черные кружки). Моделирование, основанное на отказе от ЛТП (красная кривая), показало, что эмиссионные линии формируются в атмосфере, которая типична для звезд этого типа, то есть без температурной инверсии и без оболочки. Приближенная теория (синяя штриховая кривая) не может воспроизвести эмиссию в линиях / Emission lines Fe II 8926.1 Å and Ca II 8926.8 Å in the star HD 160762 (B3 IV, black circles). Calculations without the LTE assumption (red curve) prove that the observed emission lines of Fe II and Ca II form in the atmosphere that is typical of B-type dwarf stars, i.e. the atmosphere does not reveal any signature of temperature inversion or surrounding shell. LTE (blue dashed curve) fails to reproduce the emission lines

based on the theory free of the simplified LTE assumption. An advantage of the non-LTE approach is proved by the analysis of emission lines of ionised calcium (Ca II) and iron (Fe II) and also absorption lines of neutral and ionised silicon (Si I and Si II) in B-type stars. The non-LTE calculations permitted us to understand an origin of the Ca II and Fe II emission lines in the spectra of these stars and to make the silicon abundances derived from lines of the two ionisation stages consistent.

#### Основные публикации / Main publications

T. Sitnova, L. Mashonkina, T. Ryabchikova, MNRAS, 477, 3343 (2018)  
S. Alexeeva, T. Ryabchikova et al. ApJ, 866, 153 (2018)



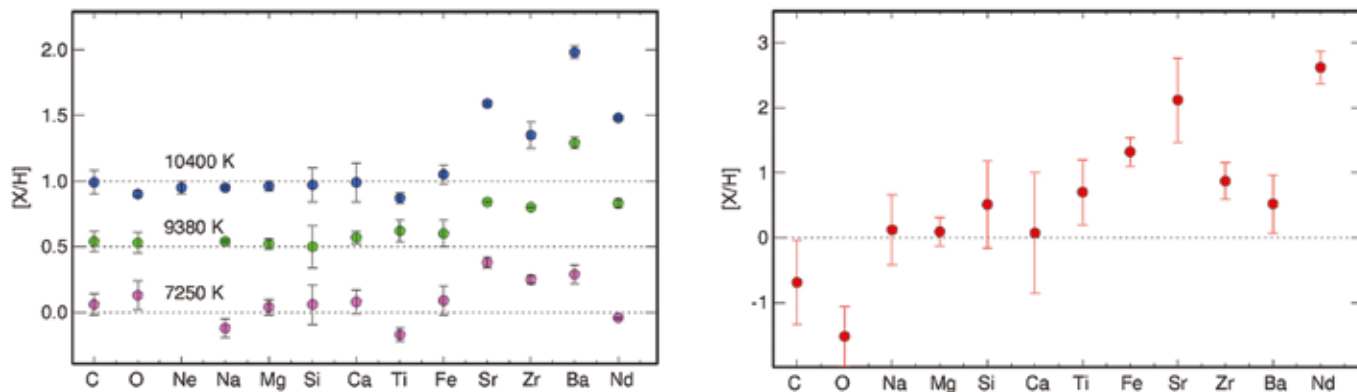
Содержание кремния у звезды 21 Peg (B9.5 V), полученное из анализа индивидуальных линий Si I (синие треугольники) и Si II (красные кружки). Моделирование, основанное на отказе от ЛТП (заполненные символы), уменьшает разброс результатов для линий Si II и обеспечивает согласие содержания, получаемого по линиям двух стадий ионизации, чего нельзя достичь при использовании приближенной теории (открытые символы) / Silicon abundances of the star 21 Peg (B9.5 V) obtained from individual lines of Si I (blue triangles) and Si II (red circles). In contrast to LTE (open symbols), calculations without the LTE assumption (filled symbols) reduce the scatter of data for lines of Si II and provide consistent abundances from the lines of the two ionisation stages

## ХИМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ В АТМОСФЕРАХ А-ЗВЕЗД CHEMICAL ANOMALIES IN ATMOSPHERES OF A-TYPE STARS

Звезды спектрального класса А отличаются большим разнообразием отклонений химического состава их поверхностных слоев от космической (= нормальной = солнечной) распространенности химических элементов. К этому располагают отсутствие поверхностной конвективной зоны, наличие магнитных полей, образование газо-пылевых дисков у быстровращающихся звезд. Вероятным механизмом изменения содержания отдельных элементов в поверхностных слоях является атомная диффузия. От каких параметров звезд зависит эффективность диффузии? Действует ли диффузия в А-звездах с нормальным химическим составом (нормальные А-звезды)? Сотрудники ИНАСАН впервые получили систему однородных точных данных о содержании химических элементов от гелия до неодима у медленно вращающихся нормальных А-звезд. Используемый метод основан на моделировании спектров высокого разрешения при полном учете физических процессов, определяющих кинетику ионизации и возбуждения. У всех изученных нами звезд присутствуют избытки содержания тяжелых элементов Sr, Zr, Ba и Nd относительно Солнца, тогда как более легкие

The range of A spectral types is known by chemical anomalies of various kinds. Deviations from cosmic (= normal = solar) abundances in the atmospheres of A-type stars are favoured by the absence of a surface convective zone, the presence of magnetic fields, the formation of gas-dust disks in rapidly rotating stars. Probably, an origin of chemical anomalies is connected with atomic diffusion. What stellar parameters do determine an efficiency of diffusion? Does diffusion operate in A-type stars with normal chemical composition (normal A-type stars)? In INASAN, a homogeneous set of accurate abundances for helium to neodimium has been developed for a sample of normal and slowly rotating A-type stars. The abundance determinations are based on analysis of high-resolution stellar spectra and spectral line formation taking into account all the physical processes that determine the kinetic equilibrium of atoms. Each star reveals enhancements of heavy elements Sr, Zr, Ba, and Nd with respect to the Sun, while the lighter elements from C to Fe follow the solar abundance pattern. It was concluded for the first time that enhancements of heavy





Содержание элементов  $[X/H] = \log(\text{elem}/H) - \log(\text{elem}/H)_{\odot}$  у звезд спектрального класса А.

Слева: Три нормальные звезды с разными эффективными температурами. Данные для разных звезд сдвинуты по оси ординат для ясности. У каждой из звезд содержание Sr, Zr, Ba и Nd выше, чем у Солнца, а элементы от С до Fe имеют солнечное содержание в пределах ошибки определения.

Справа: Среднее содержание для семи Ap-звезд с эффективными температурами от 8800 до 10200 К. У всех звезд наблюдается дефицит элементов С, N, O по сравнению с солнечным содержанием. В отличие от нормальных А-звезд, избытки относительно солнечного содержания, наблюдаемые у Ap-звезд, намного меньше для бария по сравнению с Sr и Nd / *Elemental abundances  $[X/H] = \log(\text{elem}/H) - \log(\text{elem}/H)_{\odot}$  of A-type stars.*

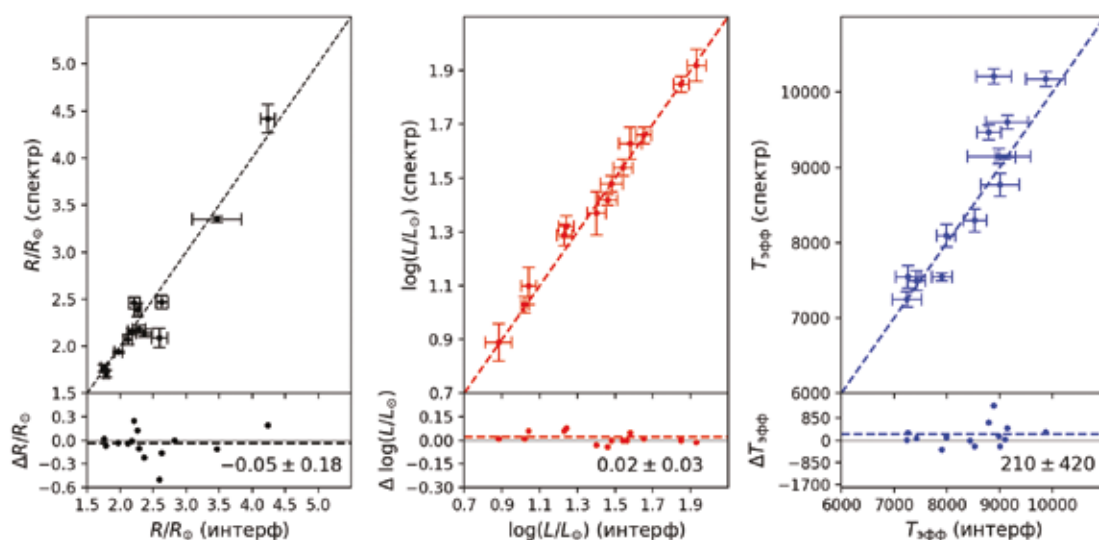
*Left panel: Three stars with different effective temperatures. For better visibility, the data for different stars are shifted along the Y axis. In each star, abundances of Sr, Zr, Ba, and Nd are higher than in the Sun, while abundances of the elements from C to Fe are consistent with the solar ones, within the error bars.*

*Right panel: Average abundances for seven Ap-stars in the 8800–10200 K effective temperature range. In each star, abundances of C, N, O are lower than in the Sun. In contrast to the normal A-type stars, an enhancement of Ba is lower than that for Sr and Nd*

элементы от С до Fe имеют солнечное содержание. Эти результаты впервые позволяют сделать вывод, что избытки тяжелых элементов в поверхностных слоях являются общим признаком звезд спектрального класса А. Магнитные химически-пекулярные (Ap) звезды также относятся к спектральному классу А, но, в отличие от нормальных звезд, химический состав их атмосфер обладает ярко выраженными аномалиями, которые оказывают существенное влияние на формирование выходящего потока. В рамках программы по определению фундаментальных параметров Ap-звезд — эффективных температур, радиусов и светимостей — прямыми (интерферометрия) и косвенными (спектроскопия) методами, проводимой сотрудниками ИНАСАН совместно с астрофизиками Франции, Германии и Португалии, был выполнен детальный спектроскопический анализ для 13 объектов. Отличительной особенностью Ap-звезд являются избытки относительно солнечного содержания у тяжелых элементов. Они могут

elements in the surface layers is a common property of A-type stars.

Magnetic chemically-peculiar (Ap) stars also belong to the A spectral class, but, in contrast to the normal A-stars, chemical composition of their atmospheres possesses prominent abundance anomalies which significantly affect the radiation transfer. In frames of the programme on the determination of Ap-star fundamental parameters — effective temperatures, radii, and luminosities — by direct (interferometry) and indirect (spectroscopy) methods that is carried out by astrophysists from INASAN, France, Germany, and Portugal, detailed spectroscopic analysis of 13 objects was performed. The main chemical anomaly of Ap stars is very large overabundance of the heavy elements relative to their solar abundances that may exceed four orders of magnitude. Very strange behaviour was found for the Ba abundance. While in normal A-stars Ba shows a maximal overabundance among



Радиусы ( $R/R_{\text{sun}}$ ), светимости ( $L/L_{\text{sun}}$ ) и эффективные температуры ( $T_{\text{эфф}}$ ), полученные спектроскопическими методами для выборки Ap-звезд, согласуются с результатами, основанными на интерферометрических измерениях /

*Fundamental parameters — radii ( $R/R_{\text{sun}}$ ), luminosities ( $L/L_{\text{sun}}$ ), and effective temperatures ( $T_{\text{eff}}$ ) derived by spectroscopic methods for a representative group of Ap-stars agree with the results based on the interferometric measurements*

превышать четыре порядка величины. Но обнаружено странное поведение Ba. Если у нормальных A-звезд Ba имеет максимальный избыток среди всех тяжелых элементов, то в Ap-звездах, наоборот, у Ba наблюдается минимальный избыток. Согласно современным представлениям, химические аномалии в атмосферах Ap-звезд, стабилизированных магнитным полем, объясняются процессом атомной диффузии. Какие процессы приводят к избыточному содержанию Sr, Zr, Ba и Nd в атмосферах нормальных A-звезд? Полученные результаты открывают новые возможности для построения теории физических процессов в недрах звезд промежуточных масс и ответа на вопрос о ключевых факторах, определяющих процессы сепарации химических элементов по глубине в атмосферах A-звезд.

Эффективная температура, радиус и светимость исследуемых Ap-звезд были определены из сравнения наблюдаемого распределения энергии с теоретическими потоками, рассчитанными с полученным содержанием химических элементов. Показано, что значения фундаментальных параметров, полученных по спектральным и интерферометрическим наблюдениям, хорошо согласуются между собой в пределах точности соответствующих измерений. А это значит, что спектроскопические методы могут обеспечить надежные фундаментальные параметры для далеких звезд, недоступных для интерферометрии.

the other heavy elements, Ba in the Ap stars, on the contrary, has a minimal enhancement. According to the present conceptions, abundance anomalies in the atmospheres of Ap stars that are stabilized by the magnetic field are produced by atomic diffusion. The question is what processes do lead to overabundances of Sr, Zr, Ba, and Nd in the atmospheres of normal A-stars? The obtained results open up new possibilities for constructing the theory of physical processes in intermediate-mass stars and answering the question of key factors that determine the processes of separation of chemical elements by depth in the atmospheres of A-stars.

Effective temperatures, radii, and luminosities of the sample of Ap-stars were derived from a comparison of the observed energy distributions with the theoretical fluxes calculated using the individual star chemical composition. It was shown that fundamental parameters derived from spectral observations are consistent with those based on the interferometric measurements, within the errors of both methods. This means that spectroscopic methods can provide reliable fundamental parameters of distant stars which are inaccessible for interferometry.

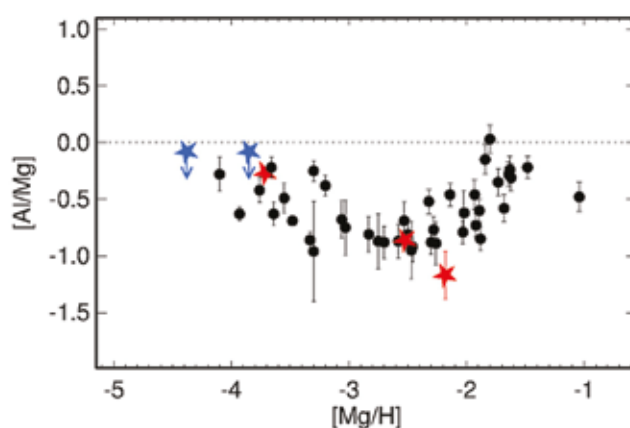
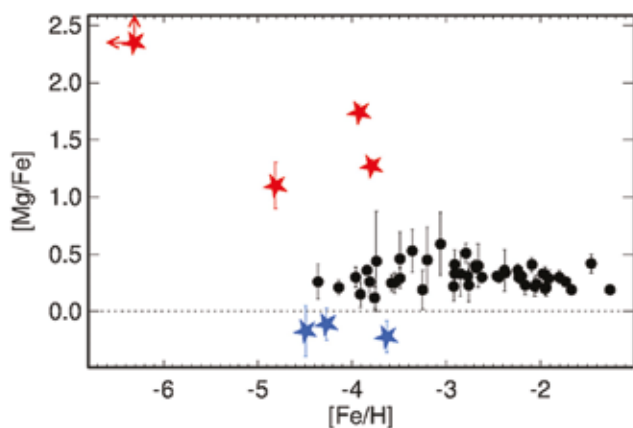
#### Основные публикации / Main publications

A. Romanovskaya, T. Ryabchikova, et al. MNRAS, 488, 2343 (2019)  
L. Mashonkina, T. Ryabchikova, et al. MNRAS, 499, 3706 (2020)  
K. Perraut, M. Cunha, A. Romanovskaya, et al. A&A, 642, A101 (2020)

## ЗВЕЗДЫ С ДЕФИЦИТОМ МЕТАЛЛОВ — ОКНО В ПРОШЛОЕ ГАЛАКТИК METAL-POOR STARS IS A WINDOW INTO THE PAST OF GALAXIES

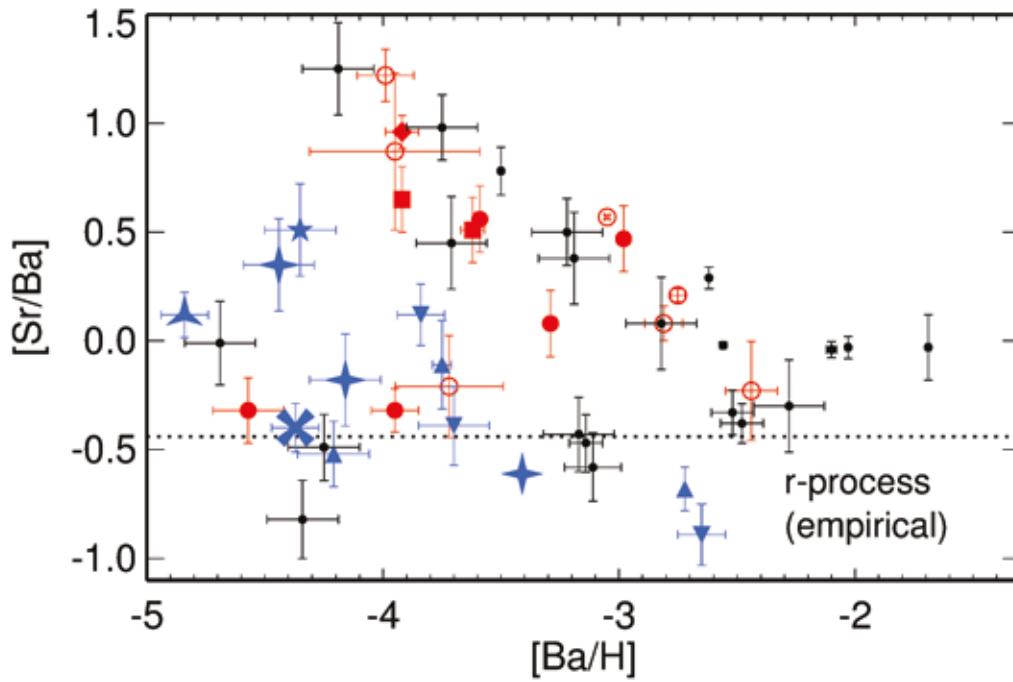
Звезды с экстремально низким содержанием железа (более, чем на 3 порядка, ниже солнечного, т.е. с  $[Fe/H] < -3$ ) — древнейшие звезды Галактики (население II.5). Они хранят информацию о начальных этапах химического обогащения галактического вещества первыми сверхновыми звездами. Сотрудники ИНАСАН определили эффективную температуру и поверхностное ускорение силы тяжести для выборки звезд гало Галактики, включая звезды с  $[Fe/H] < -3$ , впервые комплексным методом с использованием фотометрических и спектральных наблюдений, расстояний, измеренных космической обсерваторией Gaia, и изохрон. Для каждой из звезд определено содержание Na, Al, Mg, Ca, Ti и Fe. Преимуществом новых данных является наиболее полный учет физических процессов при моделировании теоретического спектра. Большинство звезд нашей выборки имеют избыток

Extremely metal-poor (EMP,  $[Fe/H] < -3$ ) stars are the oldest stars (Population II.5) of the Galaxy. They trace an early chemical enrichment produced by the first supernovae. In INASAN significant efforts have been made to determine effective temperatures and surface gravities of a sample of the Galactic halo stars that include the EMP stars, using for the first time a complex method based on photometric and spectral observations, distances measured by the space observatory Gaia, and isochrones. For each star, abundances of Na, Al, Mg, Ca, Ti, and Fe were derived from analysis of high-resolution spectra. An advantage of these new results is in their high accuracy, which was achieved owing to detailed consideration of physical processes in stellar atmospheres, when calculating the theoretical spectra. The majority of the sample stars reveal an enhancement of magnesium relative to iron



Относительное содержание  $[Mg/Fe]$  (левая панель) и  $[Al/Mg]$  (правая панель) у исследуемых звезд. Красными и синими символами выделены звезды с аномальным отношением  $[Mg/Fe]$ , которые, вероятно, принадлежат населению II.5 /  $[Mg/Fe]$  (left panel) and  $[Al/Mg]$  (right panel) abundance ratios of the sample stars. The probable Population II.5 stars are marked by the red and blue symbols





Отношение содержания Sr/Ba в галактиках ультра-низкой светимости (синие символы: *Boötes I*, *Coma Berenices*, *Leo IV*, *Segue 1*, *Tri II*, *UMa II*) ниже, чем в классических сфероидальных галактиках (красные символы: *Sculptor*, *Ursa Minor*, *Sextans*, *Fornax*) и в нашей Галактике (черные кружки) при том же содержании бария / *The [Sr/Ba] abundance ratios in the UFDs (blue symbols: Boötes I, Coma Berenices, Leo IV, Segue 1, Tri II, UMa II) are lower than that in the classical dwarf spheroidal galaxies (red symbols: Sculptor, Ursa Minor, Sextans, Fornax) and the MW (black circles) for stars of close Ba abundance*

магния относительно железа —  $[Mg/Fe] \approx 0.3$ , который типичен для населения гало (Pop II). Но у 7 звезд значение  $[Mg/Fe]$  сильно отличается от 0.3, что свидетельствует о влиянии единичных эпизодов нуклеосинтеза на их химический состав, разным относительном выходе Mg и Fe у сверхновых разных масс и неполном перемешивании продуктов нуклеосинтеза в межзвездной среде. Это наиболее вероятные представители населения Pop II.5. Для другой пары элементов —  $[Al/Mg]$  — разброс отсутствует, что указывает на их общее происхождение. Содержание химических элементов, полученное для древнейших звезд, имеет важное значение для тестирования моделей начального химического обогащения Галактики.

Сотрудники ИНАСАН впервые получили систему однородных и точных данных о содержании химических элементов от натрия до бария у выборки звезд с большим дефицитом железа в карликовых галактиках, являющихся спутниками нашей галактики Млечный Путь (МП). Обнаружено, что химическая эволюция галактик ультранизкой светимости — с барионной массой менее  $10^6$  солнечной массы — отличается от эволюции массивных галактик — МП ( $M \sim 2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ ) и классических сфероидальных галактик ( $M \sim 10^8 M_{\odot}$ ) — в отношении производства стронция. В массивных галактиках наблюдаемое отношение содержания Sr/Ba свидетельствует о двух каналах производства Sr на начальных этапах их эволюции — r-процесс и еще один, более эффективный источник, природа которого остается неизвестной. В галактиках ультранизкой светимости второй источник тоже действовал, но почему-то с малым выходом Sr, поэтому отношение содержания Sr/Ba в них меньше, чем в массивных галактиках при том же содержании Ba. Найденные зависимости отношения содержания Sr/Ba от содержания Ba крайне важны для понимания зависимости процессов звездообразования от массы галактики, для выяснения механизмов и места синтеза стронция.

of  $[Mg/Fe] \approx 0.3$ , which is typical for the halo stellar population (Pop II). Substantial deviations from  $[Mg/Fe] = 0.3$  were found for seven UMP stars, suggesting a contribution to stellar Mg and Fe abundances from a small number of supernova explosions with different progenitor mass and different nucleosynthetic yields and an incomplete mixing of the interstellar gas. These stars are most probable representatives of Population II.5. For  $[Al/Mg]$ , the scatter of data for stars of close Mg abundance is at the level of abundance errors, and this is indicative of a common origin of Al and Mg. Accurate chemical abundances of these ancient stars are important for constraining the Galactic chemical evolution models.

In INASAN a homogeneous set of accurate abundances of chemical elements from Na to Ba was obtained for the first time for a sample of very metal-poor stars in the dwarf galaxies orbiting the Milky Way (MW). It was found that chemical evolution of the ultra-faint dwarf galaxies (UFDs) — they have less than  $10^6$  stars — is distinct from evolution of the massive galaxies, namely, the MW ( $M \sim 2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ ) and the classical dwarf spheroidal galaxies ( $M \sim 10^8 M_{\odot}$ ), with respect to Sr production. The Sr/Ba abundance ratios observed in the massive galaxies suggest two channels of the early Sr production, that is the r-process and another, more efficient source whose nature remains unknown. In the UFDs, the second source worked, too, but with less Sr yields, resulting in lower Sr/Ba ratios compared with that for the massive galaxies. The obtained trends of Sr/Ba with Ba abundance are important for understanding star formation depending on the galaxy mass and for making clear the mechanisms and astrophysical sites of the Sr production.

#### Основные публикации / Main publications

- L. Mashonkina, P. Jablonka, et al. *A&A*, 608, A89 (2017)  
 T.M. Sitnova, L.I. Mashonkina, et al. *MNRAS*, 485, 3527 (2019)  
 T.M. Sitnova, L.I. Mashonkina, et al. *MNRAS*, 504, 1183 (2021)

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЗВЕЗДЫ NONSTATIONARY STARS



Характеристики большинства звезд на протяжении значительной части их жизни остаются примерно постоянными. Особый интерес для астрофизики представляют звезды, обладающие переменностью блеска, формы спектра и других характеристик. В Институте астрономии РАН в сотрудничестве с ГАИШ МГУ выполняется масштабный проект — составление «Общего каталога переменных звезд». Проект охватывает переменные звезды всех типов, но некоторым их видам — цефеидам, взрывным переменным, красным гигантам — в ИНАСАН уделяется особое внимание. «Экстремальным» проявлением звездной нестационарности являются вспышки новых и сверхновых звезд. На протяжении многих лет в ИНАСАН разрабатываются различные сценарии, ведущие к вспышке сверхновой типа Ia — термоядерному взрыву на белом карлике, а также исследуются особенности взаимодействия сброшенной оболочки звезды с околозвездным веществом.

Сотрудники, участвующие в работе по теме: С.Ф. Величко, Н.А. Горыня, А.М. Зубарева, Е.В. Казаровец, Е.Н. Канев, Е.А. Карицкая, Н.Н. Киреева, Д.М. Колесникова, Е.Н. Пастухова, Ю.В. Пахомов, В.Б. Пузин, И.С. Саванов, Н.Н. Самусь, М.Е. Сачков, И.В. Соколов, Т.Г. Соловьева, А.В. Тутуков, В.П. Утробин, Ю.А. Фадеев, А.Б. Фокин, А.В. Хруслов, Н.Н. Чугай, Л.Р. Юнгельсон.

Работа проводится в сотрудничестве с Всероссийским институтом научной и технической информации, Государственным астрономическим институтом им. П.К. Штернберга МГУ, Институтом космических исследований РАН, Казанским федеральным университетом, Крымской астрофизической обсерваторией РАН, Специальной астрофизической обсерваторией РАН, а также научными организациями Германии, Индии, США и Швеции.

Parameters of most stars are almost constant during significant part of their lives. Stars characterized by variability of brightness, spectrum shape and other characteristics are of special interest for astrophysics. Institute of Astronomy RAS in collaboration with SAI MSU works on a big project — General Catalog of Variable Stars (GCVS). The project covers variables of all types but some of them (e.g. cepheids, eruptive variables and red giants) deserve special attention in INASAN. The extreme manifestations of stellar nonstationarity are novae and supernovae. For many years INASAN developed various scenarios of stellar evolution leading to the type Ia supernova — thermonuclear explosion of a white dwarf, as well as studied the peculiarities of interaction of the ejected shell of the star with the circumstellar material.

Researchers involved in the studies: S.F. Velichko, N.A. Gorynya, A.M. Zubareva, E.V. Kazarovets, E.N. Kanev, E.A. Karitskaya, N.N. Kireeva, D.M. Kolesnikova, E.N. Pastukhova, Yu.V. Pakhomov, V.B. Puzin, I.S. Savanov, N.N. Samus, M.E. Sachkov, I.V. Sokolov, T.G. Solovyova, A.V. Tutukov, V.P. Utrobin, Yu.A. Fadeyev, A.B. Fokin, A.V. Khruslov, N.N. Chugai, L.R. Yungelson.

The studies are being carried on in collaboration with All-Russian Institute for Scientific and Technical Information, Sternberg Astronomical Institute MSU, Space Research Institute RAS, Kazan Federal University, Crimean Astrophysical Observatory, Special Astrophysical Observatory as well as with scientific institutions of Germany, India, USA and Sweden.





До Второй мировой войны регулярное составление каталогов переменных звезд осуществлялось в Германии. Затем Исполком МАС принял решение передать эту важную работу в СССР. В проект включились два коллектива, уже накопившие опыт исследований переменных звезд — в Астросовете АН СССР под руководством Б.В. Кукаркина (1909–1977) и в МГУ под руководством П.П. Паренаго (1906–1960). Кооперация сохранилась до сих пор. Сейчас группа Общего каталога переменных звезд (ОКПЗ) Отдела нестационарных звезд и звездной спектроскопии ИНАСАН работает совместно с группой переменных звезд Отдела изучения Галактики и переменных звезд ГАИШ МГУ. Объединенным коллективом руководит ведущий научный сотрудник ИНАСАН д.ф.-м.н. проф. Н.Н. Самусь.

В 1985–1995 гг. в издательствах «Наука» и «Космосинформ» вышло в свет четвертое, пятитомное издание ОКПЗ. В настоящее время каталог поддерживается и обновляется в электронной форме. Сайт ОКПЗ находится по адресу: <http://www.sai.msu.su/gcvs>

В ОКПЗ включены только переменные звезды, изученные достаточно детально. Менее изученные звезды входят в составляемые под руководством Е.В. Казаровец каталоги звезд, заподозренных в переменности блеска.

В последние годы завершена большая работа по уточнению координат всех звезд ОКПЗ, что потребовало проверки идентификации десятков тысяч звезд с использованием карт их окрестностей. Теперь возможна автоматическая идентификация с ОКПЗ переменных звезд, в больших количествах выявляемых в автоматических обзорах неба. В систему ОКПЗ за последние годы включены тысячи переменных звезд в шаровых скоплениях Галактики, ранее не включавшиеся в этот каталог по историческим причинам. Информацию ОКПЗ предстоит максимально интегрировать в систему Российской и Международной виртуальной обсерватории.

В 2005 г. коллектив группы ОКПЗ, совместно с ГАИШ МГУ и проектом Астронет, возобновил издание журнала «Переменные звезды», основанного Б.В. Кукаркиным еще в 1928 г. Теперь журнал издается в электронном виде на английском языке. Сайт журнала: <http://www.astronet.ru/db/varstars>.

### Основные публикации / Main publications

Н.Н. Самусь. Историко-астрономические исследования, вып. 34, 69 (2009).

N.N. Samus, S.V. Antipin. Highlights of Astronomy, 16, 687 (2015)

N.N. Samus, E.V. Kazarovets, O.V. Durlevich, N.N. Kireeva, E.N.

Pastukhova. Astron. Rep., 61, 80 (2017)

Prior to the World War II, catalogs of variable stars were regularly compiled in Germany. Then, the IAU Executive Committee decided that this important task should be fulfilled in the USSR. The responsibility for the project was assumed by two teams already experienced in variable-star studies: in the Astronomical Council of the USSR Academy of Sciences, headed by B.V. Kukarkin (1909–1977), and in the Moscow State University, headed by P.P. Parenago (1906–1960). This cooperation continues until now. Currently, the team of the General Catalogue of Variable Stars (GCVS) in the Department of Variable Stars and Stellar Spectroscopy of the INASAN works together with the variable-star team in the Department of Galaxy Studies and Variable Stars of the Sternberg Astronomical Institute (SAI), Moscow University. The joint team is headed by the INASAN leading research associate, Prof. N.N. Samus.

In 1985–1995, the fourth, five-volume edition of the GCVS was published by the “Nauka” and “Kosmosinform” publishers. Further on, the catalog is being supported and updated in the electronic form. The GCVS site can be found at <http://www.sai.msu.su/gcvs/>

The GCVS includes only those variable stars that were studied in sufficient detail. Less studied stars enter catalogs of suspected variable stars, compiled under the leadership of E.V. Kazarovets.

In the recent years, a large job of improving the coordinates of all GCVS stars was finished; it required identification checks for tens of thousands of stars using finding charts. It makes possible automatic identification of variables, currently being discovered, in large numbers, in automatic sky surveys, with the GCVS. Thousands of variable stars in the Galaxy’s globular clusters, earlier left outside this catalog for reasons of tradition, have been incorporated into the GCVS system in the recent years. The GCVS information should be integrated, as completely as possible, into Russian and International Virtual Observatories.

In 2005, the GCVS team resumed publishing the journal “Peremennye Zvezdy/Variable Stars”, founded by B.V. Kukarkin as early as in 1928. It is now an electronic journal, published in English. It can be found at <http://www.astronet.ru/db/varstars/>



Пульсирующие переменные типа W Vir принадлежат к цефеидам населения II и наблюдаются как среди звезд сферической составляющей галактического поля, так и в шаровых звездных скоплениях. По современным представлениям, пульсационная переменность типа W Vir возникает в маломассивных звездах с низким содержанием металлов, находящихся на эволюционной стадии двойного слоевого источника. Предполагается, что на этой стадии эволюции звезда может покинуть асимптотическую ветвь гигантов (AGB) и на непродолжительное время переместиться на диаграмме Герцшпрунга-Рассела (ГР) в пределы полосы пульсационной неустойчивости цефеид. Тем не менее природа переменных типа W Vir остается не вполне ясной, поскольку выводы прежних исследований опираются на результаты расчетов звездной эволюции, в которых возникновение радиальных пульсаций рассматривается с привлечением упрощающих предположений.

Сотрудники ИНАСАН исследовали эволюционный статус переменных типа W Vir на основе согласованных расчетов звездной эволюции и нелинейных звездных пульсаций. Были проведены расчеты эволюции звезд с массой на главной последовательности  $0.82 M_{\odot}$  при начальном содержании гелия  $Y = 0.25$  и содержании более тяжелых элементов  $Z = 10^{-3}$ . Звездная эволюция рассматривалась от главной последовательности до превращения звезды в белый карлик. С учетом неопределенностей в современных наблюдательных оценках скорости потери массы на стадии AGB были рассчитаны более десятка эволюционных последовательностей при значениях параметра  $0.01 \leq \eta_B \leq 0.12$ , величина которого пропорциональна скорости потери массы. Расчеты показали, что, если в момент максимума энерговыделения гелиевого слоевого источника ( $L_{\text{He}}$ ) масса водородной оболочки составляет около 2% массы звезды, то эволюционный трек описывает протяженную петлю на диаграмме ГР.

В согласованных расчетах звездной эволюции и нелинейных звездных пульсаций отдельные модели эволюционных последовательностей используются как начальные условия при решении уравнений радиационной гидродинамики и нестационарной конвекции, описывающих радиальные пульсации звезды. На основе согласованных расчетов сотрудники ИНАСАН установили, что область пульсационной неустойчивости маломассивных post-AGB звезд простирается на диаграмме ГР от асимптотической ветви красных гигантов до эффективных температур  $T_{\text{eff}} \approx 6000$  К. Периоды пульсаций гидродинамических моделей составляют от 15 до 50 сут и находятся в пределах типичных значений периода переменных типа W Vir. Более того, при  $\eta_B = 0.07$  и  $\eta_B = 0.1$  эволюционный трек описывает петлю в сторону низких эффективных температур, и звезда в течение непродолжительного времени ( $t \sim 10^3$  лет) снова оказывается в области пульсационной неустойчивости. Таким образом, полученные результаты объясняют существование переменных типа W Vir как с убывающими, так и с возрастающими значениями периода. Теоретические оценки скорости изменения периода находятся в согласии с наблюдениями. Массы рассмотренных эволюционных и гидродинамических моде-



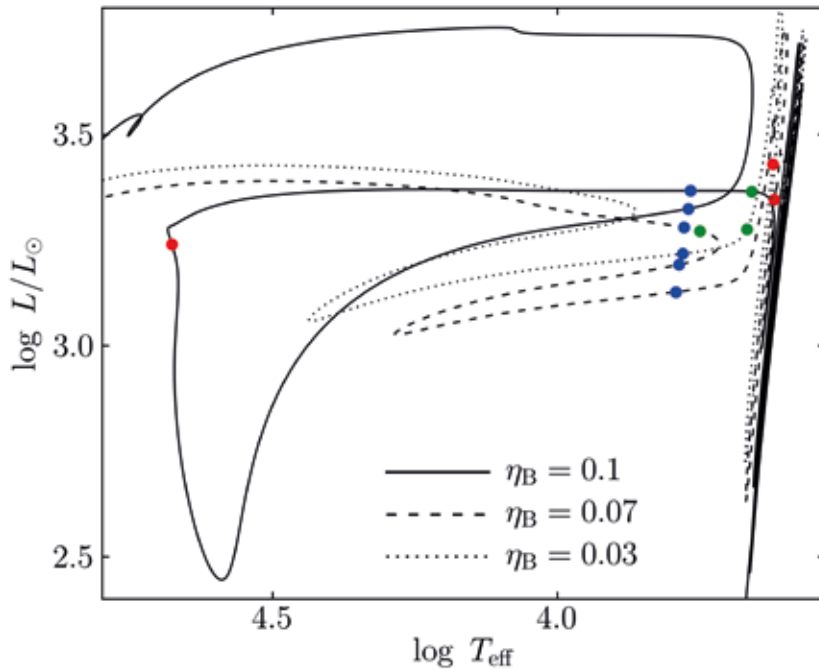
Сканер, используемый для перевода московской фототеки в цифровую форму / The scanner used to digitize the Moscow plate stacks

W Vir pulsating variables belong to population II cepheids and are observed among field stars as well as in globular clusters. At present, the W Vir type pulsation variability is thought to occur in low-mass metal-poor double-shell source stars. It is assumed that the star may leave the asymptotic giant branch (AGB) and cross the Hertzsprung-Russel (HR) diagram for a relatively short time towards the cepheid instability strip. Nevertheless, the nature of W Vir variables is still poorly understood because the former studies were mostly based on results of stellar evolution calculations, whereas stellar pulsations were treated with strong simplifying assumptions.

In the present study, the evolutionary status of W Vir variables is considered on the basis of consistent stellar evolution and nonlinear stellar pulsation calculations. In INASAN, the evolutionary calculations were carried out for stars with initial mass  $0.82 M_{\odot}$  and initial helium and metal abundances of  $Y = 0.25$  and  $Z = 10^{-3}$ . Stellar evolution was considered from the main sequence to the white dwarf stage. With the existing uncertainties in observational estimates of mass loss rate of AGB stars, a dozen of evolutionary sequences were calculated for the parameter  $0.01 \leq \eta_B \leq 0.12$ , which is proportional to the mass loss rate. The calculations have shown that, if the maximum energy release of the helium shell-source ( $L_{\text{He}}$ ) during the final thermal flash occurs when the mass of the hydrogen envelope is nearly 2% of the stellar mass, then the stellar evolution passes through the extended loop in the HR diagram.

In consistent stellar evolution and nonlinear stellar pulsation calculations, the selected models of the evolutionary sequence are used as initial conditions in solution of the equations of radiation hydrodynamics and time-dependent convection describing radial pulsations of the star. In INASAN, the region of pulsation instability of low-mass post-AGB stars was found to span between AGB and the effective temperatures as high as  $T_{\text{eff}} \approx 6000$  K. Pulsation periods of hydrodynamic models range from 15 to 50 days and agree with typical periods of W Vir variables. As seen from the plots for  $\eta_B = 0.07$  and  $\eta_B = 0.1$ , the maximum of  $L_{\text{He}}$  is followed by the redward loop in the HR





Эволюционные треки звезд на стадиях AGB и post-AGB, когда масса водородной оболочки уменьшается до одного процента массы звезды, при значениях параметра скорости потери массы  $\eta_B = 0.1$  (сплошная линия),  $\eta_B = 0.07$  (штриховая линия) и  $\eta_B = 0.03$  (пунктирная линия). Красный кружок на каждом треке соответствуют максимуму энерговыделения гелиевого слоевого источника, а зеленый кружок — началу эволюционной стадии post-AGB. Синими кружками отмечена высокотемпературная граница области пульсационной неустойчивости / Evolutionary tracks of AGB and post-AGB (when the mass of the hydrogen envelope becomes less than a percent of the stellar mass) stars for the mass loss rate parameter  $\eta_B = 0.1$  (solid line),  $\eta_B = 0.07$  (dashed line) and  $\eta_B = 0.03$  (dotted line). The red and green circles on the track correspond to the maximum of  $L_{He}$  and the onset of the post-AGB stage. The high temperature edge of pulsation instability is marked by the blue circle

лей переменных типа W Vir составляют  $0.52M_{\odot} \leq M \leq 0.55M_{\odot}$ , а возраст —  $12.4 \times 10^9$  лет. Таким образом, пульсирующие переменные типа W Vir являются маломассивными post-AGB звездами на стадии финальной тепловой вспышки гелиевого слоевого источника.

В ИНАСАН активно ведутся исследования важного типа пульсирующих переменных звезд — цефеид. Н.А. Горыня работает в области наблюдательного исследования лучевых скоростей цефеид. Скорость движения поверхностных слоев цефеиды вдоль луча зрения, измеряемая на основе эффекта Доплера, отражает как движение звезды в пространстве, так и движения ее поверхностных слоев, обусловленные пульсациями. Объединение этой информации с фотометрическими данными позволяет уверенно определить геометрические размеры и расстояние до цефеиды. Создан самый большой в мире массив оригинальных высокоточных измерений лучевых скоростей цефеид. По лучевым скоростям удалось открыть несколько новых спектрально-двойных цефеид; их исследование возможно лишь на основе многолетней программы, какой и является программа ИНАСАН. Вместе с результатами других групп исследователей, занимающихся измерениями лучевых скоростей, это позволяет оценить нижний предел встречаемости спектрально-двойных систем среди цефеид как  $29\% \pm 8\%$ .

Систематическим поиском и исследованием пульсирующих переменных звезд с сосуществующими несколькими периодами пульсаций занимается А.В. Хруслов. Ему удалось открыть двойную и множественную периодичность более чем у 300 пульсирующих переменных звезд разных типов (цефеид, звезд типа RR Лиры, звезд типа  $\delta$  Щита с большой амплитудой переменности).

В последние годы астрономы ИНАСАН совместно с ГАИШ МГУ ведут программу поиска новых переменных звезд по сканам фотопластинок из фототеки ГАИШ. Обнаружено около 1500 новых переменных звезд. К измерениям по сканам для 275 переменных звезд в поле размером 100 квадратных градусов совместно с астрономами из США и Чили была применен алгоритм Random Forest для автоматической классификации. Параллельно была проведена неавтоматическая классификация квалифицированными экспертами. Удовлетворительные результаты автоматиче-

diagram, so that the star crosses the region of pulsation instability for a rather short time interval ( $t \sim 10^3$  yr). Thus, the calculations explain the existence of W Vir variables with both gradually increasing and gradually decreasing periods. The theoretical estimates of the period change rate are in overall agreement with observations. The masses of evolutionary and hydrodynamic models of W Vir variables are  $0.52M_{\odot} \leq M \leq 0.55M_{\odot}$  and the star age is  $12.4 \times 10^9$  yr. Therefore, W Vir pulsating variables are the low-mass post-AGB stars on the evolutionary stage of the final thermal flash of the helium shell-source.

Studies of Cepheids, an important type of pulsating variable stars, are devotedly performed in the INASAN. N.A. Gorynya is engaged in observational studies of Cepheid radial velocities. The velocity of the surface layers of a Cepheid along the line of sight measured from Doppler effect reflects the star's motion in space as well as pulsation-driven motion of the surface. Combining this information with photometry, it is possible to reliably determine the Cepheid's geometric size and its distance. The world's richest archive of original high-accuracy measurements of Cepheid radial velocities has been compiled. Several new spectroscopic-binary Cepheids have been discovered from these radial velocities; their studies require a many-year program. Together with the results obtained by other research groups, these findings permit to estimate the lower occurrence limit of spectroscopic binaries among Cepheids as  $29\% \pm 8\%$ .

A.V. Khruslov is engaged in a systematic search for pulsating variable stars with several co-existing pulsation periods as well as in their studies. He was able to discover double or multiple periodicity for more than 300 pulsating variable stars of different types (Cepheids, RR Lyrae stars, high-amplitude  $\delta$  Scuti stars).

In the recent years, INASAN astronomers, jointly with the Sternberg Astronomical Institute (SAI), perform a program aimed at search for new variable stars using scans of sky photographs from SAI stacks. The number of discovered new variables is already about 1500. Our researcher, together with astronomers from the USA and Chile, used measurements obtained from scans for 275 variable stars in a field of 100 square degrees to apply the Random Forest algorithm of

ской классификации были получены для 88% переменных звезд выборки. Данные московской и зоннебергской фототек используются в международном исследовании долговременной переменности уникальной звезды, обнаруженной Т. Бояджян, в котором приняли участие астрономы ИНАСАН.

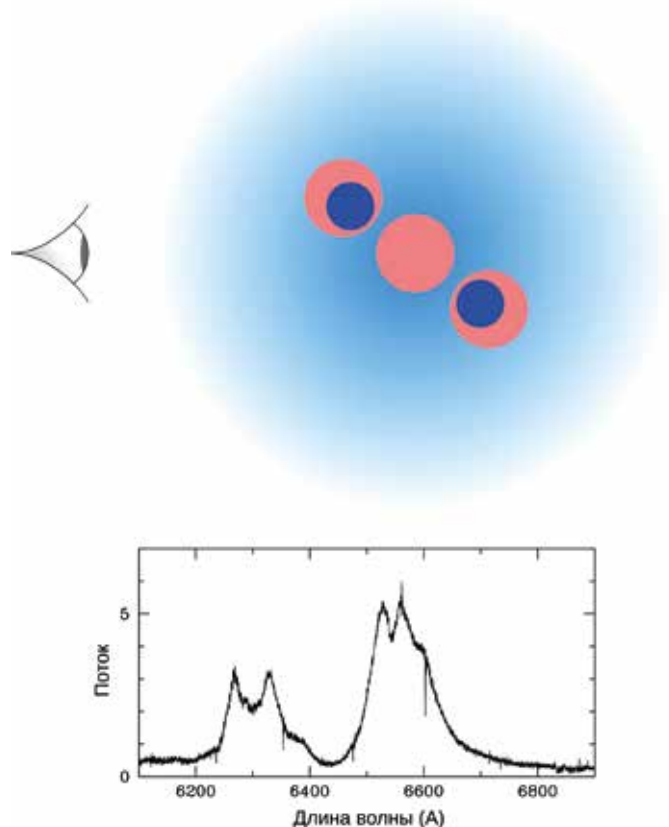
#### Основные публикации / Main publications

- Yu.A. Fadeev, Astron. Lett., 44, 546 (2018)  
 Yu.A. Fadeev, Astron. Lett., 45, 655 (2019)  
 Yu.A. Fadeev, Astron. Lett., 46, 734 (2020)  
 N.R. Evans et al. AJ, 150, id. 13 (2015)  
 K.V. Sokolovsky et al., Astron. Rep., 91, 382 (2014)  
 S.V. Antipin et al., RA&A, 18, id. 092 (2018)  
 M. Hippeke et al., ApJ, 837, id. 85 (2017)

automated classification; in parallel, the same stars were classified non-automatically by well-trained experts. Satisfactory results of automated classification were obtained for 88% of all variable stars in the sample. Data from Moscow and Sonneberg plate collections were used in the international study of long-time variations of the unique star found by T. Boyajian, with participation of INASAN astronomers.

## СВЕРХНОВЫЕ ЗВЕЗДЫ SUPERNOVAE

Схематическая структура оболочки SN 2017gmr и спектр (внизу), содержащий двухкомпонентную линию кислорода 6300 Å и трехкомпонентную линию H $\alpha$  водорода. Излучение водорода чувствительно к распределению радиоактивного никеля-56, что дает возможность выявить три компонента этого изотопа (красный цвет). Два компонента, ответственные за необычный профиль линии кислорода, показаны синим цветом. Биполярная структура погружена в расширяющуюся сферическую водородно-гелиевую оболочку массой в 22 солнечных (голубой цвет). Символ наблюдателя (слева) показывает ориентацию биполярной оси относительно луча зрения. Спектр получен на телескопе Keck I / Schematic structure of SN 2017gmr envelope and the spectrum (at the bottom) that contains two-component line of the oxygen 6300 Å line and three-component H $\alpha$  hydrogen line. The hydrogen emission is sensitive to the distribution of the radioactive nickel-56 that permits one to infer three components of this isotope (red color). Oxygen components responsible for the unusual oxygen line profile are shown by the blue color. The bipolar structure is embedded into the expanding spherical hydrogen-helium envelope of 22 solar mass (light blue). Symbolic observer (left) indicates the orientation of the bipolar axis with respect to the line of sight. The spectrum was taken with the Keck I telescope



Звезды с массами от 9 до 25 солнечных масс в конце своей жизни взрываются как сверхновые, мощное свечение которых может наблюдаться на расстояниях в сотни миллионов световых лет. При взрыве сверхновой вещество звезды разлетается со скоростью до 10 тысяч км/с, оставляя на месте взрыва вращающуюся нейтронную звезду с сильным магнитным полем. Знаменитый пример — пульсар в Крабовидной туманности, остатке сверхновой 1054 года. Более полувека назад были предложены два механизма взрыва массивных звезд, оба основанные на гравитационном коллапсе ядра звезды с образованием нейтронной звезды. В нейтринном механизме взрыв обеспечивается колоссальной энергией нейтринного излучения новорожденной нейтронной звезды. В магниторотационном механизме взрыв обусловлен энергией быстрого вращения нейтронной звезды, которая передается оболочке посредством сильного магнитного поля. Экспертиза наблюдений сверхновой, как правило, не позволяет сказать, какой из двух механизмов сработал. Однако, если энергия взрыва, найденная по данным наблюдений, окажется слишком большой, за пределами возможности нейтринного механизма, то это позволит сделать выбор.

Stars with masses between 9 and 25 solar mass at the end of their life explode as supernovae with their outbursts seen at distances as far as hundreds of light years. After the explosion the supernova material expands with velocities up to 10 thousands km/s leaving behind the rotating neutron star with the strong magnetic field. A notorious example is the pulsar in the Crab nebula, the remnant of the supernova exploded in 1054. More than half a century ago there were proposed two mechanisms for the massive star explosion, both based on the gravitational collapse of stellar core with the formation of a neutron star. In the neutrino mechanism the explosion is driven by the huge energy of the neutrino emission of the newborn neutron star. In the magnetorotational mechanism the explosion is powered by the rotational energy of the neutron star mediated by the strong magnetic field. Generally, the inspection of observational data does not permit to conclude, what mechanism has operated. However, if the explosion energy inferred from the data turns out too high, beyond possibilities of the neutrino mechanism, one could then decide between alternatives. It is the case that is provided by the supernova SN 2017gmr, which at first glance is just a more



Именно такая возможность предоставилась в случае сверхновой SN 2017gmr, которая, на первый взгляд, представляет собой всего лишь более яркий случай обычной сверхновой типа IIP. Сотрудники ИНАСАН выполнили моделирование свечения и скорости расширения этой сверхновой и показали, что энергия ее взрыва на порядок превышает возможности нейтринного механизма. Хотя нейтринный взрыв, скорее всего, является основным для сверхновых типа IIP, в случае сверхновой SN 2017gmr определенно имел место магниторотационный взрыв. Этот вывод подтверждается обнаруженной по спектральным и поляризационным наблюдениям биполярной структурой радиоактивного никеля-56 и кислорода, которая согласуется с ожидаемыми проявлениями магниторотационного взрыва.

luminous case of the ordinary type IIP supernova. The modelling of the luminosity and expansion velocity of this supernova performed in INASAN demonstrates that the explosion energy by an order of magnitude exceeds the possibility of the neutrino mechanism. While the neutrino mechanism seems to occur in most cases of IIP supernovae, magnetorotational mechanism certainly has taken place in SN 2017gmr. This conclusion is supported by the bipolar structure of the radioactive nickel-56 and oxygen that is consistent with the expected manifestation of the magnetorotational explosion. The bipolar structure was discovered based on the analysis of light spectra and polarization.

#### Основные публикации / Main publications

N. Chugai, MNRAS, 494, L86 (2020)  
V. Utrobin, N. Chugai et al., MNRAS, 505, 116 (2021)  
N. Chugai, MNRAS, 504, 2014 (2021)

## ВЗРЫВНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ CATACLYSMIC VARIABLE STARS

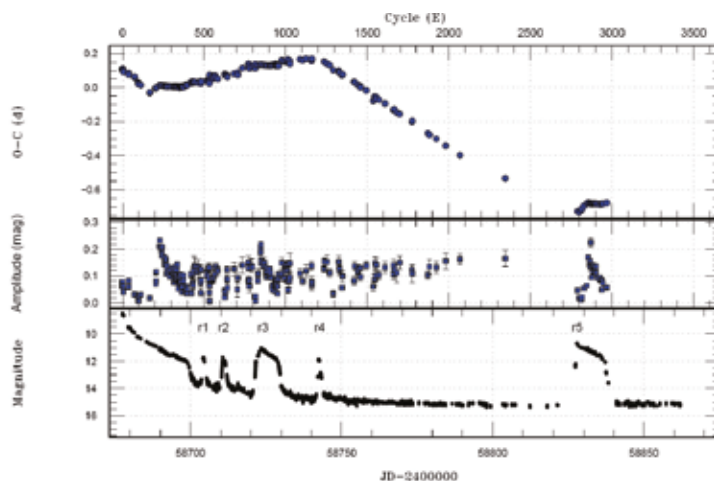
Наблюдательные проявления аккреционных процессов в тесных двойных системах крайне разнообразны. Особенно эффектны взрывные переменные звезды, блеск которых раз в несколько недель, а иногда и лет, увеличивается в несколько десятков раз и показывает характерные модуляции. Взрывные переменные подразделяют на типы, опираясь на частоту и форму вспышек, а также на силу магнитного поля белого карлика. Фотометрические исследования тесных двойных систем с аккреционными дисками ведет А.М. Зубарева. Она анализирует кривые блеска и периодичности. Эволюция периодов колебаний блеска во время так называемых сверхвспышек у звезд типа SU Большой Медведицы является прямым отражением изменений, происходящих в структуре аккреционных дисков в тесных двойных системах.

Observational manifestations of accretion processes in close binaries are extremely diverse. Particularly spectacular are cataclysmic variable stars, whose brightness increases by several tens of times every few weeks, and sometimes years, and shows characteristic modulations. Cataclysmic variables are classified into types based on the frequency and shape of the outbursts, as well as the strength of the white dwarf magnetic field. Photometric studies of close binaries with accretion disks are being carried out by A.M. Zubareva. She analyzes their light curves and periods. The evolution of the periods of brightness variations during the so-called superoutbursts in SU Ursa Majoris stars is a direct reflection of changes in the structure of accretion disks in close binaries.

#### Основные публикации / Main publications

Y. Tampo et al., Publ. Astron. Soc. Japan, 72, 49 (2020)  
S. Antipin, A. Zubareva et al., Astron. Let., 46, 677 (2020)

*Кривая блеска и график O–C взрывной переменной V3101 Cyg (TCP J21040470+4631129). Верхняя панель: график O–C. В качестве расчетного периода использовано значение 0.0542 суток. Средняя панель: изменение амплитуды сверхгорбов (в звездных величинах). Нижняя панель: кривая блеска звезды во время основной сверхвспышки и повторных поярчаний. "r1", "r2", "r3", "r4" и "r5" соответствуют номеру повторного поярчания / Light curve and O–C diagram of V3101 Cyg (TCP J21040470+4631129). Top panel: the O–C diagram. The period used was 0.0542 d. Middle panel: the evolution of superhump amplitudes in the magnitude scale. Bottom panel: the light curve of the star during the main superoutburst and rebrightenings. "r1", "r2", "r3", "r4" and "r5" mean rebrightenings, from first to fifth*



## ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ BINARY STARS



У большинства звезд, доступных детальному исследованию, обнаруживаются спутники, что позволяет говорить о том, что значительная часть (по некоторым оценкам более 80%) всех звезд является двойными. Многие двойные системы обладают еще одним уникальным свойством — их компоненты в ходе эволюции обмениваются веществом. Сочетание высокой распространенности с широким спектром наблюдаемых проявлений делает взаимодействующие двойные звезды (ВДЗ) важнейшим объектом исследований современной астрофизики. К сожалению, детальные изображения большинства наблюдаемых ВДЗ не могут быть получены при помощи современных инструментов. Но информацию об их строении и физических параметрах можно получить при помощи новейших методов, например, газодинамического моделирования. В ИНАСАН работы по исследованию двойных звезд ведутся в течение более 25 лет. За это время нами было опубликовано более 200 работ на эту тему, созданы численные модели двойных звезд различных типов, получен целый ряд важных научных результатов. При помощи детальных астрофизических моделей были исследованы различные типы ВДЗ — полуразделенные, Be-звезды, симбиотические, поляры, промежуточные поляры, молодые двойные звезды и т.п. Разработаны теории, впервые объяснившие целый ряд наблюдаемых явлений, открыты неизвестные ранее элементы структуры течения в аккреционных дисках и оболочках двойных звезд.

Сотрудники, участвующие в работе по теме: Д.В. Бисикало, А.Г. Жилкин, П.Б. Исакова, П.В. Кайгородов, Е.А. Карицкая, Д.А. Ковалева, Д.А. Кононов, Е.П. Курбатов, О.Ю. Малков, А.В. Соболев, А.Ю. Сытов, А.М. Фатеева, Д.А. Чулков.

Работа проводится в сотрудничестве с Государственным астрономическим институтом им. П.К. Штернберга МГУ, НИРФИ, а также научными организациями Болгарии и ЮАР.

Vast majority of stars available for detailed investigations reveal presence of satellites. It allows stating that a significant number of stars (80% according to some estimates) are binaries. Many binaries have one more unique property, they exchange matter in course of their evolution. Their great number in combination with a wide range of observational manifestations makes close binary stars (CBS) one of the most important objects of investigation in modern astronomy. Unfortunately, detailed images for most observed IBS cannot be obtained even with advanced modern instruments. Nonetheless we can obtain information on their structure and physical parameters using very modern methods including gas dynamical simulations. At the Institute of Astronomy studies of binary stars are performed for 25 years. During this time, we published over 200 papers on this topic, having obtained a number of important scientific results. Detailed astrophysical models have allowed investigating various types of CBS: semidetached binaries, Be-stars, symbiotic stars, intermediate polars and polars, young binary stars etc. Theories explaining many observational manifestations for the first time have been developed; certain flow structures in accretion disks and circumbinary envelopes not known before have been discovered

Researchers involved in the studies: D.V. Bisikalo, A.G. Zhilkin, P.B. Isakova, P.V. Kaygorodov, E.A. Karitskaya, E.P. Kurbatov, D.A. Kovaleva, D.A. Kononov, O.Yu. Malkov, A.V. Sobolev, A.Yu. Sytov, A.M. Fateeva, D.A. Chulkov.

The work is done in collaboration with Sternberg Astronomical Institute MSU, Radiophysical Research Institute and scientific organizations of South Africa and Bulgaria.



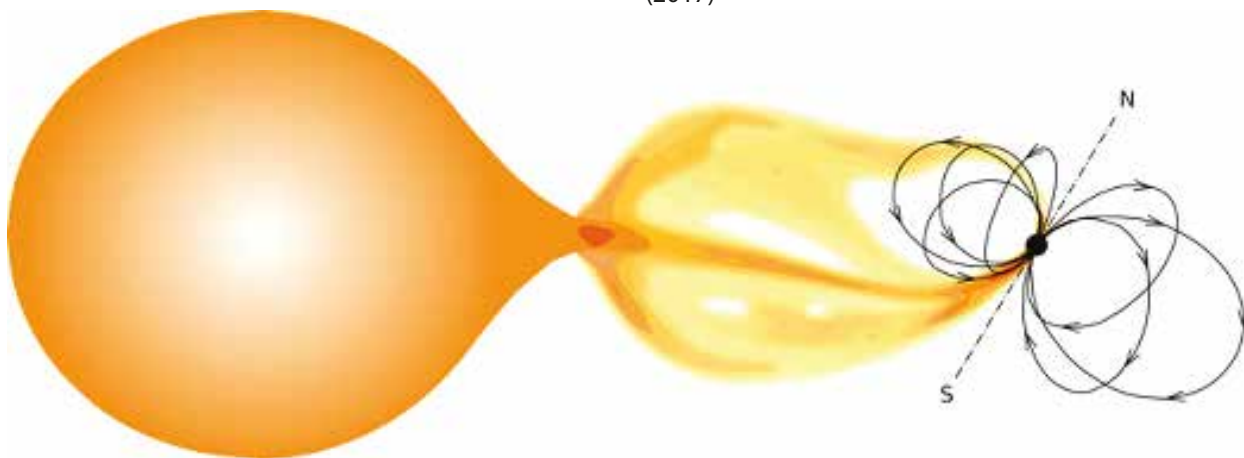
## МОДЕЛЬ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ С УЧЕТОМ ВОЛНОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ THE MODEL OF MODIFIED MHD INCLUDING WAVE TURBULENCE

Основную трудность при численном моделировании течения в плазме представляет учет быстрых процессов, связанных с переносом энергии альфвеновскими волнами. В 2017 г. нами впервые была получена замкнутая система уравнений модифицированной магнитной гидродинамики, которая позволяет описывать течение плазмы в присутствии развитой волновой альфвеновской турбулентности. Подход, использованный при выводе уравнений, корректно учитывает эффекты турбулентных магнитных напряжений, магнитной вязкости и диссипативного нагрева, вызванных волновой турбулентностью. Модель можно применять для исследования структуры течения астрофизической плазмы в сильных магнитных полях, которые встречаются в системах полярных и промежуточных полярных.

The main difficulty in the numerical simulation of a plasma flow is the persistence of fast energy transfer processes associated with Alfvén waves. In 2017, for the first time, we obtained a closed system of equations for modified MHD, which allows us to describe the plasma flow in the presence of Alfvén wave turbulence. The approach used to derive the equations correctly takes into account the effects of turbulent magnetic stresses, magnetic viscosity, and dissipative heating caused by wave turbulence. The model can be used to study the structure of astrophysical plasma flow in strong magnetic fields, existing in polars and intermediate polars.

### Основные публикации / Main publications

E.P. Kurbatov, A.G. Zhilkin, D.V. Bisikalo, Phys. Usp., 60, 798 (2017)



Течение в поляр, полученное с использованием новой модели / The MHD flow in a polar, obtained using the new model

## СРАВНЕНИЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ В АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ МГД И ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ COMPARISON OF DIMENSIONLESS PARAMETERS IN ASTROPHYSICAL APPLICATIONS OF MHD AND LABORATORY EXPERIMENTS

Лабораторное моделирование астрофизических течений плазмы позволяет исследовать явления, для которых отсутствуют теоретические модели, либо их механизмы изучены недостаточно хорошо — плазменные неустойчивости, аномально высокую магнитную диффузию, МГД турбулентность. В 2018 г. нами впервые было обоснована принципиальная возможность исследования физических явлений, происходящих в оболочках полярных, промежуточных полярных, а также экзопланет типа горячих юпитеров, при помощи лабораторных экспериментов по лазерной абляции в магнитном поле.

Laboratory modeling of astrophysical plasma flows makes it possible to study phenomena for which there are no theoretical models, or their mechanisms are not well understood — MHD instabilities, anomalously high magnetic diffusion, MHD turbulence. In 2018, for the first time, we substantiated the fundamental possibility of studying physical phenomena occurring in the envelopes of polars, intermediate polars, as well as exoplanets such as hot Jupiters, using laboratory experiments on laser ablation in a magnetic field.

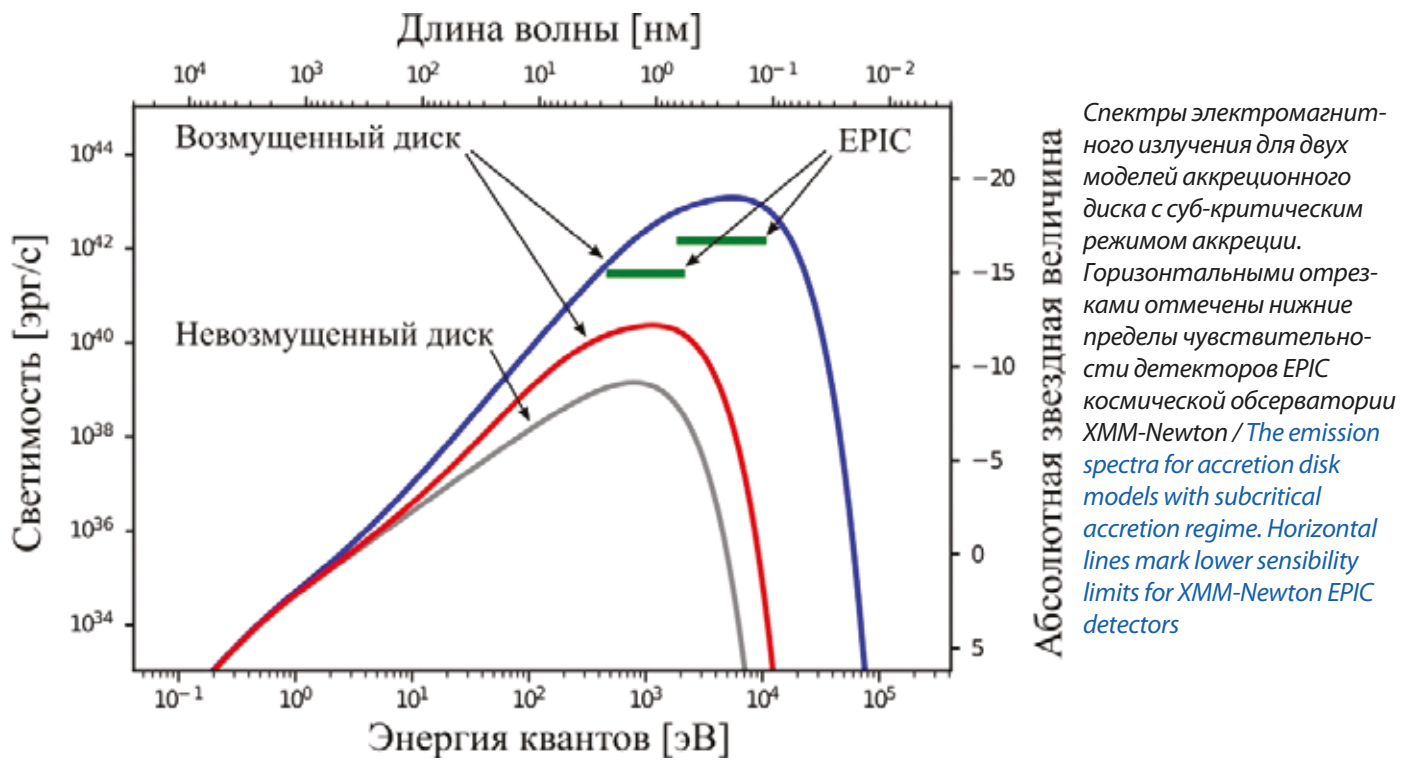
### Основные публикации / Main publications

E.P. Kurbatov, D.V. Bisikalo et al., Astron. Rep., 62, 483 (2018)

## ВОЗМОЖНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ СЛИВАЮЩИХСЯ ЧЕРНЫХ ДЫР POSSIBLE ELECTROMAGNETIC MANIFESTATIONS OF MERGING BLACK HOLES

К настоящему времени на детекторах LIGO и Virgo зарегистрировано несколько гравитационно-волновых всплесков, обусловленных слиянием двойных черных дыр. Принято считать, что черные дыры окружены аккреционными дисками, поэтому такие события должны сопровождаться возмущением дисков и, возможно, увеличением электромагнитного излучения от этих объектов. Как показали численные исследования, проведенные нами в 2019 г., рост светимости

To date, the LIGO and Virgo detectors have recorded several gravitational-wave bursts caused by the merger of binary black holes. It is generally accepted that black holes are surrounded by accretion disks, so such events should be accompanied by disk disturbances and, possibly, an increase in electromagnetic radiation from these objects. As shown by our numerical studies in 2019, an increase in such systems luminosities is provided by the shock heating of matter by a wave arising in



таких систем обеспечивается нагревом вещества ударной волной, возникающей в аккреционном диске вследствие потери массы центрального объекта в результате излучения гравитационных волн. Причем поярчение системы настолько велико, что может быть зарегистрировано современными рентгеновскими обсерваториями. Это открывает путь для действительно многоволнового исследования процессов слияния черных дыр или многоканальной астрономии (multi-messenger astronomy).

the accretion disk due to the loss of central object's mass as a result of the gravitational waves emission. Moreover, the brightening of the system is high enough to be detected by modern X-ray observatories. This opens the way for a truly multi-wavelength study of black hole fusion or multi-messenger astronomy.

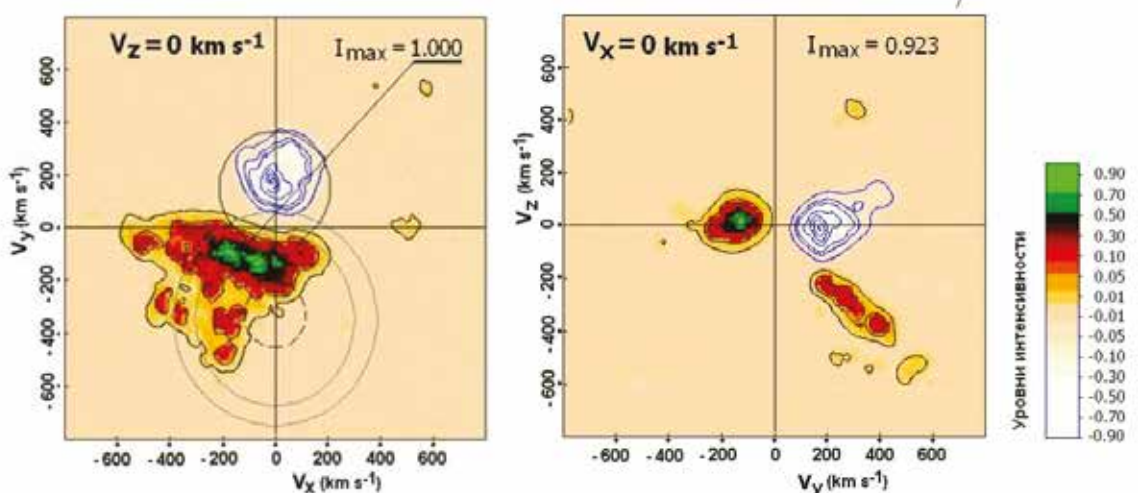
#### Основные публикации / Main publications

D.V. Bisikalo, A.G. Zhilkin, E.P. Kurbatov, Astron Rep., 63, 1 (2019)

D.V. Bisikalo, A.G. Zhilkin, E.P. Kurbatov, Phys. Usp., 62, 1136 (2019)

### ДОПЛЕРОВСКАЯ 3D-ТОМОГРАФИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДВОЙНОЙ CYG X-1 3D DOPPLER TOMOGRAPHY OF X-RAY BINARY CYG X-1

Центральные сечения 3D томограммы: слева — в орбитальной плоскости, справа — в плоскости, включающей ось вращения системы / The central cross-sections of 3D tomogram: in the orbital plane (left) and in the plane, contains the system rotation axis (right)



В 2018 году нами впервые была проведена доплеровская 3D-томография рентгеновской двойной CygX-1, содержащей в качестве релятивистского компонента черную дыру. Впервые получена информация о движении газовых потоков, включающая все три компонента скорости, что дало более полное представление о движении вещества, строении системы и процессе аккреции. В том числе обнаружены: газовый поток из внутренней точки Лагранжа  $L_1$ , область

In 2018, we performed the first 3D Doppler tomography of an X-ray binary CygX-1 containing a black hole as a relativistic component. For the first time, information about gas flows was obtained, including all three components of velocity, which gave a more complete picture of the matter flow, the structure of the system and the process of accretion. We have discovered: a gas flow from the inner Lagrange point  $L_1$ , the region of interaction of the  $L_1$  flow with the accretion disk, and



взаимодействия потока вещества с аккреционной структурой и поток вещества, по-видимому, из магнитного полюса оптической звезды (O-сверхгиганта) с предсказанным нами ранее горячим пятном

the flow forming apparently from the magnetic pole of the optical star (O-supergiant) with a hot spot we predicted earlier.

#### Основные публикации / Main publications

M.I. Agafonov, E.A. Karitskaya et al., Astron. Rep., 62, 89 (2018)

M.I. Agafonov, E.A. Karitskaya et al., Astron. Rep., 62, 225 (2018)

## ПОЛУРАЗДЕЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ: ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТОВ И РЕДКИЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ КЛАССЫ SEMI-DETACHED ECLIPSING BINARIES: PARAMETERS OF COMPONENTS AND RARE OBSERVATIONAL CLASSES

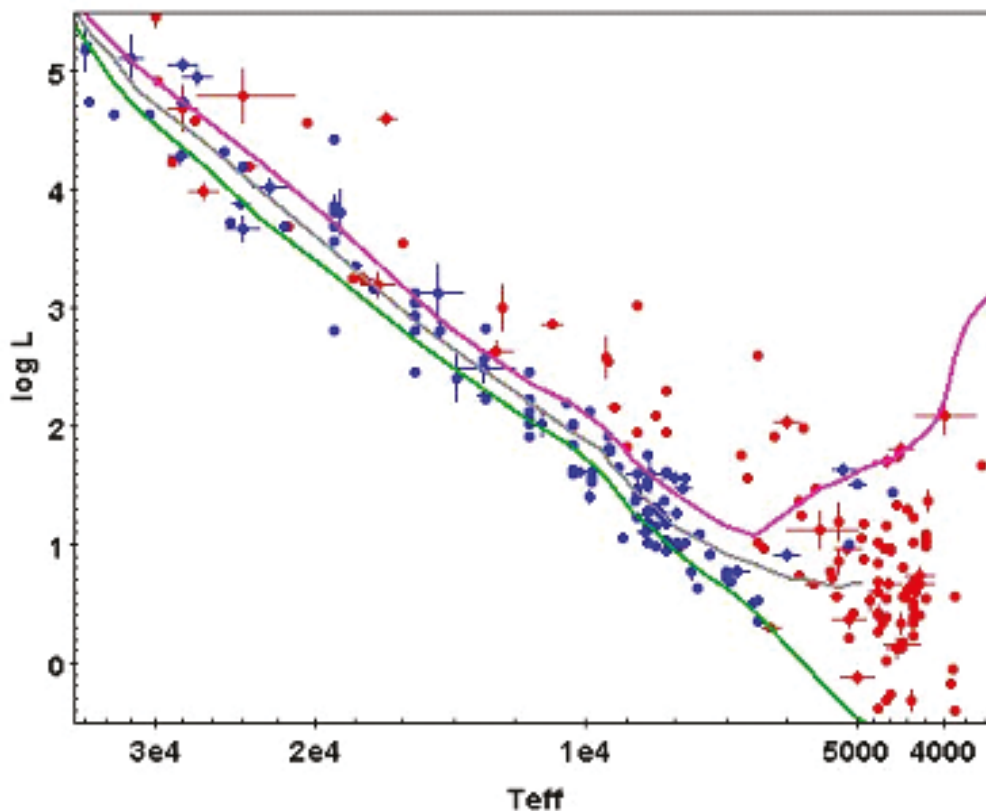
Полуразделенные затменные системы предоставляют нам уникальную возможность определить основные параметры и свойства взаимодействующих двойных систем. Цель проведенной нами работы — собрать и использовать данные о полуразделенных системах, для которых известны и решены кривые блеска и кривые лучевых скоростей. Составлен наиболее полный список из 119 затменных двойных систем с линиями обоих компонентов в спектре (SD DLEB), содержащий параметры орбиты и физические параметры компонентов. Рассмотрена классификация полуразделенных двойных и объяснены пробелы между различными классами на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Особое внимание уделено системам с инвертированными параметрами компонентов. Кроме того, список полуразделенных двойных кросс-отождествлен с астрометрическими данными Gaia. Специальному анализу подверглись системы с противоречивыми данными о параллаксах. Показано, что эффективные температуры Gaia следует использовать с осторожностью, поскольку они плохо описывают горячие полуразделенные системы. Получена также эмпирическая зависимость между температурой аккректора и донора.

Semi-detached eclipsing systems provide a unique opportunity to derive the basic properties of interacting binaries. The goal of this work is to collect and make use of data on semi-detached systems with available light and radial velocity curve solutions. We have compiled the most comprehensive list of 119 semi-detached double-lined eclipsing binaries (SD DLEB), containing orbital parameters and physical parameters of components. We consider the classification of semi-detached binaries and explain gaps between various classes in the HR diagram. We list systems with component parameters that are inverted and briefly discuss their evolutionary state. Besides we have cross-matched the list with Gaia astrometric data, and analyze the result. A special analysis is conducted for systems with controversial data on parallaxes. It is shown that Gaia effective temperatures should be used with caution, as they do not describe hot SD systems well. We have also compiled an empirical relation between the temperature of the accretor and the donor.

#### Основные публикации / Main publications

O.Yu. Malkov, MNRAS, 491, 5489 (2020)

O.Yu. Malkov, A&A Trans., 32, 111 (2021)



SD DLEB на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Синие и красные точки обозначают аккректоры и доноры, соответственно. Кривые, сверху вниз: гиганты, субгиганты и звезды главной последовательности, соответственно. Обратите внимание на отсутствие доноров в областях  $T_{\text{eff}} \sim 14000 \text{ K}$  и  $T_{\text{eff}} \sim 7500 \text{ K}$  / SD DLEB in the HR diagram. Blue and red dots represent accretors and donors, respectively. Curves represent, from top to bottom, giant, subgiant and main sequence stars, respectively. Note the absence of donors in the  $T_{\text{eff}} \sim 14000 \text{ K}$  and  $T_{\text{eff}} \sim 7500 \text{ K}$  areas

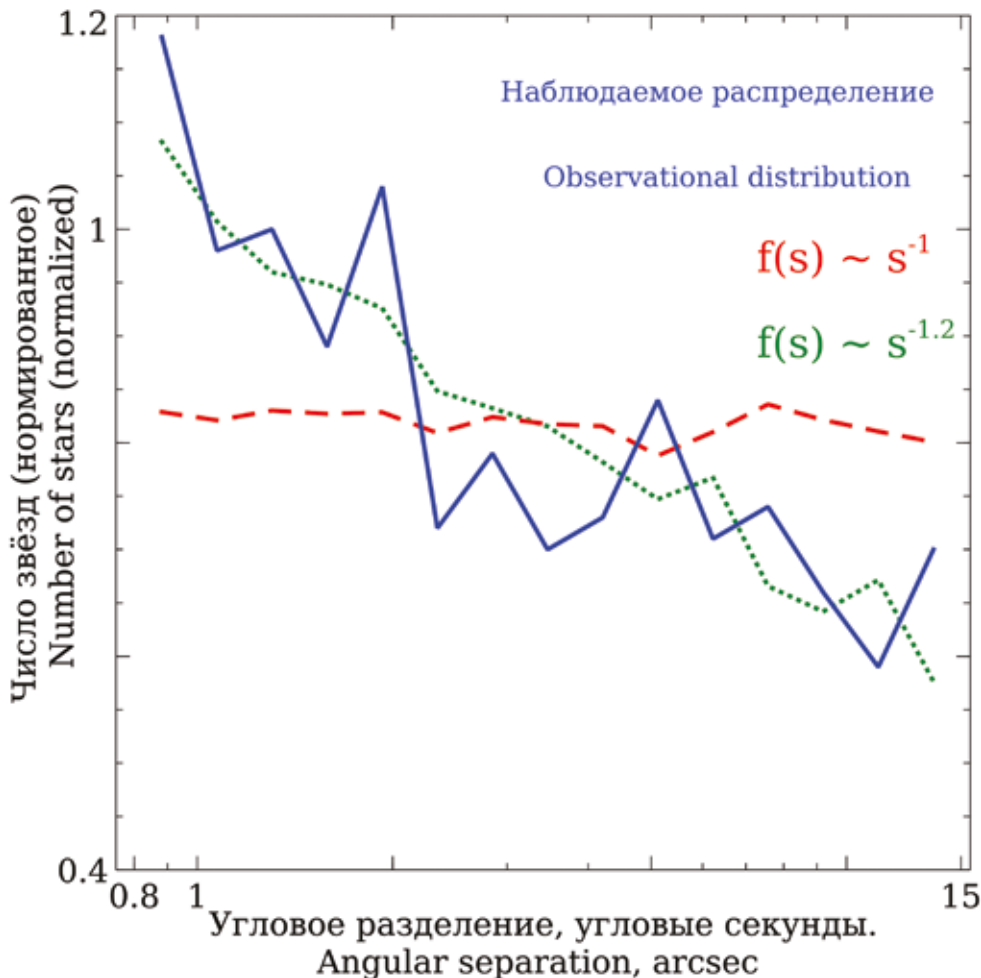
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД ПО МАССАМ И РАЗДЕЛЕНИЮ КОМПОНЕНТОВ ESTIMATION OF DISTRIBUTION LAW OVER MASSES AND ORBIT SIZE FOR BINARY STARS

Масса звезды является основным параметром, определяющим ее эволюцию и наблюдаемые характеристики. Статистика появления звезд разных масс, или начальная функция масс (НФМ), отражает результат процесса звездообразования и играет фундаментально важную роль, будучи необходимым параметром в самых разных областях астрономии. Общее представление о форме НФМ одиночных звезд существует с середины XX века, но проблема определения НФМ для двойных и кратных звезд остается открытой. После тщательного изучения эффектов селекции нами проведено моделирование наблюдаемого ансамбля визуальных двойных звезд, и получены новые ограничения для НФМ двойных. Показано, что массы компонентов широких (с характерным размером орбиты от ста до двух тысяч астрономических единиц) двойных существенно коррелируют. В частности, подтвержден избыток двойных с идентичными компонентами, так называемыми звездами-близнецами. Общая масса двойной звезды и масса главного компонента подчиняются степенному закону с показателем степени  $-2.8 \pm 0.2$ . Распределение двойных звезд по характерному размеру орбиты убывает по степенному закону, свидетельствующему о преимущественном разрушении широких двойных в ходе их формирования и на раннем этапе эволюции.

Stellar mass is the main parameter which determines future evolution and observational characteristics of a star. The statistics of newborn stars of different masses or Initial Mass Function (IMF) reflects the outcome of star formation process and plays an important role being an essential parameter for the wide field of astronomy calculations. The IMF of single stars is generally known since the middle of XX century, but the IMF for binary and multiple stars remains much less explored. After careful review of the observational selection function the population of visual binary stars is modelled to constrain the IMF of binaries. It is shown that component's masses of wide (orbit size between one hundred and two thousand Astronomical Units) binaries are significantly correlated. In particular, the relative excess of binaries with nearly identical components (so-called twin stars) is confirmed. The total system's and primary component's mass follows power law with an exponent  $-2.8 \pm 0.2$ . Another important parameter of a binary star is the orbit's size. Its distribution follows the power law which gives evidence for preferential destruction of wide binary stars during their formation and at the initial stages of evolution.

### Основные публикации / Main publications

D. Chulkov, MNRAS, 501, 769 (2021)



Наблюдаемое и смоделированное распределение изучаемого ансамбля визуальных двойных по угловому расстоянию в зависимости от закона распределения по характерному размеру орбиты / *Observational and modelled distribution of the studied visual binary stars over the angular separation depending on the orbit's size distribution law*



## ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЗВЕЗД И ПЛАНЕТ ORIGINS OF STARS AND PLANETS



© V.E. Shmagin

Звезды рождаются в плотных холодных газо-пылевых сгустках молекулярных облаков. Эти сгустки сжимаются (коллапсируют) под действием собственной гравитации, разогреваясь до температуры в миллионы градусов, достаточной для «загорания» термоядерных реакций. Вокруг некоторых рождающихся звезд формируются газо-пылевые диски, со временем превращающиеся в планетные системы. Рождением звезд и планетных систем история молекулярного облака не заканчивается. Излучение молодых массивных звезд ионизирует вещество облака, нагревая его до температуры 10000К и сгребая в протяженные оболочки. Некоторые из этих оболочек оказываются настолько плотными, что в них начинается следующий этап звездообразования. В ИНАСАН процессы в областях звездообразования исследуются на масштабах от эволюции отдельных молекул и пылинок до целых областей и комплексов звездообразования.

Сотрудники, участвующие в работе по теме: В.В. Акимкин, Д.В. Бисикало, Е.В. Борщева, А.И. Буслаева, Д.З. Вибе, М.С. Кирсанова, О.В. Кочина, Е.П. Курбатов, Л.А. Максимова, Т.С. Молярова, М.С. Мурга, Я.Н. Павлюченков, К.В. Плакитина, О.Л. Рябухина, Е.Э. Сивкова, А.П. Топчиева, Б.М. Шустов.

Работа проводится в сотрудничестве с Астрокосмическим центром ФИАН, Астрономическим институтом СПбГУ, Государственным астрономическим институтом им. П.К. Штернберга МГУ, Институтом геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Институтом прикладной физики РАН, Специальной астрофизической обсерваторией РАН, Уральским федеральным университетом, Химическим факультетом МГУ им. М.В. Ломоносова, Южным федеральным университетом, а также научными организациями Австрии и Германии.

Stars are born in dense cold clumps of molecular clouds. These clumps contract (collapse) due to self-gravitation, heating themselves up to a temperature of millions of degrees, sufficient to “ignite” thermonuclear reactions. Around some of the nascent stars disks of dust and gas are formed. These discs eventually transform into planetary systems. The story of the molecular cloud does not end with the birth of stars and planetary systems. Radiation from young massive stars ionizes surrounding neutral material, heating it to a temperature of 10000K and shovelling it into extended envelopes. Some of these envelopes are so dense that the next stage of star formation begins in them, sequentially. At the Institute of astronomy of the Russian Academy of Sciences, the processes in star-forming regions are studied on the scales from the evolution of individual molecules and dust grains to the entire regions and star-forming complexes.

Researchers involved in the studies: V.V. Akimkin, D.V. Bisikalo, E.V. Borshcheva, A.I. Buslaeva, D.S. Wiebe, M.S. Kirsanova, O.V. Kochina, E.P. Kurbatov, L.A. Maksimova, T.S. Molyarova, M.S. Murga, Ya.N. Pavlyuchenkov, K.V. Plakitina, O.L. Ryabukhina, E.E. Sivkova, A.P. Topchieva, B.M. Shustov.

The studies are being carried on in collaboration with Astro Space Center of Lebedev Physical Institute, Astronomical Institute SPb State University, Sternberg Astronomical Institute MSU, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Insitute of Applied Physics RAS, Special Astrophysical Observatory, Ural Federal University, Department of Chemistry MSU, Southern Federal University as well as with scientific institutions of Austria and Germany.

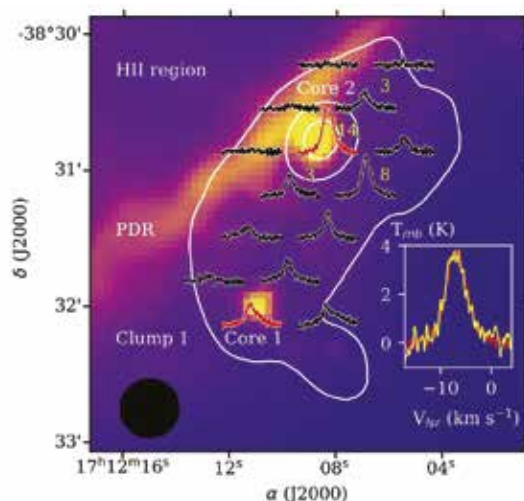
## ОБЛАСТИ ИОНИЗОВАННОГО ВОДОРОДА И ФОТОДИССОЦИАЦИОННЫЕ ОБЛАСТИ REGIONS OF IONIZED HYDROGEN AND PHOTO-DISSOCIATION REGIONS

Области ионизованного водорода (HII) вокруг молодых массивных звезд в инфракрасном (ИК) диапазоне проявляют себя как инфракрасные кольцевые туманности (ИККТ), повсеместно наблюдаемые в диске Галактики. Анализ морфологии ИККТ, погруженных в родительские молекулярные облака, позволил отобрать объекты с наиболее регулярной структурой, представляющих собой естественные лаборатории для изучения эволюции и динамики космической пыли. Анализ излучения пылинок в ИККТ позволил продемонстрировать, что эти объекты являются не кольцами, а трехмерными структурами. В этих туманностях наблюдается значительно меньше органических пылинок, чем в среднем по Галактике. Наиболее вероятной причиной сокращения органических пылинок является их разрушение ультрафиолетовым (УФ) излучением молодых звезд. Анализ потоков в радиодиапазоне позволил оценить спектральные классы звезд, ионизирующих области HII, ассоциированные с ИККТ: от B1 до O3, что соответствует интервалу эффективных температур звезд от 25000 до 45000 К. Установлено, что потоки излучения в ИК-диапазоне увеличиваются с ростом массы нагретой оболочки вокруг области HII, а потоки в радиодиапазоне возрастают с увеличением температуры звезды. Для фиксированных значений эффективной температуры звезд выделены эволюционные цепочки областей HII: от компактных до протяженных.

Взаимодействие области HII с молекулярным газом приводит к появлению фотодиссоциационных областей (ФДО) — пограничных регионов, в которых УФ излучение не может ионизировать водород, но способно диссоциировать молекулу  $H_2$  и другие молекулы. Современные интерферометрические наблюдения позволяют исследовать структуру ФДО с беспрецедентным угловым разрешением, выделяя в ней тонкие детали, не объяснимые с позиций традиционных моделей. При помощи разработанной в ИНАСАН химико-динамической модели MARION нами исследовано распределение молекул CO и  $HCO^+$  в ФДО Барьер Ориона (Orion Bar) на границе области ионизованного водорода в Туманности Ориона. Показано, что взаимное расположение фронтов диссоциации различных молекул, определенное по наблюдениям на интерферометре ALMA, можно объяснить только в рамках динамической модели, в которой учитывается продвижение фронтов вглубь молекулярного облака Orion A. Из-за отсутствия наблюдений с высоким угловым разрешением долгое время считалось, что химическая и физическая структура ФДО хорошо описывается равновесными

Regions of ionized hydrogen (HII) around young massive stars in the infrared (IR) range manifest themselves as infrared ring nebulae (IRRN), ubiquitous in the disk of the Galaxy. Analysis of the morphology of IRRNs embedded in parent molecular clouds allowed selection of objects with the most regular structure, the natural laboratories for studying the evolution and dynamics of cosmic dust. Analysis of the dust grains emission in IRRN proved that these objects are not rings, but three-dimensional structures. It was found that IRRNs contain significantly less organic dust grains than the average for the Galaxy. The most probable explanation for the reduction of organic dust particles is their destruction by ultraviolet (UV) radiation from young stars. The analysis of radio fluxes was implemented to estimate the spectral types of stars associated with IRRN and being the source of ionization for the HII regions. Their type varies from B1 to O3, which corresponds to the range of effective temperatures from 25000 to 45000 K. As it was discovered, the IR fluxes increase with the mass of the heated envelope around the HII region increasing, and the radio fluxes increase with the increasing of the temperature of the star. Evolutionary chains of HII regions, from compact to extended, are distinguished for fixed values of the effective temperature.

The interaction of the HII region with molecular gas leads to the formation of photodissociation regions (PDR) — boundary regions where UV radiation cannot yet ionize hydrogen, but is capable of dissociating  $H_2$  and other molecules. Modern interferometric observations make it possible to study the structure of the PDR with an unprecedented angular resolution, highlighting in it fine details unexplainable by equilibrium models. Using the non-stationary model MARION, developed at INASAN, we investigated spatial distribution of CO and  $HCO^+$  molecules in the Orion Bar PDR at the boundary of the HII region in the Orion Nebula. It is shown that the determined from observations on the ALMA interferometer mutual arrangement of the dissociation fronts of various molecules, can be explained only by non-stationary thermo-chemical model, taking into account the dynamic processes and propagation of the fronts deep into the Orion A molecular cloud. Because of the absence of the observations with high angular resolution, for quite a while it was believed that the chemical and physical structure of PDRs is well described by equilibrium models, but now the example of the most studied PDR shows that this is not the case. The obtained result is consistent with the ongoing paradigm shift — the



Линии метанола (черные и красные) и молекулы CS (желтые) в плотной оболочке области ионизованного водорода RCW 120 являются признаком начального этапа формирования массивных звезд / Lines of methanol (black and red) and CS molecule (yellow) in the dense envelope of RCW 120 ionized hydrogen region are signatures of the initial phase of massive star formation



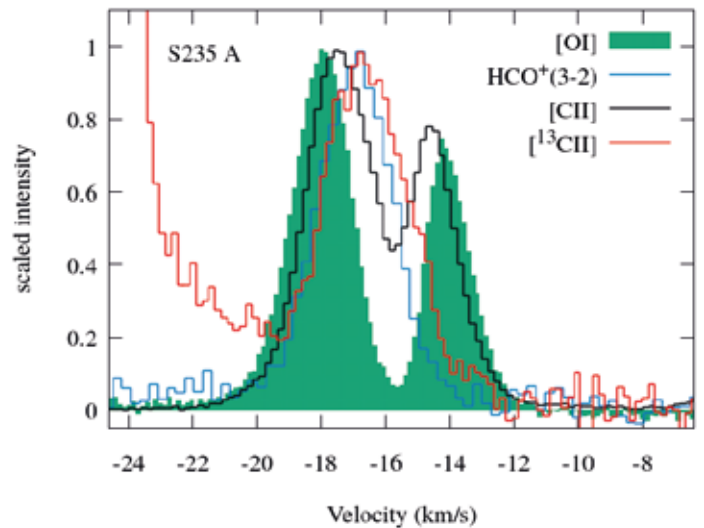


Области ионизованного водорода Sh2-255 и Sh2-257. Изображение получено в CAO РАН в рамках сотрудничества с ИНАСАН / HII regions Sh2-255 and Sh2-257. Image obtained at SAO RAS as part of collaboration with INASAN

моделями, но теперь пример наиболее изученной ФДО показывает, что это не так. Полученный результат согласуется с происходящей сейчас сменой парадигмы — переходом от «медленных» квазистационарных моделей звездообразования к «быстрым» динамическим.

На собственном наблюдательном материале в спектральном диапазоне от ближнего ИК до радио впервые исследовано строение ФДО на границе областей HII S235A и S235C вокруг молодых массивных звезд класса В. Выявлены основные структурные элементы ФДО: ближайший к области HII слой атомарного водорода и ионизованного углерода, движущийся относительно молекулярного газа со скоростью около 1 км/с, и плотный неподвижный газ родительского облака, выявленный по линиям излучения HCO<sup>+</sup>. Показано, что молекулярный газ в окрестностях молодых массивных звезд имеет клочковатую структуру, из-за чего околос звездное вещество пронизано УФ излучением, проникающим через газо-пылевую среду. Продемонстрировано, что линии изотопологов, например, [13CII] на 158 мкм, являются индикаторами кинематики газа в ФДО, так как их профили формируются вблизи звезды в движущемся газе.

Один из интересных астрохимических результатов последних лет состоит в том, что сложные органические молекулы наблюдаются не только в плотных молекулярных сгустках, защищенных от УФ излучения, но и в более жестких условиях интенсивного УФ излучения массивных звезд. Нами показано, что молекулы в таких условиях не только выживают, но также хранят историю звездообразования в родительских облаках. Мы провели анализ линий излучения малоатомного углеводорода этинила (C<sub>2</sub>H) и метанола (CH<sub>3</sub>OH) — молекулы-предшественника сложной органики в ФДО с умеренным УФ-полем — в комплексах звездообразования S235 и S255-257. Наибольшая концентрация метанола обнаружена в областях с интенсивностью поля, в 20–30 раз превышающей среднее межзвездное. Концентрация C<sub>2</sub>H в S255-257 неожиданно оказалась на порядок величины выше, чем в S235, хотя эти ФДО облучаются массивными звездами одинакового спектрального класса. Газофазные ион-молекулярные реакции, а также реакции на поверхности пыли способны обеспечить наблюдаемые содержания молекул в S235 без привлечения фотохимии: ФДО наследуют молекулы



Усредненные и масштабированные профили линий в ФДО S235 / Averaged and scaled line profiles in S235 PDR

transition from “slow” quasi-stationary star formation models to “fast” dynamic ones.

On the basis of our own observational data covering the spectral range from near-IR to radio, the structure of the PDR at the boundary of the HII regions S235A and S235C around young massive B-class stars was studied for the first time. The main structural elements of these PDRs were revealed: the layer of atomic hydrogen and ionized carbon near the HII region, moving at a speed of about 1 km/s relative to the molecular gas, and the dense quiescent gas of the parent cloud, revealed by the HCO<sup>+</sup> emission lines. It was proved that molecular gas in the vicinity of young massive stars has a clumpy structure, that is why the circumstellar matter is permeated by UV radiation penetrating through the surrounding gas and dust. We also found that the lines of isotopologues, for example, [13CII] at 158 μm, can be used as indicators of the gas kinematics in the PDR, since their profiles are formed near the star in the moving gas.

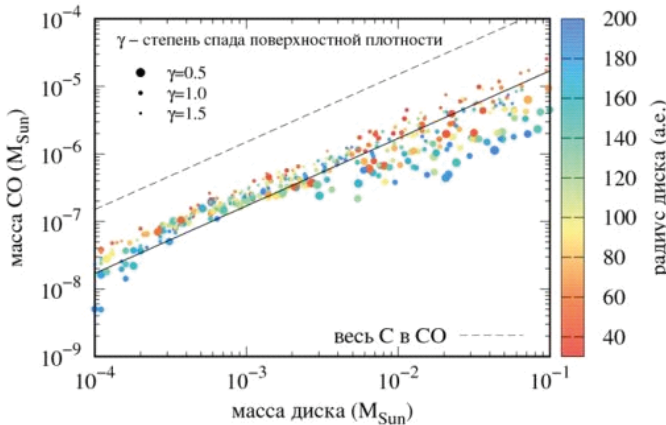
One of the interesting astrochemical results of recent years is that complex organic molecules are observed not only in dense molecular clumps protected from UV radiation, but also in more severe conditions of intense UV radiation from massive stars. We have shown that molecules under such conditions not only survive, but also store the history of star formation of the parent clouds. We analyzed the emission lines of the low-atomic hydrocarbon ethynyl (C<sub>2</sub>H) and methanol (CH<sub>3</sub>OH), a precursor molecule of complex organics in PDR with a moderate UV field, in star formation complexes S235 and S255-257. The highest concentration of methanol was found in regions with a field intensity 20–30 times higher than the average interstellar one. The C<sub>2</sub>H concentration in S255-257 unexpectedly turned out to be an order of magnitude higher than in S235, although these PDRs are irradiated by massive stars of the same spectral type. Gas-phase ion-molecular reactions, as well as reactions on the surface of dust particles, are capable of providing the observed molecular abundances in S235 without involving photochemistry: PDRs inherit molecules from the previous stage of evolution, the dark molecular cloud, the duration of which significantly exceeded one hundred thousand years. Observations of the lines of methanol and the CS molecule in the envelope of another HII region, RCW 120, provided evidence that the next stage of star formation begins there. Young massive stellar objects heat up surrounding material of the dense clumps in parental molecular cloud.

из предыдущей стадии темного молекулярного облака, продолжительность которой должна была существенно превышать сто тыс. лет. Наблюдения линий метанола и молекулы CS в оболочке еще одной области III — RCW 120 — позволили получить свидетельство того, что в ней начинается следующий этап звездообразования: вещество плотных сгустков в оболочке начинает разогреваться под действием излучения рождающихся массивных звезд.

### Основные публикации / Main publications

- A. Topchieva, D. Wiebe, M.S. Kirsanova, RA&A, 18, 91 (2018)
- M.S. Kirsanova, D.S. Wiebe, MNRAS, 486, 2525 (2019)
- M.S. Kirsanova et al., MNRAS, 497, 2561 (2020)
- A.I. Buslaeva, M.S. Kirsanova, A.F. Punanova, Astron. Rep., 65, 488 (2021)
- M.S. Kirsanova et al., MNRAS, 503, 633 (2021)

## ПРОТОПЛАНЕТНЫЕ ДИСКИ PROTOPLANETARY DISKS



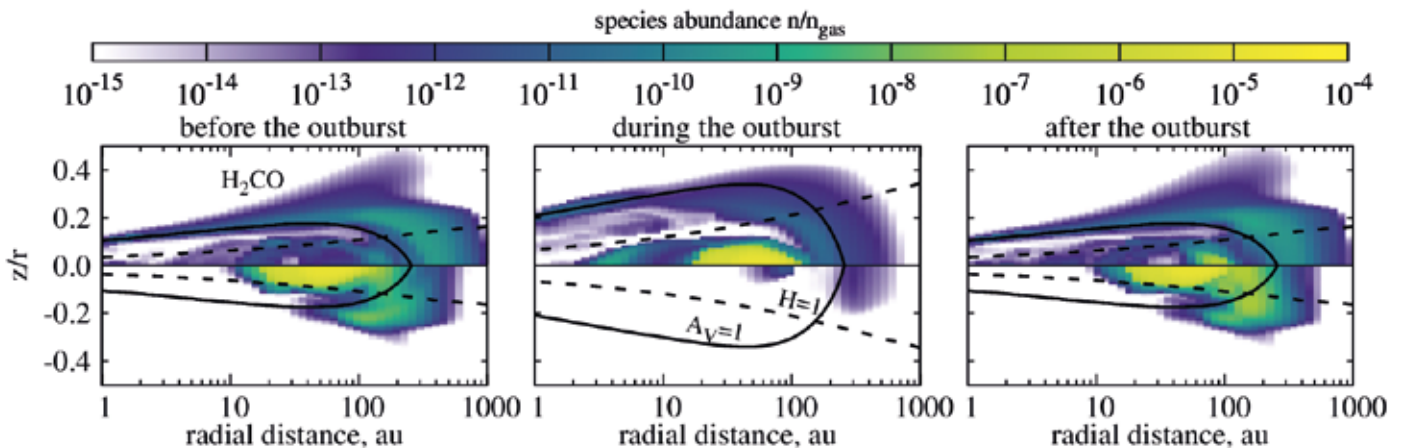
*Полная масса оксида углерода в газовой фазе протопланетных дисков различных масс, радиусов и радиальных профилей поверхностной плотности. Видно, что в широком диапазоне параметров масса CO примерно пропорциональна массе диска / Total mass of carbon monoxide in the gas-phase of protoplanetary disks of various masses, radii, and surface density radial profiles. It is seen that in a wide range of parameters the CO mass is nearly proportional to the disk mass*

Предположение, что планетные системы формируются в газо-пылевых дисках, высказано уже давно, но только теперь у нас появилась реальная возможность наблюдать такие диски вокруг молодых звезд. Эти диски называют протопланетными, но прямых доказательств того, что в них действительно рождаются планеты, пока нет. Чтобы получить такие доказательства, необходимо детально разобраться в процессах, происходящих в протопланетных дисках и в их наблюдаемых проявлениях.

С помощью разрабатываемых в ИНАСАН моделей мы исследовали вопрос об индикаторах массы протопланетных дисков. Масса — важнейший параметр, определяющий свойства формирующейся в диске планетной системы. Нами проанализирована возможность и корректность оценки массы протопланетных дисков на основании наблюдений различных молекул. Выявлены наилучшие молекулярные индикаторы масс. Показано, что наиболее достоверную оценку массы можно получить по наблюдениям линий молекулы CO, однако традиционное предположение об универсальности относительного содержания этой молекулы в газовой фазе различных астрофизических объектов в дисках

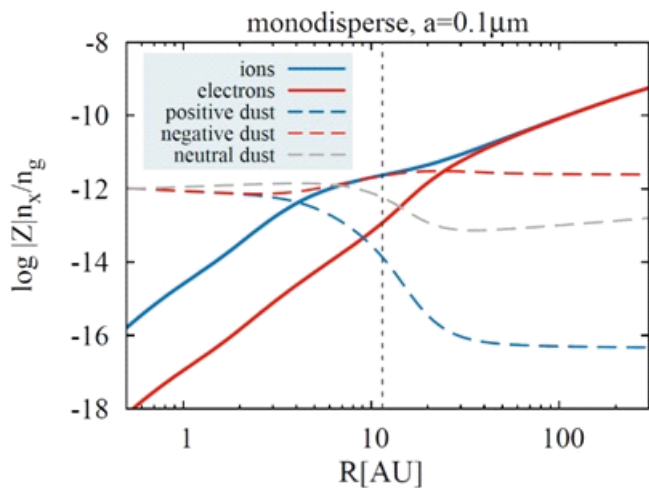
The assumption that planetary systems are formed in disks of gas and dust was made for long time ago, but only now we have a real opportunity to observe such disks around young stars. These disks are called protoplanetary, but there is no direct evidence that planets are actually formed in them. To prove it, we must understand the processes occurring in protoplanetary disks and in their observational manifestations in detail.

With the help of the models developed at INASAN, we investigated various mass indicators of protoplanetary disks. Mass is the most important parameter that determines the properties of the forming planetary system. We have analyzed the possibility and accuracy of the mass estimations in protoplanetary disks based on observations of various molecules. The best mass indicators were identified. The most reliable estimate of the mass can be obtained by observing the lines of the CO molecule. However, the traditional assumption on the versatility of the relative gas-phase CO abundance for various astrophysical objects in disks can be incorrect. Due to chemical processes on the surface of the dust particles, the gas-phase abundance of CO is several times



*Содержание молекулы H<sub>2</sub>CO в диске вокруг звезды V346 Nor до вспышки, во время и после нее / Abundance of H<sub>2</sub>CO molecule in a disk around V346 Nor before, during and after the outburst*





Вклад электронов, ионов, положительно и отрицательно заряженных пылинок в зарядовую структуру запыленного газа в срединной плоскости протопланетного диска на различных расстояниях от звезды / Contributions of electrons, ions, positively and negatively charged grains in the charge structure of dusty gas at a midplane of a protoplanetary disk at various distances from a star

нарушается. За счет химических процессов на поверхности пыли газофазное содержание CO оказывается в несколько раз ниже ожидаемого. В результате массы дисков, определенные по CO, могут быть существенно занижены. Пренебрежение этим эффектом может привести к некорректной интерпретации наблюдательных данных.

Еще один ключевой аспект эволюции протопланетных дисков, возможно, сыгравший важную роль и в эволюции Солнечной системы, — происходящие время от времени вспышки светимости, наблюдаемые как явление FU Ori. Во время вспышки светимость звезды увеличивается до сотен светимостей Солнца. Нами исследовано сопутствующее изменение химического состава протопланетного диска. Найденны соединения, содержание которых чувствительно к вспышке ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$  и др.), а также выделены молекулы, для которых оно остается повышенным в течение десятков лет после окончания вспышки ( $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{NH}_2\text{OH}$  и др.). Проанализированы пути формирования этих молекул, и рассмотрена возможность их наблюдения в реальных объектах.

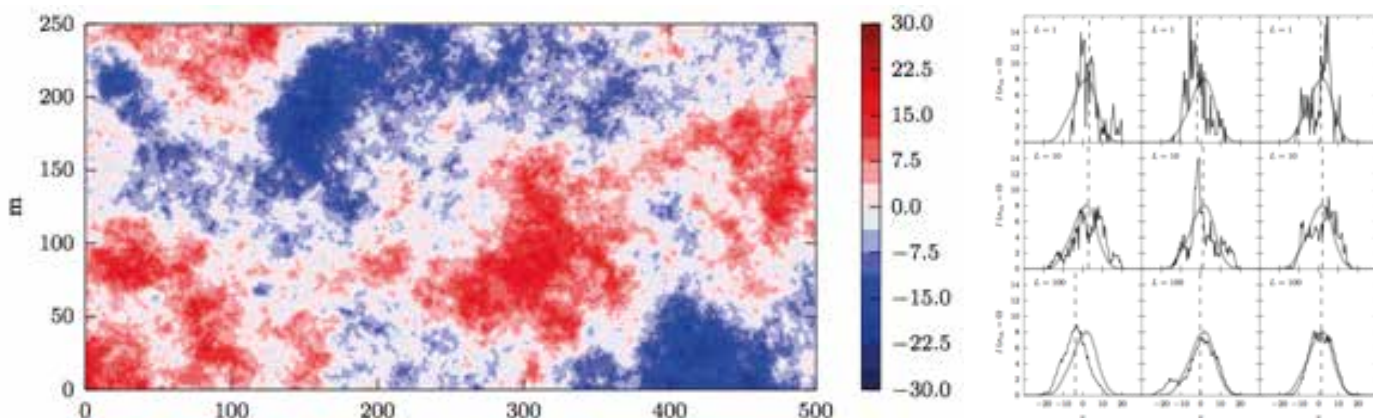
Разработана модель столкновительной плазменной зарядки пылинок в слабоионизованном запыленном газе протопланетного диска. Показано, что темп слипания мелких пылинок в газопылевом диске на раннем этапе формирования планетной системы качественным образом зависит от заряда пылинок. Для характерных физических условий протопланетных дисков выявлено несколько режимов — электрон-ионной плазмы, пыль-ионной плазмы и пыль-пылевой плазмы. Эффективная коагуляция пылинок возможна лишь в режиме пыль-пылевой и пыль-ионной плазмы. Однако сам рост пыли приводит к смене режима на электрон-ионный, при котором дальнейшая коагуляция невозможна из-за сильного электростатического барьера.

lower than expected. As a result, the masses of the disks determined by CO can be significantly underestimated. Neglect of this effect can lead to incorrect interpretation of observational data.

Another key aspect of the evolution of protoplanetary disks, which may have played an important role in the evolution of the Solar System, is the occasional outbursts of luminosity observed as the FU Ori phenomenon. During an outburst, the luminosity of a star increases to hundreds of the luminosities of the Sun. We have investigated the concomitant change in the chemical composition of the protoplanetary disk and found the compounds, content of which is sensitive to the outburst ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ , etc.), and identified those molecules for which it remains elevated for tens of years after the end of the outburst ( $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{NH}_2\text{OH}$ , etc.). The ways of formation of these molecules were analyzed, and the possibility of their observation in real objects was studied.

A model of collisional plasma charging of dust grains in a weakly ionized dusty gas of a protoplanetary disk was developed. It was shown that in a disk at an early stage of the formation of the planetary system the rate of coagulation of small dust grains qualitatively depends on the charge of the dust grains. Several regimes were identified for the typical physical conditions of protoplanetary disks — electron-ion plasma, dust-ion plasma, and dust-dust plasma. Effective coagulation of dust grains is possible only in the regime of dust-dust and dust-ion plasma. However, the growth of dust itself leads to a change in the regime to electron-ion, where further coagulation is impossible due to a strong electrostatic barrier.

For the first time, we propose a method for reconstruction of the turbulence spectrum from the velocity profiles obtained by radio interferometric observations. Previous methods allowed determining only the average turbulent velocity, which is insufficient for verification of physical models of turbulence. It



Тестовое распределение радиальной скорости (слева) и соответствующие профили спектральных линий (справа) при наблюдении на разных масштабах / Test distribution of radial velocity (left) and corresponding spectral line profiles (right) observed at various spatial scales

Впервые предложена методика, позволяющая восстановить спектр турбулентности по характеристикам профилей скоростей, получаемым при помощи радиоинтерферометрических наблюдений. Существовавшие ранее методы позволяли определять только среднюю турбулентную скорость, чего недостаточно для верификации физических моделей турбулентности. Впервые показано, что в радиоинтерферометрических наблюдениях с различным угловым разрешением содержится информация о характеристиках турбулентности на разных масштабах, что теоретически позволяет восстановить ее полный спектр.

has been shown for the first time that radio interferometric observations with different angular resolution contain information on the characteristics of turbulence at different scales. Therefore, it is possible to reconstruct the full spectrum of turbulence.

#### Основные публикации / Main publications

A.V. Ivlev, V.V. Akimkin, P. Caselli, ApJ, 833, id. 92 (2016)  
 D.V. Bisikalo et al., MNRAS, 458, 3892 (2016)  
 T. Molyarova et al., ApJ, 849, 130 (2017)  
 T. Molyarova et al., ApJ, 866, 46 (2018)  
 D. Wiebe et al., MNRAS, 485, 1843 (2019)  
 T. Molyarova et al., ApJ, 910, id.153 (2021)

## АСТРОХИМИЯ И МИКРОФИЗИКА ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ ASTROCHEMISTRY AND MICROPHYSICS IN STAR-FORMING REGIONS

Эволюция пылинок в областях звездообразования определяется сложным комплексом физических процессов, включающих как взаимодействие пылинки с фотонами и частицами высоких энергий, так и взаимодействие пылинок друг с другом. В результате может происходить разрушение пылинок, их рост, а также изменение внутренней структуры. В ИНАСАН разработана эволюционная модель SHIVA, в которой впервые учтены все эти процессы. Модель позволяет исследовать эволюцию пылевых частиц (в том числе органических) в широком диапазоне условий и рассчитывать спектры излучения эволюционирующего ансамбля пылевых частиц. Одним из приложений модели SHIVA стало исследование распределения пылинок и макромолекул в ФДО Барьер Ориона. В результате это исследования было оценено содержание нейтральных и заряженных углеводородных частиц на различных расстояниях от ионизирующих звезд.

The evolution of dust grains in star-forming regions is determined by a complex set of physical processes, including both the interaction of a dust grain with photons and high energy particles, and the interaction of dust grains with each other. It may result in the destruction of dust particles, their growth, or change in their internal structure. INASAN has developed an evolutionary model SHIVA, which for the first time takes into account all these processes. The model allows one to study the evolution of dust particles (including organic ones) in a wide range of conditions and calculate the emission spectra of an evolving ensemble of dust particles. One of the applications of the SHIVA model was the study of the distribution of dust grains and macromolecules in the Orion Barrier PDR. As a result of this study, the abundance of neutral and charged hydrocarbon particles at various distances from ionizing stars was estimated.

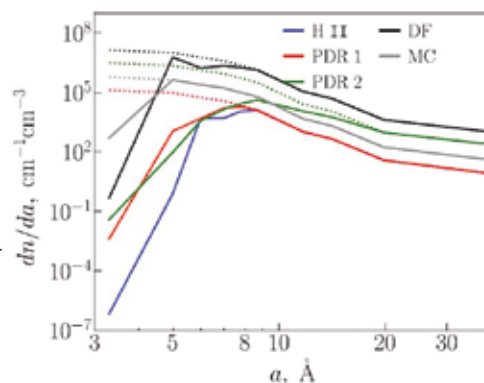
В ИНАСАН на протяжении многих лет разрабатывается астрохимическая модель областей звездообразования PRESTA. В последние годы на ее основе разработан программный пакет PRESTALINE, предназначенный для моделирования и анализа молекулярных спектров объектов в областях звездообразования. Пакет PRESTALINE обеспечивает непосредственное сравнение результатов теоретического моделирования с результатами наблюдений и упрощает анализ наблюдаемых спектров, позволяя исследователю оценивать физические условия в исследуемом объекте и количественно интерпретировать его химический состав.

For many years INASAN has been developing PRESTA, a model for chemical evolution of star-forming regions. In recent years, on its basis, the PRESTALINE software package has been developed. PRESTALINE is designed for modeling and analyzing the molecular spectra of the star-forming regions. It provides a direct comparison of theoretical simulations with observations and simplifies the analysis of observed spectra, allowing the researcher to estimate physical conditions in the studied object and quantitatively interpret its chemical composition.

#### Основные публикации / Main Publications

Murga et al., MNRAS, 488, 965 (2019)  
 G. Van Looveren, O. Kochina, D. Wiebe, Open Astron., 30, 96 (2021)  
 Murga et al., MNRAS, 509, 800 (2022)

*Вычисленное при помощи SHIVA распределение пылинок по размерам в различных слоях Барьера Ориона от области HII до молекулярного облака / Dust grain size distributions at various layers of the Orion Bar from the HII region to the molecular cloud, simulated with SHIVA model*

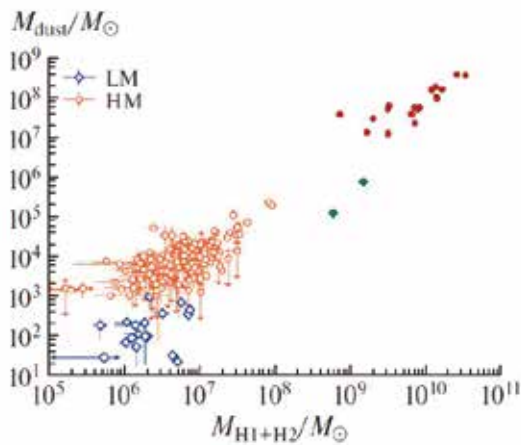


## ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ НА БОЛЬШИХ МАСШТАБАХ STAR FORMATION AT LARGE SCALES

В ИНАСАН ведется масштабное исследование внегалактических комплексов звездообразования (КЗО). Рассмотрены соотношения между атомарным и молекулярным водородным газом и пылинками различных размеров. Используются

INASAN is conducting a widescale study of extragalactic star-forming complexes (SFC). Relations between atomic and molecular hydrogen gas and dust grains of various sizes were investigated. The research required the use of observational

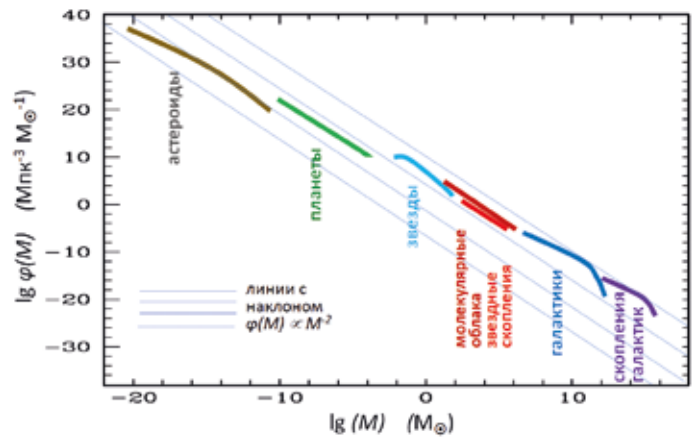




Соотношение массы пыли и массы газа во внегалактических комплексах звездообразования. Оранжевые символы — комплексы высокой металличности, синие — комплексы низкой металличности. Красные и зеленые символы — данные для галактик в целом из других работ / Relation between dust mass and gas mass in extragalactic star-forming complexes. Orange and blue symbols denote complexes of high and low metallicities. Red and green symbols show data for entire galaxies obtained in other studies

наблюдательные данные с инфракрасных космических телескопов «Spitzer» и «Herschel», наземных телескопов VLA (излучение атомарного водорода) и IRAM (излучение молекулы CO). С помощью моделирования синтетических спектров оценен ряд параметров пыли в КЗО: полная масса пыли, доля полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) и т.д. Сделан вывод о том, что соотношения между атомарным, молекулярным водородом и пылью различны для областей низкой и высокой металличности. Области низкой металличности относительно богаче атомарным газом, но беднее молекулярным газом и пылью, в том числе ПАУ. Во всех рассмотренных КЗО масса пыли составляет примерно 1% от массы молекулярного газа. Потоки излучения от атомарного и молекулярного газа не коррелируют с параметрами поля звездного излучения, тогда как потоки излучения пыли растут при увеличении средней интенсивности поля звездного излучения. Отношение потоков в полосах 8 и 24 мкм, характеризующее содержание ПАУ, уменьшается при увеличении интенсивности звездного излучения, что может указывать на эволюционные изменения содержания ПАУ. Подтверждено отсутствие зависимости от металличности вклада излучения на 24 мкм в полную инфракрасную светимость внегалактических областей звездообразования.

Многочисленные наблюдения показывают, что спектры масс в ансамблях астрономических объектов различной природы: космической пыли, астероидов, планет, звезд, звездных скоплений, галактик и скоплений галактик могут быть в первом приближении представлены простым универсальным распределением — функцией  $dN/dM \sim M^{-2}$ , где  $dN$  — количество объектов в диапазоне масс  $[M, M+dM]$ . В серии работ сотрудников ИНАСАН показано, что такой вид спектра может быть объяснен случайным характером процессов образования и разрушения астрономических тел (т.е. процессов фрагментации и коагуляции). Отклонения от этого вида отражают влияние факторов, доминирующих при образовании и дальнейшей эволюции ансамблей тел, т.е. физику процесса. Полученный результат имеет фундаментальное методическое значение.



Функция масс  $\phi(M)$  различных астрономических объектов / Mass function  $\phi(M)$  of various astronomical objects

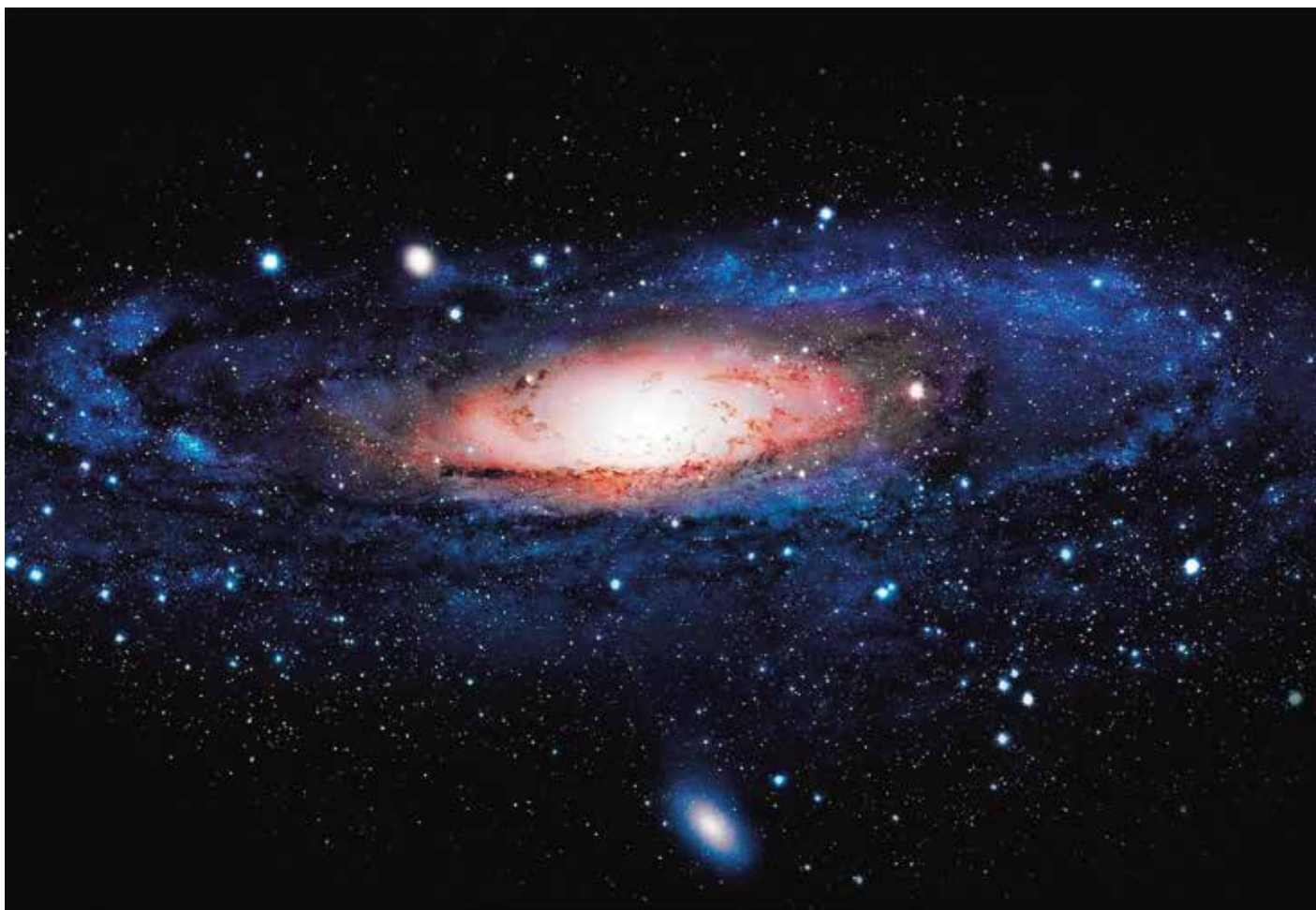
data from infrared space telescopes Spitzer and Herschel, ground-based telescopes VLA (radiation of atomic hydrogen) and IRAM (radiation of a CO molecule). By fitting synthetic spectra to the observed ones, a number of dust parameters in SFC were estimated: total mass of the dust, fraction of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), etc. The researchers from INASAN came to conclusions that the ratios between atomic, molecular hydrogen and dust are different for regions of low and high metallicity. Regions of low metallicity are relatively richer in atomic gas, but poorer in molecular gas and dust, including PAHs. In all the considered SFC, the mass of the dust is approximately 1% of the mass of the molecular gas. Radiation fluxes from atomic and molecular gas do not correlate with the parameters of the stellar radiation field, while dust radiation fluxes grow with an increase in the average intensity of the stellar radiation field. The flux ratio in the 8 and 24  $\mu\text{m}$  bands, which characterizes the PAH content, decreases with the increasing stellar radiation intensity, which may indicate the evolutionary changes in the PAH content. The contribution of 24  $\mu\text{m}$  radiation to the total infrared luminosity of extragalactic star-forming regions does not depend on metallicity.

There are many observational signatures that show that the mass spectra in ensembles of astronomical objects of different nature: cosmic dust, asteroids, planets, stars, star clusters, galaxies and galaxy clusters, can be in the first approximation represented by a simple universal distribution — the function  $dN/dM \sim M^{-2}$ , where  $dN$  — the number of objects in the mass range  $[M, M+dM]$ . In a series of works the researchers from INASAN showed that this type of spectrum can be explained by the random nature of the processes of formation and destruction of astronomical bodies (i.e., processes of fragmentation and coagulation). Deviations from this spectrum reflect the influence of specific factors dominating in the formation and further evolution of ensembles of bodies, i.e. physics of the process. The obtained result is of fundamental methodological significance.

#### Основные публикации / Main publications

K.I. Smirnova et al., Astron. Rep., 61, 646 (2017)

B.M. Shustov, A.V. Tutukov, Astron. Rep., 62, 724 (2018)



Галактики — гигантские газо-звездные системы — представляют собой основные структурные элементы Вселенной. Одно из направлений исследования галактик в Институте астрономии РАН — построение теории образования различных особенностей структуры дисковых галактик и сравнение ее предсказаний с данными наблюдений. К числу этих особенностей относятся центральные перемычки (бары), спиральные ветви и гигантские антициклонические вихри. Проводятся также обширные исследования различных галактических населений, а также общих закономерностей химического состава галактик.

Сотрудники, участвующие в работе по теме: С.А. Алексеева, С.В. Верещагин, Д.З. Вибе, Д.А. Ковалева, О.Ю. Малков, Л.И. Машонкина, М.С. Мурга, Ю.В. Пахомов, А.Э. Пискунов, Е.В. Поляченко, Е.Э. Сивкова, Т.М. Ситнова, Ю.М. Торгашин, А.В. Тутуков, А.В. Федорова, С.А. Хоперсков, Н.В. Чупина.

Работа проводится в сотрудничестве с ГАИШ МГУ, САО РАН, ИСЗФ СО РАН, Южным федеральным университетом, Волгоградским государственным университетом а также с научными учреждениями Украины, Франции, Германии, Италии, США, Китая и Швейцарии.

Galaxies, huge stellar gas-and-dust systems, are the basic elements of the Universe structure. One of research fields in the Institute of Astronomy of the RAS is the development of the theory of formation of various features of disk galaxies structure and comparison of theoretic predictions with observations. These features include bars, spiral arms and giant anticyclonic vortices. Attention is also paid at the studies of various types of galactic populations as well as at general features of chemical composition of galaxies.

Researchers involved in the studies: S.A. Alexeeva, S.V. Vereshchagin, D.S. Wiebe, D.A. Kovaleva, O.Yu. Malkov, L.I. Mashonkina, M.S. Murga, Yu.V. Pakhomov, A.E. Piskunov, E.V. Polyachenko, E.E. Sivkova, T.M. Sitnova, Yu.M. Torgashin, A.V. Tutukov, A.V. Fedorova, S.A. Khoperskov, N.V. Chupina.

The studies are being carried on in collaboration with Sternberg Astronomical Institute MSU, SAO RAS, Institute for Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Southern Federal University, Volgograd State University as well as with scientific institutions of Ukraine, France, Germany, Italy, China, Switzerland and USA.



## СРАВНЕНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ И ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ ШКАЛ РАССТОЯНИЙ ПО ДАННЫМ GAIA COMPARISON OF PHOTOMETRIC AND TRIGONOMETRIC DISTANCE SCALES ACCORDING TO GAIA DATA

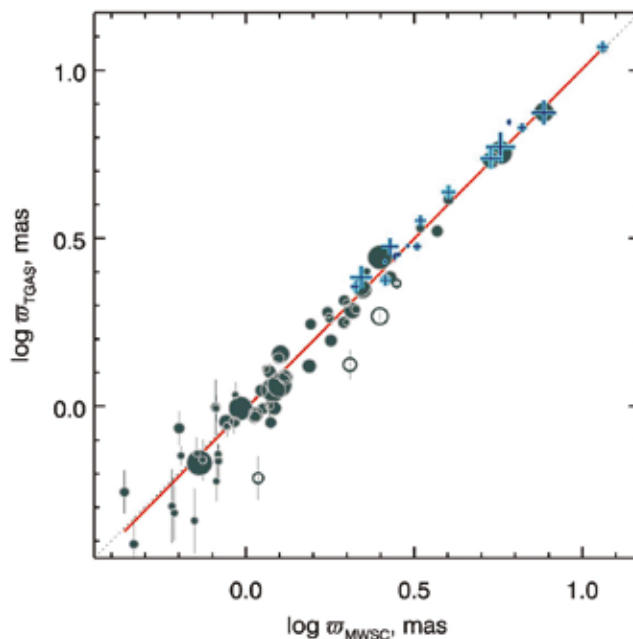
Наступление эпохи всенебесных фотометрических и астрометрических обзоров позволило астрономам перейти от исследований отдельных звездных скоплений к исследованию их популяции в целом. В настоящее время значительный прогресс в обнаружении и изучении звездных скоплений и звездных групп обеспечивается использованием результатов действующей астрометрической космической миссии Европейского космического агентства Gaia (2012 – н.вр.). Высокоточные данные о положении звезд в пространстве и их скоростях позволили значительно повысить точность выделения членов звездных скоплений и определения их характеристик. В число научных групп, занятых поиском и исследованиями характеристик новых рассеянных звездных скоплений и ассоциаций, а также исследованиями ранее известных скоплений на новом уровне точности, входят и сотрудники нашего института. Так, с использованием первых данных Gaia, опубликованных в 2016 г., было впервые показано, что хорошее согласие между фотометрической шкалой расстояний, традиционно применявшейся в течение многих лет для определения расстояний до скоплений, и прямым методом тригонометрического параллакса для рассеянных звездных скоплений сохраняется до более чем 2000 парсек.

The era of all-sky photometric and astrometric surveys allowed astronomers to move forward from the study of individual star clusters to the investigation of their population as a whole. Currently, significant progress in the detection and study of star clusters and stellar groups is provided by using the results of the present-day active astrometric space mission of the European Space Agency, Gaia (since 2012 to present time). High-precision data on the position of stars in space and their velocities have significantly improved the accuracy of identifying members of star clusters and determining their characteristics. Researchers from our Institute are among the scientific groups engaged in the selection and investigation of the characteristics of new open star clusters and associations, as well as studies of previously known clusters at a new level of accuracy. Thus, using the initial Gaia data published in 2016, the good agreement between the photometric distance scale, traditionally used for many years to determine the distances to clusters, and the direct trigonometric parallax method for open star clusters, for the distances up to 2000 parsecs and further was demonstrated for the first time.

### Основные публикации / Main publications

D. Kovaleva, A. Piskunov et al., A&A, 606, id.L8 (2017)

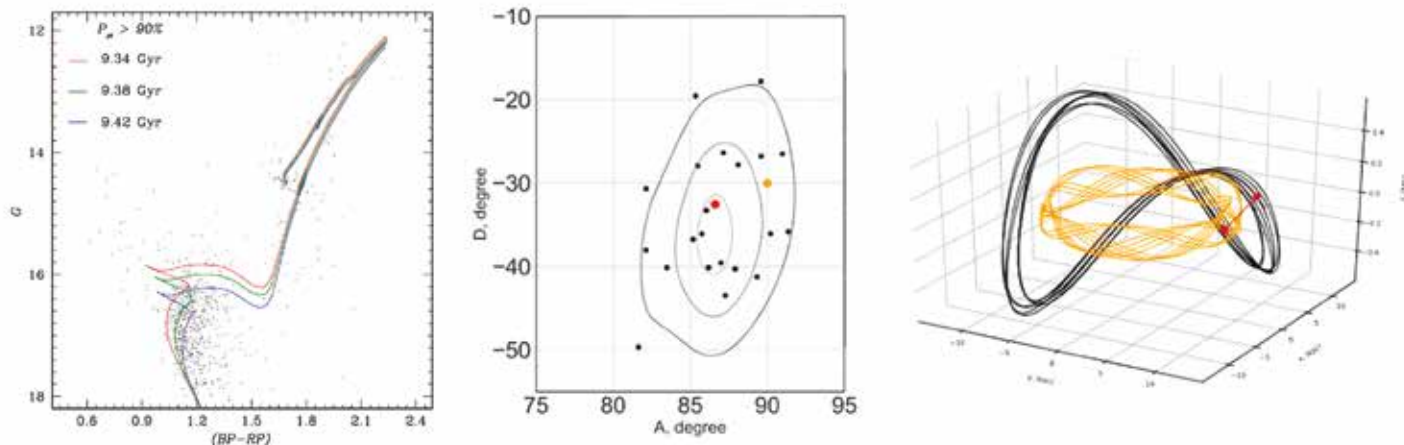
*Фотометрические параллаксы скоплений MWSC и средние тригонометрические параллаксы TGAS звезд-членов этих скоплений. Размер кружков пропорционален числу звезд с параллаксами в скоплении. Крестиками показаны оценки расстояний Gaia до близких скоплений / The photometric parallaxes of the MWSC clusters and the mean trigonometric parallaxes of the TGAS of the member stars of these clusters. The size of the circles is proportional to the number of stars with parallaxes in the cluster. The crosses show estimates of Gaia distances to close clusters*



## ИЗУЧЕНИЕ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ ПО ДАННЫМ GAIA STUDY OF OPEN STAR CLUSTERS WITH GAIA

Рассеянные скопления — это звездные системы с диффузной морфологией, населяющие галактический диск. Поскольку звезды скопления рождаются из одного и того же молекулярного облака, они обладают многими общими свойствами, включая возраст, расстояние от Солнца, химический состав и движение в пространстве. Различия положений в пространстве и разные возрасты делают эти объекты важными индикаторами, или маркерами, эволюции галактического диска. Например, полученная нами по данным Gaia выборка звезд старого скопления NGC 2158 позволила определить его возраст, направление движения звезд и скопления в целом и параметры его орбиты вокруг центра

Open clusters are stellar systems with diffuse morphology that inhabit the galactic disk. The cluster stars are born from the same molecular cloud, so they share many common properties, including age, distance from the Sun, chemical composition, and space motion. The difference in positions in the galactic disk and different ages of these objects are important indicators, or markers, of the evolution of the galactic disk. For example, our sample of stars from the old cluster NGC 2158 make possible to determine the age, the direction of space motion of the cluster stars and the parameters of its orbit around the Galactic center. These data are important for the search of related objects possibly lost by the cluster (stars,



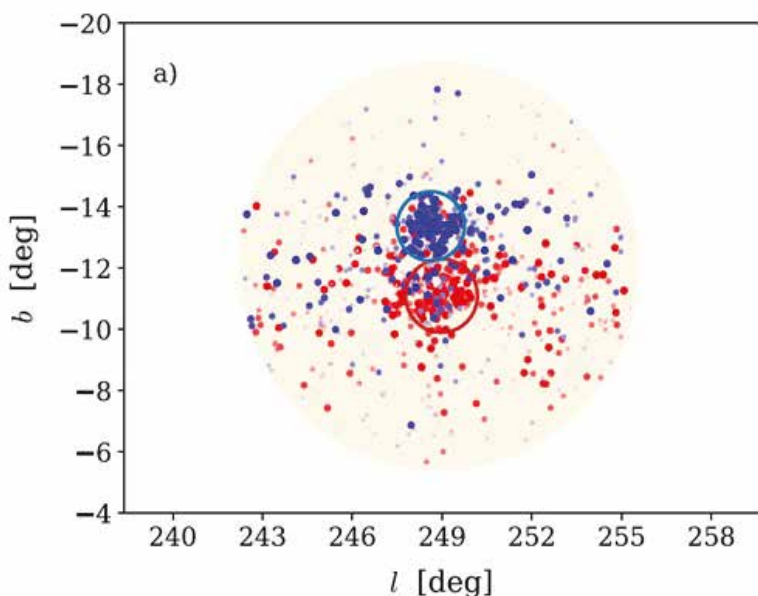
Левая панель демонстрирует процесс определения возраста скопления и расстояния от Солнца с помощью диаграммы звездная величина ( $G$ ) – показатель цвета ( $BP - RP$ ). На средней панели красной точкой показано направление движения скопления в целом, его отдельных звезд (черные точки) и Солнца (оранжевая точка) на небесной сфере (в экваториальной системе координат). На правой панели показана рассчитанная нами орбита NGC 2158 и Солнца вокруг центра Галактики / *The left panel shows the process of determining the age of a cluster and distance from the Sun using the magnitude ( $G$ ) – color index ( $BP - RP$ ) diagram. In the middle panel, dots show the direction of movement: the cluster as a whole (red dot), its individual stars (black dots) and the Sun (orange dot) on the celestial sphere (equatorial coordinate system). The right panel shows the orbits of NGC 2158 and the Sun around the Galactic center*

Галактики. Эти данные важны для поиска родственных объектов (звезд, межзвездных комет и планет, возможно потерянных скоплением). На правой панели приведены трехмерные орбиты рассеянного звездного скопления NGC 2158 и Солнца. Скопление отстает от Солнца в своем движении вокруг центра Галактики. Красная линия указывает на минимальное расстояние ( $d = 2.7$  кпк при  $t = -2.3$  млрд лет) между Солнцем и NGC 2158. Орбита скопления имеет значительные осцилляции по  $Z$ -координате ( $\pm 500$  пк). Шлейфы, формируемые звездами, покинувшими скопление, могут быть растянуты по высоте диска. Наблюдаемые детали пространственной формы скопления и поиск шлейфов проводятся по обновленным данным Gaia EDR3.

Данные Gaia дали толчок исследованиям групп скоплений, связанных общим происхождением, и, в частности, обнаружению ранее неизвестных пар скоплений. Ведутся поиск и исследование таких образований. Как и в случае двойных звезд, исследование взаимодействующих объектов позволяет узнать о них намного больше, чем если бы они были одиночными. Совместно с зарубежными коллегами мы исследовали свойства и эволюцию двойной системы рассеянных звездных скоплений Collinder 135 и UBC 7.

interstellar comets and planets). On the right panel, we show the orbits of the open star cluster NGC 2158 and the Sun in 3D. The cluster lags behind the Sun in its motion around the Galactic center. The red line represents the minimum distance ( $d = 2.7$  kpc at  $t = -2.3$  billion years) between the Sun and NGC 2158. The cluster's orbit has significant oscillations along the  $Z$ -coordinate ( $\pm 500$  pc). The tails formed by the stars that leave the cluster can have an unusual arrangement, stretching along the height of the disk. The observed details of the spatial shape of the cluster and the search for trails are carried out using the updated Gaia EDR3 data.

The Gaia data have stimulated the research of groups of clusters of a common origin, and, in particular, the discovery of previously unknown pairs of clusters. The search and investigation of such formations is underway. As in the case of binary stars, the study of interacting objects allows you to learn much more about them than if they were single. Together with our foreign colleagues, we investigated the properties and evolution of the binary system of open star clusters Collinder 135 and UBC 7. It was found that these two clusters could have formed simultaneously 50 million years ago. In the past, they were probably gravitationally bound, but having lost a



Взаимное расположение наиболее вероятных членов скоплений Collinder 135 (красный цвет) и UBC 7 (синий цвет) в галактической системе координат. Интенсивность цвета соответствует вероятности принадлежности к скоплению. Окружности очерчивают центральные области скоплений / *The relative position of the most likely members of the Collinder 135 (red) and UBC 7 (blue) star clusters in the galactic coordinate system. The color intensity corresponds to the probability of belonging to a cluster. Circles outline central parts of the clusters*



Обнаружено, что эти два скопления могли образоваться одновременно 50 млн лет назад. В прошлом они, вероятно, были гравитационно связаны, но, потеряв значительную часть своей массы в виде газа в ходе начальной эволюции, начали постепенно удаляться друг от друга.

significant part of their mass in the form of gas during the initial evolution, they began to gradually move away from each other.

#### Основные публикации / Main publications

D.P. Sariya et al., AJ 161, id.101 (2021)

A.V. Tutukov, M.D.Sizova, S.V. Vereshchagin. Astron. Rep., 64, 827 (2020)

E.S. Postnikova et al., RAA 20, id.016 (2020)

D. Kovaleva et al., A&A, 642, id.L4 (2020)

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ БАРОВ И ЭВОЛЮЦИИ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК STUDY OF BAR FORMATION MECHANISM AND EVOLUTION OF SPIRAL GALAXIES



Галактика с центральной перемычкой (баром) UGC 6093 (Hubble Space Telescope) / A galaxy with the bar named UGC 6093 (credit: Hubble Space Telescope)

Спиральные узоры большинства дисковых галактик включают в себя прямую центральную перемычку — т.н. бар. Численное моделирование задачи N-тел показывает, что бары легко образуются в звездных дисках галактик. Однако простого теоретического объяснения этому явлению до сих пор нет. Среди множества предложенных в литературе подходов можно выделить два, рассматривающие формирование бара как результат развития неустойчивости особого типа. В одном эта неустойчивость описывается на языке взаимодействия волна-частица, принятым в физике плазмы. Во многом она оказывается схожей с обратным затуханием Ландау. В другом подходе (Линден-Белла) она рассматривается как аналог джинсовской неустойчивости в системе прецессирующих звездных орбит. В ИНАСАН в течение многих лет ведутся исследования механизма барообразования и сопровождающих его процессов эволюции дисковых галактик — формирования псевдобалджа, радиальной миграции звезд и др.

Свойства звездной среды в значительной степени определяются затухающими решениями Ландау. В своих недавних исследованиях мы анализируем характерные особенности режимов затухания для различных видов начальных возмущений.

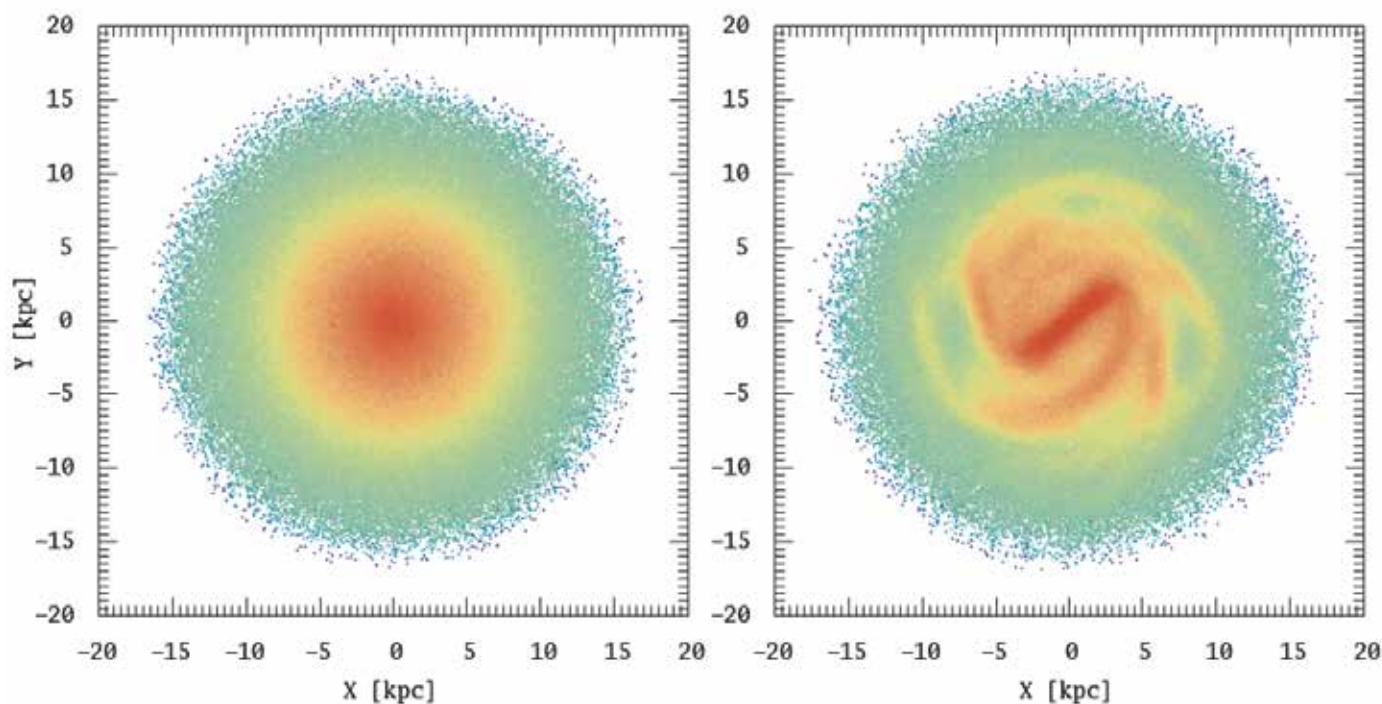
При тщательном анализе теории бара Линден-Белла можно было обнаружить несоответствие с теорией слабого бара: в них по-разному ориентируются звездные орбиты. Мы

Spiral patterns of most disk galaxies have a straight central piece — a so-called “bar”. Numerical N-body simulations show that bars are easily formed in the stellar disks of galaxies. However, there is still no simple theoretical explanation for this phenomenon. Among the many approaches proposed in the literature, two can be distinguished, considering the bar formation as a result of the development of a special type of instability. In one, this instability is described in terms of the wave-particle interaction, adopted from plasma physics. In many ways, it turns out to be similar to the inverse Landau damping. In another approach (Lynden-Bell), it is considered as an analog of the Jeans instability in a system of precessing stellar orbits. For many years, INASAN has been conducting research on the mechanism of bar formation and the accompanying processes of the evolution of disk galaxies — the formation of pseudobulges, radial migration of stars, etc.

The properties of the stellar medium are largely determined by the Landau-damped solutions. In our recent studies, we analyze the characteristic features of damping for various types of initial perturbations.

A careful analysis of the Lynden-Bell bar formation theory revealed a discrepancy with the weak bar theory: the stellar orbits are oriented differently in them. We give a generalization of the Lynden-Bell theory, which allows us to reconcile these two theories.

The bar formation leads to a change in the properties of the



Самопроизвольное образование в однородном по углу звездном галактическом диске (слева, вид сверху) бара и спиральных ветвей (справа). Численное моделирование выполнено с помощью GPU-кодов, использующих графические ускорители / Spontaneous formation of a bar and spiral arms (right panel) in a stellar galactic disk with initial axial symmetry (left panel). Numerical simulations are performed with GPU codes using graphics accelerators

даем обобщение теории бара Линден-Белла, позволяющее согласовать эти две теории.

Образование бара приводит к изменению свойств звездного диска, прежде всего к увеличению дисперсии радиальных скоростей. В ряде случаев это может вызывать вторичную неустойчивость, наблюдаемую поперек диска. Эта изгибающая неустойчивость является причиной быстрого появления уплотнения в центрах галактик, называемого псевдобалджем. В своих работах мы исследуем причины появления и динамические особенности развития этой неустойчивости. Согласно космологическим экспериментам, спиральные галактики часто находятся в окружении галактик-спутников или небольших гало темной материи. Наши численные эксперименты показывают, что наиболее тяжелые из таких объектов способны значительно ускорить или замедлить процесс формирования бара.

stellar disk, primarily an increase of the radial velocity dispersion. In some cases, this causes a secondary instability observed across the disk. This buckling instability is the reason for the rapid appearance of a compact dense structure in the centers of galaxies, called a pseudobulge. In our works, we investigate the causes of the appearance and dynamic features of the development of this instability. According to cosmological experiments, spiral galaxies are often surrounded by satellite galaxies and small dark matter halos. Our numerical experiments show that the heaviest of them can significantly accelerate or slow down the bar formation.

#### Основные публикации / Main publications

- E.V. Polyachenko, I.G. Shukhman, O.I. Borodina, MNRAS, 503, 660 (2021)
- E.V. Polyachenko, I.G. Shukhman, MNRAS, 498, 3368 (2020).
- L.V. Spiegel, E.V. Polyachenko, INASAN Science Reports, 4, 381 (2019)
- 4. R. Moetazedian, E.V. Polyachenko et al., A&A, 604, A75 (2017)



Псевдобалдж в центре Галактики Млечный Путь (представление художника, ESO) / Pseudobulge in the center of Milky Way galaxy (artist's impression, ESO)



## НЕУСТОЙЧИВОСТИ И АКТИВНОСТЬ ЯДЕР ГАЛАКТИК INSTABILITIES AND ACTIVITY OF GALACTIC NUCLEI

В центрах галактик происходят процессы с выделением огромного количества энергии, которое невозможно объяснить с помощью обычных динамических подходов. Такие подходы традиционно учитывают лишь диффузионную релаксацию звездных скоплений вблизи центральных сверхмассивных черных дыр. Неустойчивости способны усилить диффузию звезд на черную дыру, увеличивая тем самым падающий поток вещества и объем излучаемой энергии. Наши теоретические исследования показали, что такая неустойчивость возможна и, совместно с исследователями из Института солнечно-земной физики СО РАН и Университета Хайдельберга (Германия) мы подтвердили существование этой неустойчивости в численных экспериментах.

Huge amount of energy is released in the centers of galaxies, which cannot be explained using conventional dynamic approaches. Such approaches traditionally consider only the diffusion relaxation of the star clusters near a central supermassive black hole. Instabilities can increase the diffusion of stars onto the black hole, thereby increasing the incident flow of matter and the amount of radiated energy. Our theoretical studies have shown that such instability is possible and, together with researchers from the Institute of Solar-Terrestrial Physics of the SB RAS and the University of Heidelberg (Germany), we confirmed the existence of this instability in numerical experiments.

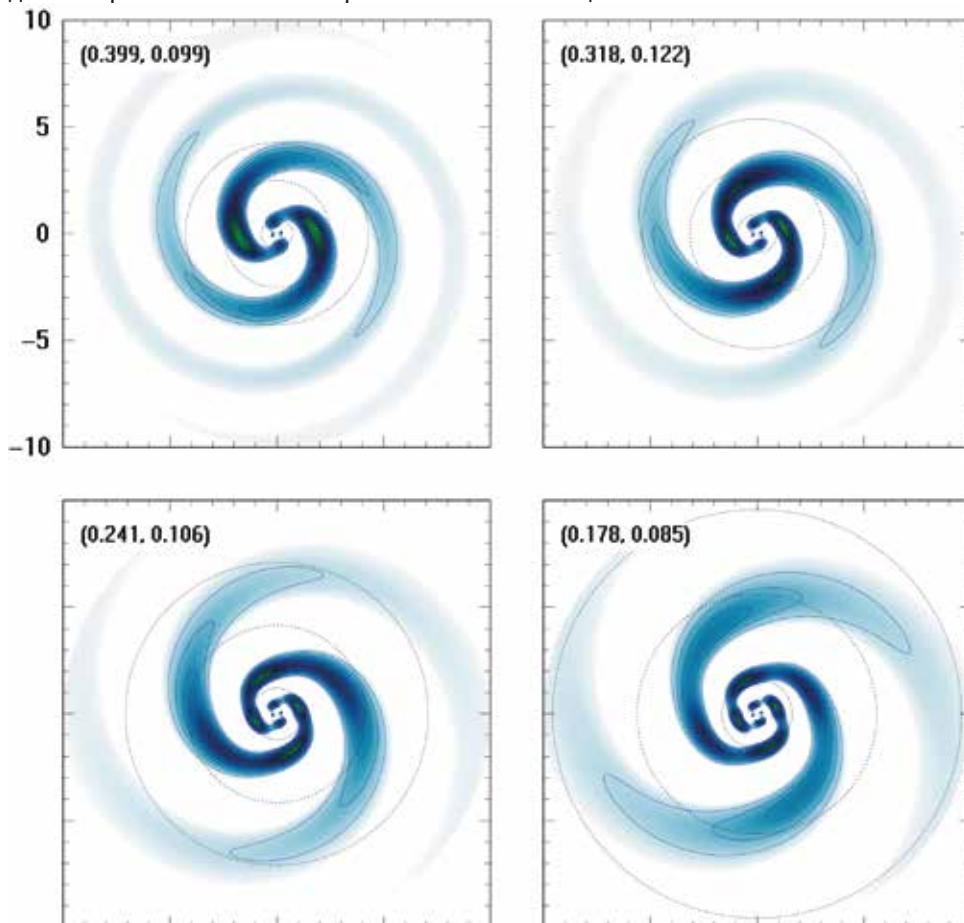
**Основные публикации / Main publications**

E.V. Polyachenko et al., MNRAS, 492, 4819 (2020)

## СПИРАЛЬНЫЕ РУКАВА В ГАЗОВЫХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ДИСКАХ SPIRAL ARMS IN GASEOUS GALACTIC DISCS

В дисковых галактиках, наряду с массивным звездным диском, как правило имеется газовый диск, в котором также наблюдаются спиральные узоры. В литературе известны решения уравнений газовой динамики в приближении туго закрученных спиральных рукавов. Из-за особенностей взаимодействия спиральной волны с резонансами галактического диска, волна может наблюдаться на существенно более далеких расстояниях по сравнению со звездным диском. В своих работах мы разработали новый метод нахождения собственных возмущений произвольной закрутки и исследовали особенности взаимодействия спиральных волн с резонансами. На рисунке внизу приведены примеры полученных спиральных узоров. Отметим, что газовые узоры ведут себя регулярно на линдбладовских резонансах. Звездные спирали не могут продолжаться за внешним линдбладовским резонансом из-за их резонансного поглощения.

In addition to a massive stellar disk, there is usually a gas disk in disk galaxies, which also shows a spiral pattern. Spiral arm solutions of the equations of gas dynamics in the tightly-wound approximation are known in the literature. Due to the peculiarities of the interaction of the spiral wave with the resonances of the galactic disk, the wave can be observed at significantly larger distances compared to the stellar disk. In our work, we have developed a new method for finding the perturbations of an arbitrary form and investigated the features of the interaction of spiral waves with resonances. On a diagram below examples of simulated spiral patterns are shown. Note that the gaseous patterns behave regularly at Lindblad resonances. Stellar spirals cannot go beyond the outer Lindblad resonance because of the resonance absorption.



Примеры спиральных узоров в газовых галактических дисках. Пунктирные линии указывают на положение линдбладовских резонансов, штриховые — коротационного резонанса / Examples of spiral patterns in gaseous galactic disks. Dotted lines show positions of Lindblad resonances, and dashed lines indicate corotation resonances

**Основные публикации / Main publications**

E.V. Polyachenko, MNRAS, 478, 4268 (2018)

L.V. Spiegel, E.V. Polyachenko, INASAN Science Reports, 4, 374 (2019)

## АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ASTRONOMICAL DATA



*Альянс «Международная виртуальная обсерватория» / International Virtual Observatory Alliance*

Бурный прогресс в современных наблюдательных и вычислительных технологиях приводит к лавинообразному возрастанию объема получаемых астрономических данных. Накопленного наблюдательного материала уже сейчас достаточно для решения многих астрофизических задач. Нужно лишь найти и загрузить на компьютер готовый оцифрованный снимок нужного участка неба. С учетом появления недорогих технологий хранения данных и высокоскоростных сетей, проекты мульти-терабайтных общедоступных баз данных стали вполне реалистичными. Институт астрономии РАН занимается как организационным аспектом этой проблемы, так и непосредственным созданием каталогов, а также переводом в цифровую форму собраний астрономических фотографий, сделанных на протяжении XX века.

Сотрудники, участвующие в работе по направлению: А.С. Авдеева, С.В. Верещагин, О.Б. Длужневская, А.О. Жуков, А.М. Зубарева, П.В. Кайгородов, Е.В. Казаровец, Н.Н. Киреева, Д.А. Ковалева, О.Ю. Малков, Е.Н. Пастухова, П.В. Пахомова, Н.Н. Самусь, С.А. Сапожников, М.Д. Сизова, С.Г. Сичевский, Т.Г. Соловьева, А.Ю. Сытов, А.В. Хруслов, Д.А. Чулков, Н.В. Чупина, Б.М. Шустов.

Работа проводится в сотрудничестве с ГАИШ МГУ, ФИЦ ИУ РАН, САО РАН, УрФУ, а также научными организациями Франции, ЮАР, Китая, Эфиопии, Чехии, Индии и Германии.

The rapid progress of modern observational and computational techniques leads to an avalanche growth of the volume of astronomical data. Accumulated observational material is now sufficient to solve many astrophysical problems. It is enough only to find and download to your computer ready digitized image desired portion of the sky. Due to the new inexpensive technologies of data storage as well as of high-speed networks, projects of multi-terabyte databases for public access are rather realistic. The Institute of Astronomy deals with the organizational aspect of the problem as well as with creation of catalogs and digitization of collections of astronomical photographic plates made during the XX century.

Researchers involved in the studies: A.S. Avdeeva, S.V. Vereshchagin, O.B. Dluzhnevskaya, A.O. Zhukov, A.M. Zubareva, P.V. Kaygorodov, E.V. Kazarovets, N.N. Kireeva, D.A. Kovaleva, O.Yu. Malkov, E.N. Pastukhova, P.V. Pakhomova, N.N. Samus, S.A. Sapozhnikov, M.D. Sizova, S.G. Sichevsky, T.G. Solovieva, A.Yu. Sytov, A.V.Khruslov, D.A. Chulkov, N.V. Chupina, B.M.Shustov.

The studies are being carried on in collaboration with the Sternberg Astronomical Institute MSU, IPI RAS, SAO RAS, UrFU, as well as with research institutes of France, South Africa, China, Ethiopia, Czech Republic, India and Germany.



Виртуальная обсерватория представляет собой реализацию концепции электронной науки в астрономии. Она интегрирует в единую среду гигантские астрономические архивы и базы данных, распределенные по всему миру, а также инструменты анализа данных и вычислительный сервис, используя при этом набор однородных стандартов и технологий.

Международная виртуальная обсерватория включает в себя все значительные национальные и международные проекты по созданию виртуальных обсерваторий, основная цель которых — объединить существующие архивы наземных и космических инструментов и обеспечить исследователям и общественности удобный доступ к ним. Эта задача представляется весьма значительной не только из-за колоссального объема астрономических данных, но и их спектрального разнообразия (от рентгена до радио). Каждый спектральный диапазон предоставляет свою уникальную информацию о небесном объекте или явлении; при этом требуется специализированная экспертиза для правильной интерпретации данных. Вся эта информация также интегрируется в Международной виртуальной обсерватории и позволяет синтезировать данные, чтобы использовать их в конкретных научных приложениях.

Для функционирования Международной виртуальной обсерватории необходим набор однородных стандартов и технологий, которые разрабатывает, внедряет и поддерживает Альянс «Международная Виртуальная обсерватория» — созданный 20 лет назад международный союз национальных и международных обсерваторий, призванный координировать деятельность по стандартизации описания, поиска, доступа и публикации данных. Одним из основателей и важным участником Альянса является Российская виртуальная обсерватория (РВО), конечной целью которой является обеспечение российским астрономам удобного доступа к обширным источникам данных и метаданных, создаваемых в результате работы наблюдательных проектов, а также объединение информации о российских данных с их последующей интеграцией в Международную виртуальную обсерваторию. Для этого в рамках проекта РВО регулярно издаются обзоры, описывающие источники астрономических данных. Их цель состоит в том, чтобы проанализировать основные направления функционирования и развития важнейших источников данных, создаваемых российскими астрономами или с их участием, и сравнить их с мировыми тенденциями в этих областях. В частности, следует отметить входящие в РВО архивы космических проектов: осуществленных (Астрон, Радиоастрон), текущих (Спектр-РГ, INTEGRAL), будущих (WSO-UV) и планируемых (Лиры-Б, Свеча). Необходимо отметить создание высококачественных фотометрических и спектроскопических источников данных. Вклад российских астрономов в создание, анализ и распространение данных по малым телам Солнечной системы, по переменным звездам, по двойным и кратным системам всех наблюдательных типов также оценивается очень высоко.

Конечной целью создания виртуальной обсерватории является повышение эффективности использования мировых астрономических данных для решения научных задач. Одним из непосредственных приложений для пользователей виртуальной обсерватории является возможность одновременного исследования нескольких каталогов и обзоров с



Virtual Observatory is a collection of integrated astronomical data archives and software tools that utilize computer networks to create an environment in which research can be conducted. About fifteen years ago several countries initiated national virtual observatory programs that combine existing databases from ground-based and orbiting observatories and make them easily accessible to researchers. As a result, data from all the world's major observatories will be available to all users and to the public. This is significant not only because of the immense volume of astronomical data but also because the data on stars and galaxies have been compiled from observations in a variety of wavelengths: optical, radio, infrared, gamma ray, X-ray and more. Each wavelength can provide different information about a celestial event or object, but also requires a special expertise to interpret. In a virtual observatory environment, all of this data is integrated so that it can be synthesized and used in a given study.

The International Virtual Observatory Alliance (IVOA) represents twenty two national and international projects working in coordination to realize the essential technologies and interoperability standards necessary to create a new research infrastructure. Russian Virtual Observatory (RVO) is one of the founders and important members of the IVOA. Principal RVO goals are stated as follows: i) to provide Russian astronomical community with a convenient access to the world astronomical resources and ii) to unite Russian data, to provide them to the rest of the world and to integrate them into the International Virtual Observatory. For this purpose, the RVO issues regular reviews of Russian astronomical data sources. Their aim is to analyze main directions of creation and functioning of major data sources constructed by Russian astronomers or with their participation and to compare them with the worldwide trends in these fields. In particular, archives of space projects should be mentioned: past (Astron, Radioastron), present (SRG, INTEGRAL), future (WSO-UV) and planned (Lyra-B, Svecha) missions. High quality photometric and spectroscopic data sources should be mentioned. Russian contribution to the collection, analysis and dissemination of astronomical data on minor bodies of the Solar System, on variable stars, and on binary and multiple stars of all observational types is also extremely valuable.

An ultimate goal of Virtual Observatory is to strengthen scientific applications of world astronomical data. One of direct applications for the Virtual Observatory community is that of merging catalogues and surveys in order to generate customized views of data. Developing methods for analyzing and extracting information from modern sky surveys is a challenging task in astrophysical studies, and in the frame of RVO project we study possibilities to parameterize stars and interstellar medium from multicolor photometry performed in modern photometric surveys (GALEX, SDSS, 2MASS, WISE, Pan-STARRS, UKIDSS, etc.). For this purpose, we have developed a method to estimate effective temperature and luminosity from photometric data. To make the values of stellar parameters more precise, we involve also data from modern astrometric (Gaia) and spectroscopic (LAMOST, RAVE) surveys.

These parameters allow us to construct 3D maps of

целью объединения представленных в них данных. Разработка методов анализа и извлечения информации из современных обзоров неба является сложной и многообещающей задачей в астрофизических исследованиях. Так, в рамках проекта PBO изучается возможность параметризации звезд и межзвездной среды из многоцветной фотометрии, содержащейся в современных фотометрических обзорах (GALEX, SDSS, 2MASS, WISE, Pan-STARRS, UKIDSS и т.д.). Для этой цели в Институте астрономии РАН разработан метод оценки температуры и светимости звезды по фотометрическим данным. Для уточнения значений параметров звезд привлекаются также данные из современных астрометрических (Gaia) и спектроскопических (LAMOST, RAVE) обзоров. Эти параметры позволяют создавать трехмерные карты распределения поглощающего вещества и оценивать межзвездное поглощение как до объектов нашей Галактики, так и до внегалактических объектов.

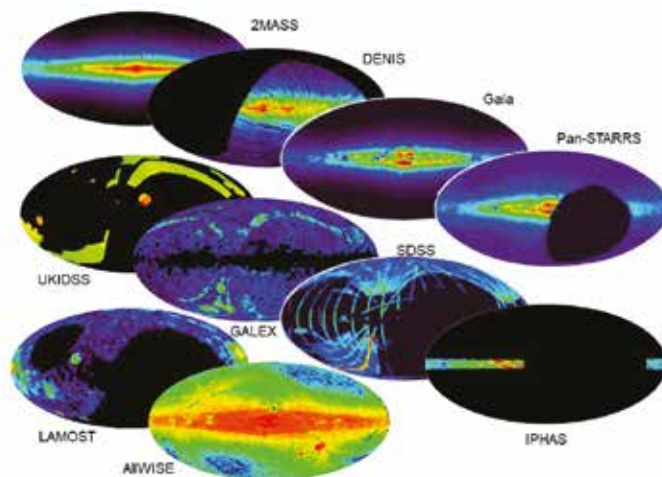
### Основные публикации / Main publications

O. Malkov et al., *Galaxies* 6, 7 (2018)

O. Malkov, D.A. Kovaleva, S.G. Sichevsky, G. Zhao, *RA&A*, 20, 139 (2020)

S. Karpov, O. Malkov, G. Zhao, *MNRAS*, 505, 1252 (2021)

absorbing matter and estimate the interstellar extinction for objects in our Milky Way Galaxy and for extragalactic objects.



Современные обзоры неба / Modern sky surveys

## ОЦИФРОВКА АРХИВОВ ФОТОПЛАСТИНОК DIGITIZATION OF PLATES ARCHIVES

Работа по переводу пластинок в цифровую форму активно ведется и в объединенном коллективе группы ОКПЗ ИНАСАН и ГАИШ МГУ. Она нацелена, главным образом, на исследования переменных звезд. В ГАИШ хранится уникальная коллекция фотопластинок высокого качества, содержащая десятки тысяч снимков. Негативы коллекции позволяют детально исследовать фотометрическое поведение многих тысяч переменных звезд, а также обнаруживать новые переменные звезды. К настоящему времени по сканам фотопластинок ГАИШ обнаружено около 1500 новых переменных звезд. Создан электронный каталог пластинок с указанием координат центра каждой из них. Информацию о работе по оцифровке пластинок можно найти по адресу: <http://www.sai.msu.su/gcvs/digit/digit.html>.

Digitizing plates is also actively under way in the joint team of the INASAN GCVS group and Sternberg Astronomical Institute (SAI, Lomonosov Moscow University). Plates from these stacks make it possible to study, in detail, photometric behavior of many thousands of variables as well as to detect new variable stars. By now, some 1500 new variable stars were discovered using scanned SAI photographic plates. An electronic catalog of plates has been compiled, with equatorial coordinates of the plate center given for each of them. For information on plate scanning, see <http://www.sai.msu.su/gcvs/digit/digit.html>.

## БАЗА ДАННЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД THE BINARY STAR DATABASE

Научная деятельность в большой степени опирается на результаты предыдущих исследований, экспериментов, наблюдений. Астрономами производится большое количество каталогов, которые после публикации становятся доступными для всего сообщества. Для поддержки повседневной научно-исследовательской работы астрономов, мы собрали, проверили, унифицировали, организовали и представили в наиболее подходящей и доступной форме каталогизированную информацию о двойных и кратных звездах.

При отборе каталогов для интеграции приоритет отдавался тем, которые могут обеспечить оптимальную информационную поддержку крупным проектам, проводимым астрономическим сообществом. В последние годы астрономы уделяли большое внимание созданию полных каталогов двойных звезд различных наблюдательных типов: пар с общим собственным движением, интерферометрических, спектроскопических двойных звезд и др.



Scientific results strongly rely on previous studies, experiments, and observations. A large number of catalogues is produced by astronomers and needs to be available to the whole community. To support astronomers in their daily research work, we collect, verify, homogenize, and organize catalogued information on binary and multiple stars in the most appropriate and comprehensible way.

Catalogues were selected for integration with priority given to those which can help provide an optimal support for the large projects conducted within the astronomical community. A large effort was devoted in recent years to make complete catalogues of binary stars of various observational types: common proper motion, interferometric, spectroscopic binaries, etc. However, due to lack of comprehensive data sources, in many cases we were first to construct general lists of binaries of some specific observational type, e.g., for visual, orbital, eclipsing and X-ray binaries.





Примеры двойных и кратных звезд, включенных в BDB / *Examples of binary and multiple stars included in BDB*

Поскольку для других наблюдательных типов двойных отсутствовали исчерпывающие источники наблюдательных данных, мы создали такие общие каталоги для визуальных, орбитальных, затменных и рентгеновских двойных звезд. Упомянутые выше каталоги предоставляют информацию о двойных звездах конкретных наблюдательных типов. Однако, не существовало ресурса данных, синтезирующего наблюдательную информацию для всех типов двойных звезд. База данных двойных и кратных звезд (BDB, [bdb.inasan.ru](http://bdb.inasan.ru)), разработанная в Институте астрономии РАН, заполняет этот пробел. В настоящее время BDB содержит значения физических и позиционных параметров ~260000 компонентов ~120000 звездных систем кратностью от 2 до 20 и более. Для корректной идентификации и кросс-идентификации объектов в BDB, была разработана самосогласованная схема обозначений (BSDB) компонентов, пар и систем. Кроме того, для облегчения кросс-отождествления объектов в различных каталогах двойных систем, был создан Список обозначений двойных (ILB).

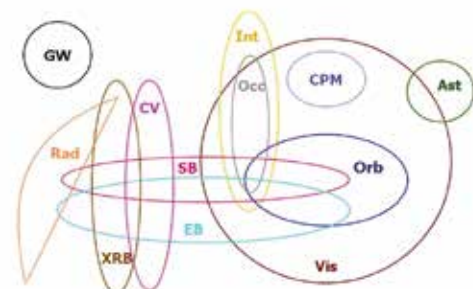
База данных BDB развивается как в количественном (с подключением новых каталогов), так и в качественном (с улучшением интерфейса пользователя и интеграцией стандартов Виртуальной обсерватории) отношениях. BDB может служить для получения и комбинации эмпирических данных для всех типов двойных и кратных систем, для определения параметров звезд и орбит, а также для построения фундаментальных соотношений между ними на всем диапазоне значений звездных масс и размеров орбит. BDB также полезна для изучения истории образования двойных и одиночных звезд и для подготовки будущих программ наблюдений различных типов двойных звезд.

#### Основные публикации / *Main publications*

- D. Kovaleva, O. Malkov, P. Kaygorodov, B. Debray, ASP Conf. Ser. 521, 217 (2019)  
 O. Malkov, D. Chulkov, MemSAIt, 90, 420 (2019)  
 D. Kovaleva, O. Malkov, P. Kaygorodov, RA&A, 19, 31 (2019)

Various catalogues mentioned above serve as data sources for binary stars of different observational types. However, there was no database synthesizing the various categories, and the Binary and multiple stars DataBase (BDB, [bdb.inasan.ru](http://bdb.inasan.ru)), developed in Institute of Astronomy, fills this gap. The BDB database presently contains data on physical and positional parameters for about 260,000 components of 120,000 stellar systems of multiplicity 2 to more than 20, taken from a large variety of published catalogues and databases. To designate and cross-identify components and systems correctly, a self-consistent identification scheme for objects in binary and multiple stars, BSDB, was developed. Also, the Identification List of Binaries (ILB) was constructed to facilitate cross-referencing between different catalogues of binary stars.

BDB is developing both in size, including new catalogues, and in depth, adding new features improving usability and promoting integration of the Virtual Observatory standards. BDB can serve as a database for deriving and combination of empirical data for all types of binary/multiple systems, for determination of stellar and orbital parameters and construction of fundamental relations between them throughout the entire stellar mass and orbital separation ranges, for study of star formation history of binary and single stars and for the preparation of future observing programs concerning various types of binaries.



Связь между наблюдательными типами двойных систем / *Observational types of binaries: genetic connections*

ВЕНСКАЯ БАЗА АТОМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ (VALD) И  
ВИРТУАЛЬНЫЙ ЦЕНТР АТОМНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ДАННЫХ (VAMDC)  
VIENNA ATOMIC LINE DATABASE (VALD) AND  
VIRTUAL ATOMIC AND MOLECULAR DATA CENTER (VAMDC)



Созданная в 1995 году и поддерживаемая группой астрофизиков из Австрии, Швеции и России (ИНАСАН) база атомных параметров VALD является одной из самых используемых баз для спектрального анализа в астрономии. VALD – постоянно развивающаяся база данных. В 2015 году появилась уже третья её версия. VALD3 содержит более миллиона линий атомов и их изотопов с точными длинами волн, необходимыми для спектрального анализа, и 250 млн. линий, включая линии десяти двухатомных молекул, для расчета поглощения в атмосферах и оболочках звезд. В VALD представлены линии почти всех элементов периодической системы Менделеева в нескольких стадиях ионизации и их изотопов при наличии информации в литературе. Для 64 изотопов можно получить данные о компонентах линий, обусловленных сверхтонким расщеплением уровней. База VALD имеет зеркала в Уппсале, Москве (<http://vald.inasan.ru/~vald3>), Вене и Монпелье, которые обрабатывают запросы более чем 2800 зарегистрированных пользователей из 70 стран мира.

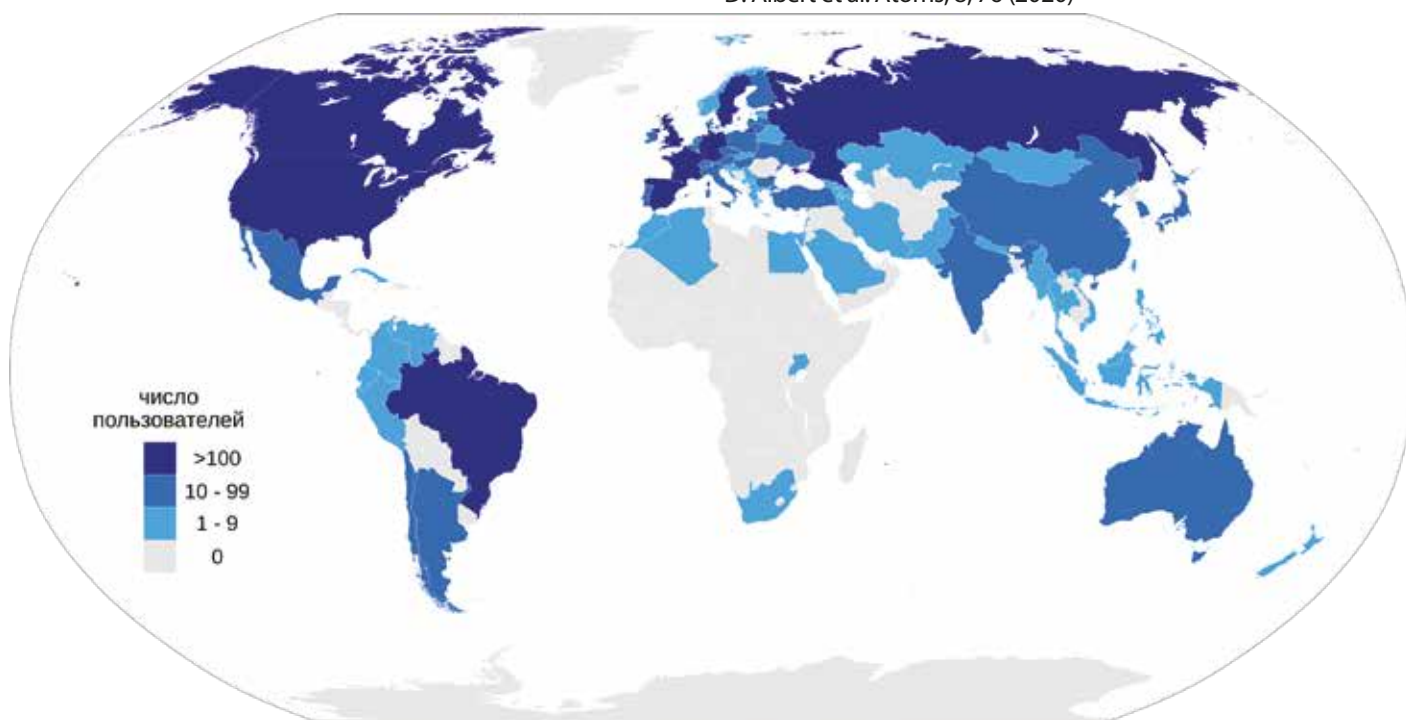
Создатели VALD приняли активное участие в проектировании и разработке международного Виртуального центра атомных и молекулярных данных (VAMDC), который объединяет более трёх десятков баз атомных и молекулярных данных, включая VALD. Доступ к VAMDC осуществляется на портале пользователя <http://portal.vamdc.eu>.

Created in 1995 and supported by astrophysicists from Austria, Sweden and Russia (INASAN) VALD is one of the most used database for spectral analysis in astronomy. VALD continues to be developed. In 2015 its third version was released. VALD3 contains atomic parameters for more than one million lines of atoms and their isotopes, which have accurate wavelengths necessary for detailed spectral analysis, and 250 million lines including lines of ten two-atomic molecules necessary for background opacity calculations. These are lines of almost all elements in the Mendeleev Table in several ionisation stages and their isotopes, with the literature data available. At present VALD provides a possibility to calculate spectra taking into account the effect of hyperfine splitting for 64 isotopes. VALD has four mirror-sites in Uppsala, Moscow (<http://vald.inasan.ru/~vald3>), Vienna, and Montpellier. They treat requests of more than 2800 users from 70 countries over the world.

The founders of VALD have taken part in creating international Virtual atomic and molecular data center (VAMDC) that joins more than 30 atomic and molecular databases, including VALD. VAMDC is accessible via user portal <http://portal.vamdc.eu>.

#### Основные публикации / Main publications

- M.L. Dubernet et al. Journal of Physics B, 49, 074003 (2016)  
Yu. V. Pakhomov, T. A. Ryabchikova, N. E. Piskunov, Astron. Rep., 63, 1010 (2019)  
D. Albert et al. Atoms, 8, 76 (2020)



География пользователей базы данных VALD / Geography of the VALD users



## КОМЕТЫ COMETS

Кометы — важные представители населения Солнечной системы. Фундаментальные параметры комет — размеры ядер, их структура, химический состав, свойства орбит и т. д. — измеряются с помощью средств наземного и космического базирования и являются важным источником информации о Солнечной системе и о ее происхождении. Значительный вклад также вносят архивные наблюдения.

Качество научных данных, полученных из изображений комет, во многом определяется методами, используемыми для обработки изображений. Архивные изображения кометы 21P / Джакобини-Циннера, полученные в июле-сентябре 1985 г. на телескопе Zeiss 400 Института астрономии РАН, были проанализированы с использованием современного метода извлечения информации о структурных компонентах getsf.

На рисунке внизу показан результат обработки фотоизображения кометы 21P / Джакобини-Циннера, полученного с экспозицией 30 минут (левая панель). Изображение проанализировано с использованием метода getsf. Метод корректирует искажения поля, отделяет фон, выделяет детали, в частности, вытянутые за счет ведения телескопа за кометой, изображения звезд.

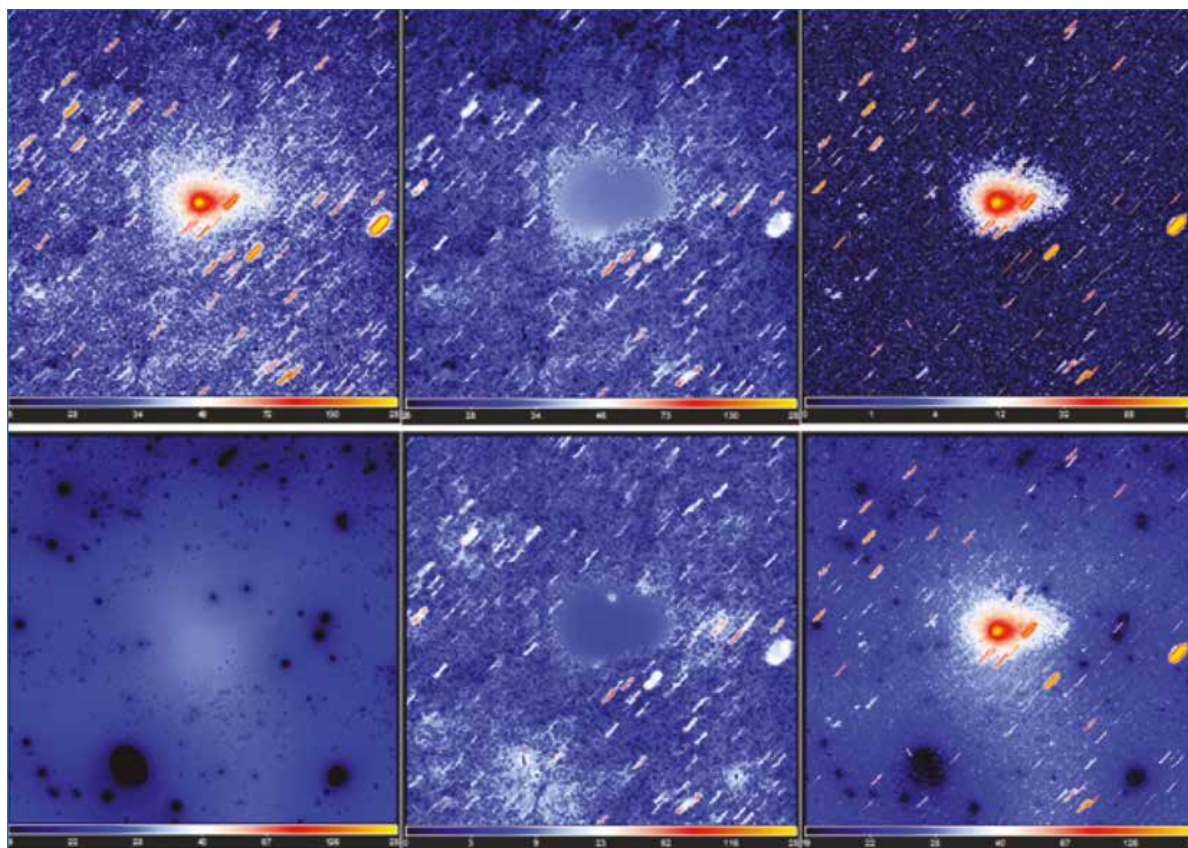
Это одна из иллюстраций того, что пополнение знаний о кометах вполне успешно может строиться на основе интенсивного использования данных архивов. Отметим, что такой процесс вписывается в концепцию развития и использования виртуальных обсерваторий, в частности, RVO.

Comets are important representatives of the population of the Solar System. The fundamental parameters of comets: the size of nuclei, their structure, chemical composition, properties of orbits, etc. are measured using both ground-based and space-based means and are an important source of information about the Solar System and its origin. Archival observations also make a significant contribution.

The quality of scientific data obtained from images of comets is largely determined by the methods used to process the images. Archival images of comet 21P / Giacobini-Zinner, obtained in July-September 1985 with the Zeiss 400 telescope of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, were analyzed using the modern method of extracting information about the structural components getsf.

The figure below shows the result of processing a photographic image of comet 21P / Giacobini-Zinner, obtained with an exposure of 30 minutes. The image is parsed using the getsf method. The method corrects field distortions, separates the background, and highlights details, in particular, images of stars that are stretched due to the telescope following the comet.

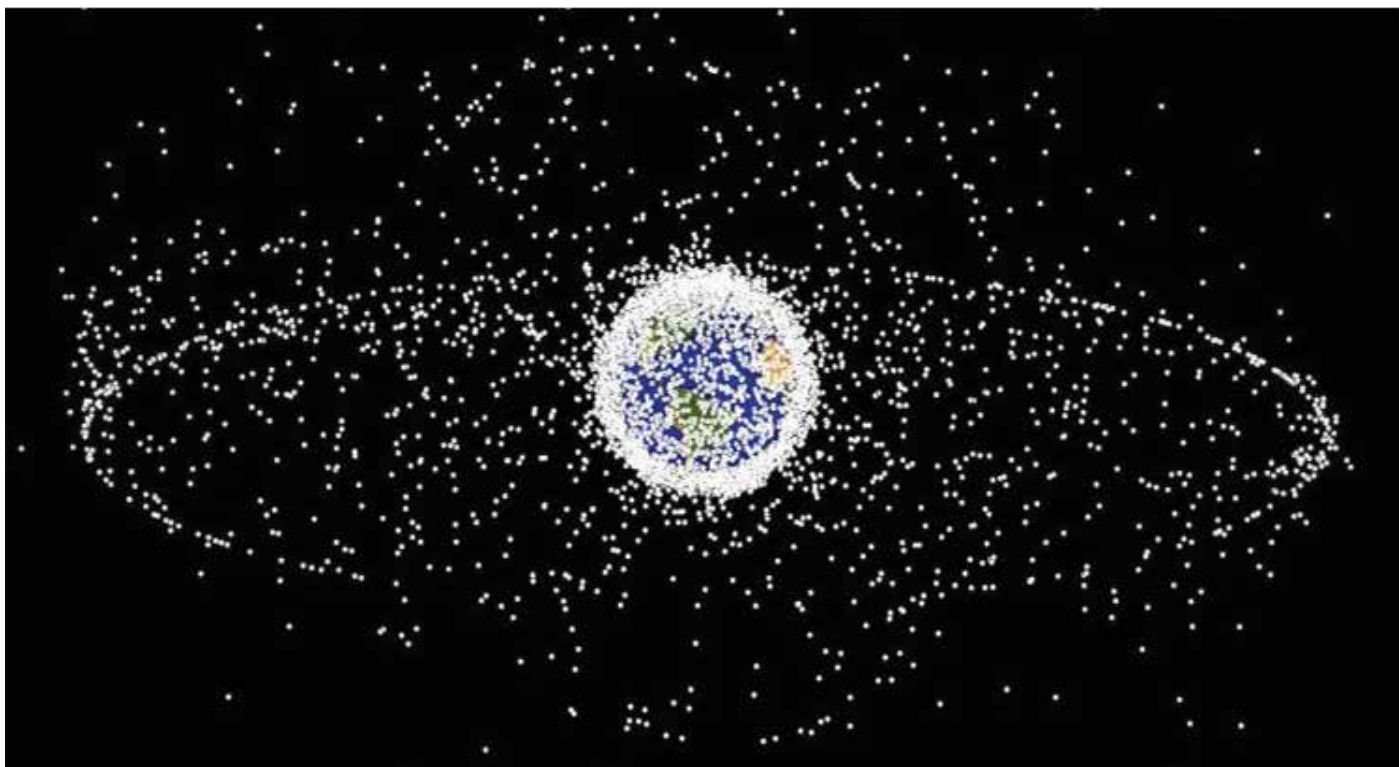
This is one of the illustrations of the fact that the replenishment of knowledge about comets can be quite successfully built on the basis of the intensive use of these archives. Note that such a process fits into the concept of the development and use of virtual observatories, in particular, the RVO.



Обработка изображения кометы Джакобини-Циннера при помощи метода getsf. Верхний ряд: исходное изображение, отделенный фон компоненты относительно круглых структур и сама эта компонента, соответственно. Нижний ряд: отделенный фон компоненты удлинённых структур, сама эта компонента и сумма фона удлинённых структур с компонентой относительно круглых структур, соответственно / Processing of the image of the comet Jacobini-Zinner using the extraction method getsf. Upper row: original observed image, separated background of the component of relatively round structures, and the component itself, respectively. Bottom row: separated background of the component of the elongated (filamentary) structures, the component itself, and a sum of the background with the component of relatively round structures, respectively

# АСТРОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОБЛЕМАМ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И АСТЕРОИДНО-КОМЕТНОЙ ОПАСНОСТИ

## ASTRONOMICAL ASPECTS OF STUDIES RELATED TO SPACE DEBRIS AND ASTEROID AND COMET HAZARD



Многоплановая тема космических опасностей стала одним из важных направлений современной науки. В Институте астрономии РАН направление изучения космических угроз (опасностей) является традиционным. Специфика института проявляется в том, что основные исследования в этом направлении ведутся по проблематике космического мусора (КМ) и астероидно-кометной опасности (АКО).

В 2020 г. под руководством ИНАСАН (отв. Б.М. Шустов) была предпринята попытка вывести работу на общероссийский уровень. Была подготовлена и представлена на объявленный Минобрнауки Конкурс крупных проектов (т. н. «конкурс стомиллионников») заявка на проект «Фундаментальные основы создания российской системы изучения и парирования космических угроз». В составлении заявки участвовали ведущие эксперты практически всех ведущих научных организаций нашей страны. Заявка получилась очень качественной и солидной. Она не прошла по конкурсу, но заняла достаточно высокое место. Материалы заявки еще будут использованы в дальнейшей работе.

В этом разделе вниманию читателей предлагается некоторые интересные результаты недавних исследований по проблеме космических угроз, проведенных в Институте.

Сотрудники, участвующие в работе по теме: С.И. Барабанов, Н.С. Бахтигараев, Г.Т. Болгова, В.В. Бусарев, В.В. Емельяненко, Р.В. Золотарев, А.П. Карташова, П.А. Левкина, С.А. Нароенков, М.Д. Сизова, А.С. Шугаров, Б.М. Шустов, И.Н. Чувашов.

### Основные публикации / Main publications

Б.М. Шустов, Вестник Российской академии наук, 89, 777 (2019)

The multifaceted topic of space hazards has become one of the important branches of modern science. For the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences studying space threats (hazards) is a traditional direction of research. The speciality of the institute is manifested in the fact that the one of the main fields of the research is related to the problems of space debris (SD) and potentially hazardous objects (PHO).

In 2020, under the leadership of INASAN (supervisor B.M. Shustov), an attempt was made to bring the work to the all-Russian level. An proposal for the project “Fundamental basis of the creation of a Russian system for the study of and response to space threats” was prepared and submitted to the competition of large projects (the so-called “one hundred million competition”) announced by the Ministry of Education and Science. Leading experts from almost all the principal scientific organizations of our country took part in drafting the proposal. The proposal turned out to be of a very high quality and well-sounded. It did not pass the competition, but scored rather high. The proposal materials will still be used in further investigations.

This section presents some interesting results of recent research on the problem of space threats, carried out at the Institute.

Researchers involved in the studies: S.I. Barabanov, N.S. Bakhtigaraev, G.T. Bolgova, V.V. Busarev, V.V. Emel'yanenko, R.V. Zolotarev, A.P. Kartashova, P.A. Levkina, S.A. Naroenkov, M.D. Sizova, A.S. Shugarov, B.M. Shustov, I.N. Chuvashov.



## РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ОСНОВНЫМ ЭЛЕМЕНТАМ АСТРОНОМИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА ИЗУЧЕНИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ АКО

### PREPARING SUGGESTIONS FOR MAIN ELEMENTS OF ASTRONOMICAL SEGMENT OF STUDIES AND COUNTERACTION TO ACH

В России пока что нет сети, предназначенной для системного обнаружения опасных астероидов и комет. Предложения по созданию такой сети разрабатываются, в частности, в рамках международного проекта стран БРИКС (проект BRICS-OTN). В ИНАСАН разработан проектный облик перспективного широкоугольного телескопа с апертурой 1 м для развертывания глобальной сети из нескольких телескопов для круглосуточного контроля всего доступного неба из обоих полушарий. Разработаны два варианта оптических систем апертурой 1 м и F-соотношением 1:1.5 и 1:1.3, а также третий вариант телескопа с апертурой 80 см и большим полем зрения. Оптическая схема 1-м телескопа основана на конструкции Зоннефельда и состоит из двухлинзового полноапертурного линзового корректора, зеркала Манжена и двухлинзового корректора вблизи фокальной плоскости. В отличие от камер Шмидта,

размер первичного зеркала может быть меньше, чем диаметр входного зрачка, не приводя к виньетированию. Важна высокая технологичность и низкая стоимость телескопа. Все поверхности оптических элементов имеют сферическую форму, и в качестве материала для всех апертурных элементов выбрано недорогое стекло К8. В 2020 г. были проведены переговоры с АО ЛЗОС о возможности изготовления крупногабаритных линз для 1 м телескопа. Помимо линии БРИКС рассматриваются

другие пути финансирования проекта, наиболее перспективным из которых видится программа «Млечный Путь» ГК Роскосмос.

Продолжены работы по перспективному проекту СОДА (Система обнаружения дневных астероидов) для обнаружения декаметровых (и более крупных) астероидов, приходящих с дневного неба (типа Челябинского тела). Один или два космических аппарата (КА) будут размещены в окрестности точки либрации  $L_1$  (в системе Земля-Солнце) на расстоянии около 1.5 млн км от Земли. Главные инструменты проекта СОДА — широкоугольные телескопы апертурой ~30 см, способные каждые несколько минут осматривать конусный барьер вокруг Земли с прониканием до  $17^m$  и обеспечивать точность угловых измерений лучше  $0.5''$ . Телескопы могут работать как в режиме сканирования, так и в режиме сопровождения объекта (см. также раздел «Космические проекты»).

В 2020 г. проведены работы по определению оптической схемы широкоугольного (поле зрения  $3.75^\circ$ ) телескопа с преапертурным поворотным зеркалом, обеспечивающим область наведения  $50^\circ \times 120^\circ$ . Технология преапертурного зеркала успешно используется в космосе. Время перенаведения составит не более 3 с, время однократного обзора оптического барьера вокруг Земли тремя телескопами составит 3.5 минуты.

В последнее время на рынке появились новые КМОП

Russia does not yet have a network for the systemic detection of PHO. Proposals for the creation of such a network are being developed, in particular, within the framework of the international project of the BRICS countries (BRICS-OTN project). INASAN has developed a design shape for a promising wide-angle telescope with an aperture of 1 m to deploy a global network of several telescopes for nocturnal monitoring of the entire available sky from both hemispheres.

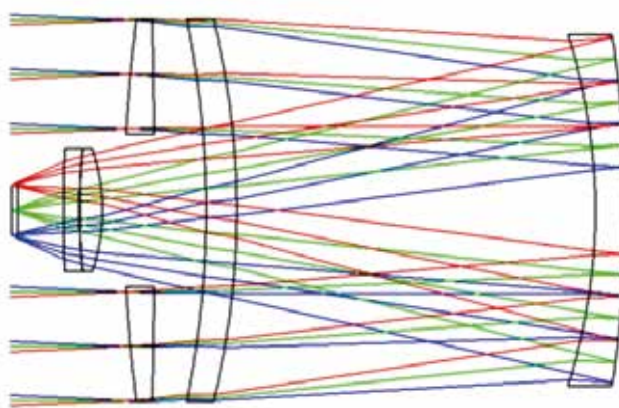
Two versions of optical systems with an aperture of 1 m and an F-ratio of 1:1.5 and 1:1.3, as well as a third version of a telescope with an aperture of 80 cm and a wide field of view, have been developed. The optical scheme of the 1-m telescope is based on the Sonnefeld design and consists of a two-lens full-aperture lens corrector, a Mangin mirror, and a two-lens corrector near the focal plane. Unlike Schmidt cameras, the primary mirror can be smaller than an entrance pupil without causing vignetting. High technological level and low cost of the telescope are also important. All surfaces of the optical elements have spherical shapes, and inexpensive K8 glass was chosen as a material for all the aperture elements. In 2020, negotiations were held with Lytkarino Optical Glass Plant on the possibility of manufacturing large lenses for the 1 m telescope. Aside from the BRICS line, other ways of funding the project

are being considered, the most promising is the Milky Way program of the State Corporation Roscosmos.

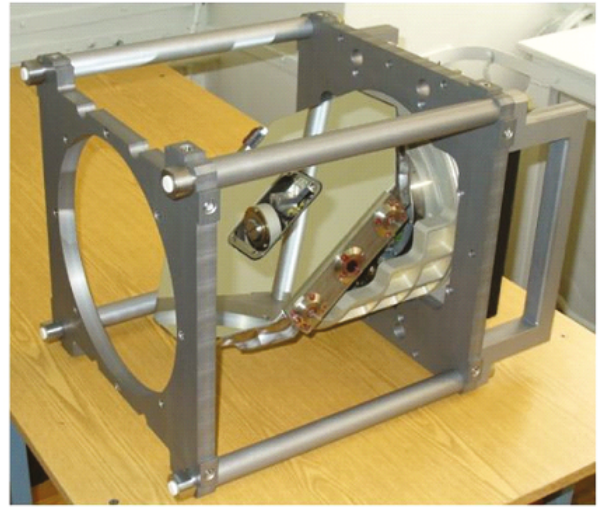
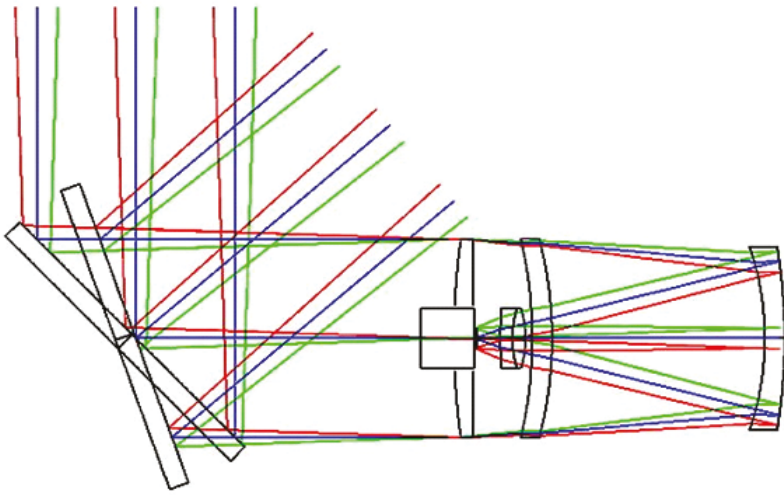
Works on a prospective SODA project, aimed to detect decameter (and larger) asteroids approaching from the daytime sky (same as the Chelyabinsk body) are continued. One or two spacecrafts (SC) will be located in the vicinity of the libration point  $L_1$  (in the Earth-Sun system) at a distance of about 1.5 million km from the Earth. The main instruments of SODA are wide-angle telescopes with an aperture of ~30 cm, capable of inspecting the conical barrier around the Earth every few minutes with a penetration of up to  $17^m$  and providing an accuracy of angular measurements better than  $0.5''$ . Telescopes can operate in both scanning mode and tracking the object (see also "Space Projects" section).

In 2020, the works were carried out on determination of the optical layout of a wide-angle (field of view  $3.75^\circ$ ) telescope with a pre-aperture rotating mirror providing a targeting area of  $50^\circ \times 120^\circ$ . The pre-aperture mirror technology has been successfully used in space. The re-pointing time will not exceed 3 s, and the duration of a single survey of the optical barrier around the Earth by three telescopes will be 3.5 minutes.

Recently, modern CMOS detectors with a small pixel (about  $5 \mu m$ ) with sufficient dynamic range and quantum efficiency have appeared on the market. The use of new CMOS detectors with a small pixel will allow us to reduce the dimensions of the



Модифицированная оптическая схема широкоугольного 1 м телескопа / Modified optical scheme of a wide-angle 1m telescope



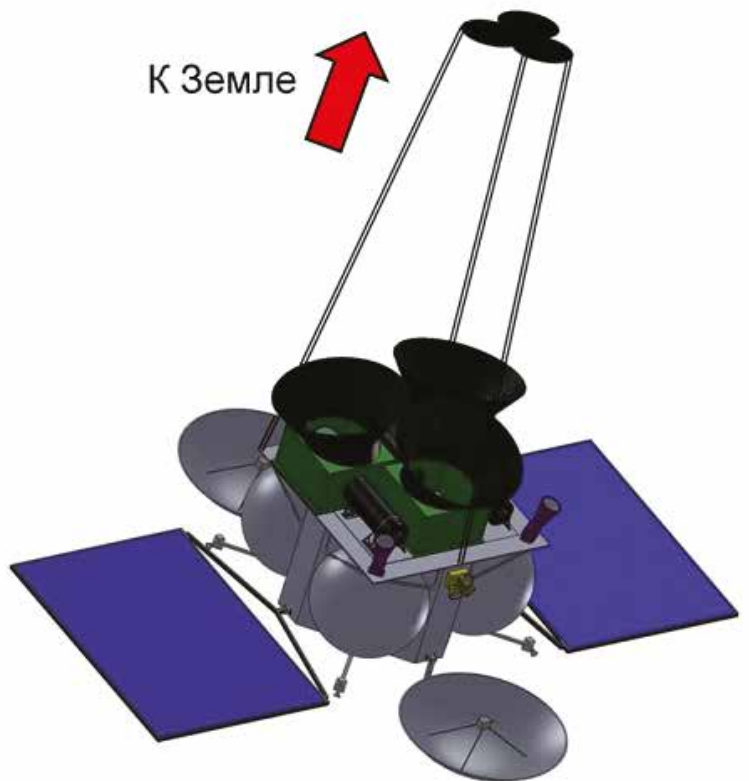
Вариант оптической схемы телескопа с преапертурным зеркалом перенаведения телескопа для проекта СОДА (слева), двухкоординатное оптико-механическое сканирующее устройство БСКР-Т на КА Электро-Л (справа) / *Left: a variant of a telescope optical scheme with a pre-aperture re-pointing mirror for the SODA project. Right: two coordinate opto-mechanic scanning device BSKR-T on Electro-L spacecraft*

детекторы с мелким пикселем (около 5 мкм), обладающие достаточным динамическим диапазоном и квантовым выходом. Использование новых КМОП детекторов с мелким пикселем позволит уменьшить габариты оптического узла системы СОДА. Например, может быть использован современный КМОП GSPRINT4521 с фоточувствительной областью 23×18.4 мм, диагональю 29.5 мм.

optical unit of the SODA system. For example, a modern CMOS GSPRINT4521 with a 23×18.4 mm photosensitive area, and diagonal of 29.5 mm can be used.

**Основные публикации / Main publications**

- D. Buckley, ... B. Shustov et al., An. Acad. Bras. Ciênc., 93, id.e20200917 (2021)
- A.S. Shugarov, V.E. Shmagin, M.A. Nalivkin, INASAN Science Reports, 5, 230 (2020)
- A. Shugarov, B. Shustov, S. Naroenkov, Open Astronomy, 27, 132 (2018)



Концептуальный вид КА СОДА с тремя телескопами / *A schematic view of a SODA spacecraft with three telescopes*



## ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ОБ АСТЕРОИДАХ И КОМЕТАХ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ OBTAINING NEW OBSERVATIONAL DATA ON NEAR-EARTH ASTEROIDS AND COMETS

Поскольку основой наших знаний о свойствах астероидов являются наблюдения, в ИНАСАН особое внимание уделяется наблюдению астероидов, в особенности астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). На обсерваториях ИНАСАН (совместно с сотрудниками ГАИШ МГУ) проводятся как позиционные (астрометрические) наблюдения, так и фотометрические (спектрофотометрические) наблюдения, позволяющие изучать состав и другие свойства астероидов. На рис. внизу представлены результаты обработки наблюдательных данных пяти АСЗ и пяти других астероидов, полученных в период 2013–2017 гг. на 2-м телескопе Терскольской обсерватории ИНАСАН с ПЗС-спектрографом низкого разрешения ( $R \sim 100$ ) в диапазоне 0.35–0.95 мкм.

ИНАСАН участвует в работе Международной сети предупреждения об опасных астероидах (IAWN). В 2019 г. подведены итоги успешной международной кампании по наблюдениям астероида 2012 TC4.

Since most of the things we know on the properties of asteroids we get from observations, INASAN pays special attention to the observation of them, especially the near-Earth ones (NEA). Both positional (astrometric) and photometric (spectrophotometric) observations are being carried out at the INASAN observatories (in collaboration with the SAI MSU researchers), allowing investigations on the composition and other properties of asteroids.

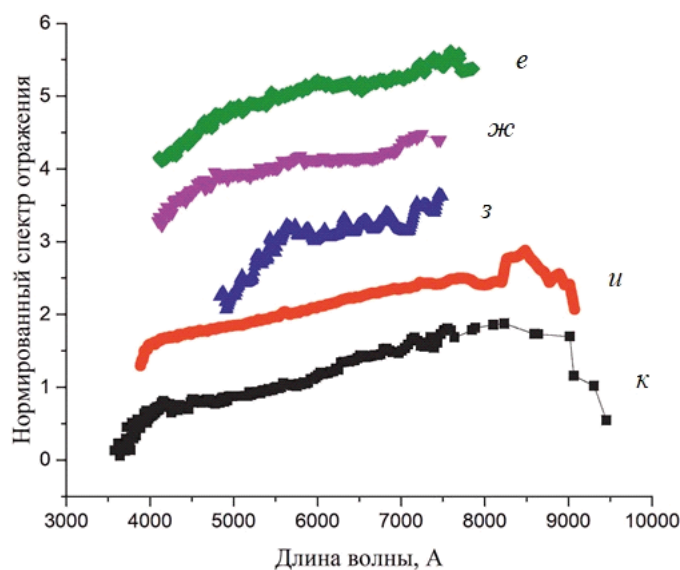
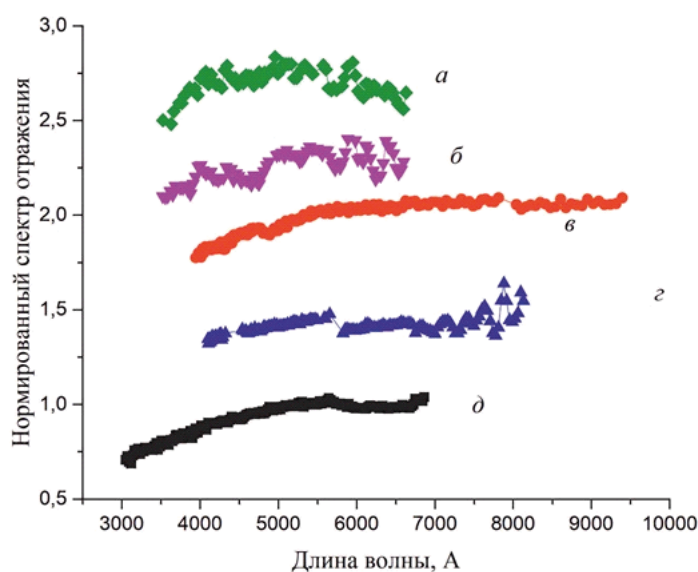
In a diagram below the results of processing observational data are presented from five NEAs and five other asteroids obtained in 2013–2017 at the 2-m telescope of the INASAN Terskol Observatory with a low-resolution CCD spectrograph ( $R \sim 100$ ) in the range 0.35–0.95  $\mu\text{m}$ .

INASAN participates in the International Asteroid Warning Network (IAWN). In 2019, the results of the successful international campaign for observations of the 2012 TC4 asteroid were summed up.

### Основные публикации / Main publications

M.P. Shcherbina, V.V. Busarev, S.I. Barabanov, Moscow University Physics Bulletin, No. 6, 93 (2019)

V. Reddy, M. Kelly, D. Farnocchia, ... B. Shustov et al., Icarus, 326, 133 (2019)

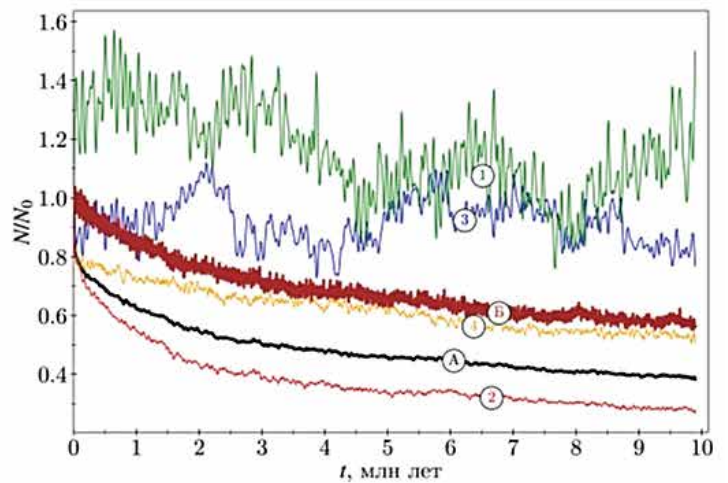
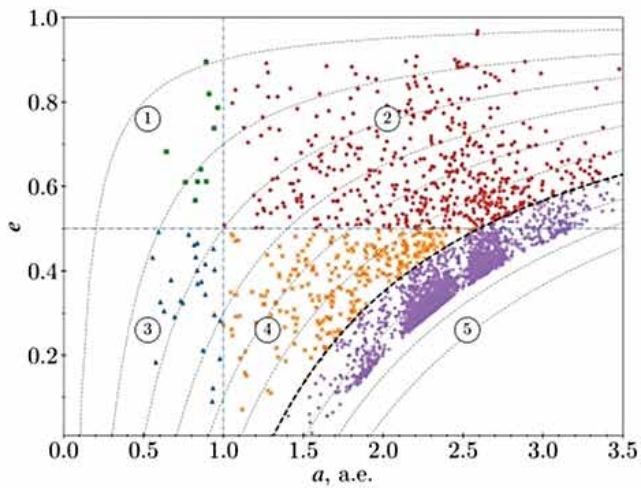


Нормированные спектры отражения астероидов **4450 Пан** (а), **2010 TN54** (б), **345 Терцидина** (в), **381 Мирра** (г), **712 Боливиана** (д), **20826** (е), **93768** (ж), **162385** (з), **482 Петрина** (и) и **863 Бенкоэла** (к). Названия АСЗ выделены жирным шрифтом / Normalized reflection spectra for asteroids **4450 Pan** (a), **2010 TN54** (b), **345 Tercidina** (v), **381 Myrrha** (g), **712 Boliviana** (d), **20826** (e), **93768** (zh), **162385** (z), **482 Petrina** (i) and **863 Benkoela** (k). Names of near-Earth asteroids are set in bold

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ АСЗ STUDYING MOTION OF NEAR-EARTH ASTEROIDS

Одна из важных особенностей динамической эволюции населения АСЗ состоит в том, что численность населения АСЗ на протяжении последних 2–3 миллиардов лет оставалась почти неизменной, хотя динамическая шкала существования текущего населения АСЗ относительно коротка. Вытянутые орбиты АСЗ подвержены сильным возмущениям от планет и на этой шкале времени они либо выбрасываются из Солнечной системы, либо падают на Солнце и планеты. Согласно работам других авторов оценка характерного времени истощения (уменьшения численности текущего населения АСЗ в 2 раза)  $t_{\text{NEA}}$  составляет от 2 до 10 млн лет, т.е.  $t_{\text{NEA}}$  оценива-

One of the important features of the dynamic evolution of the NEA population is that the NEA population has remained almost unchanged over the past 2–3 billion years, although the dynamic scale of existence of the current NEA population is relatively short. The elongated orbits of the NEA are subject to strong perturbations from the planets and on this time scale they are either ejected from the Solar System or fall on the Sun and planets. According to the works of other authors, the estimate of the characteristic depletion time (decrease in the size of the current population of the NEA by a factor of 2)  $t_{\text{NEA}}$  varies from 2 to 10 million years, i.e.  $t_{\text{NEA}}$  was estimated only



Слева: Распределение ансамбля астероидов на диаграмме “ $a - e$ ” в начальный момент времени. Штриховая жирная линия отмечает границу области АСЗ. Пунктирные линии соответствуют значениям  $q$  от 0.1 а.е. до 1.9 а.е. с шагом 0.2 а.е. Справа: Изменение относительного числа АСЗ в процессе эволюции. Линия “А” показывает изменение относительного числа астероидов в модели, содержащей только АСЗ, линия “Б” — в модели, содержащей всю изначальную выборку / Left: Distribution of the asteroid ensemble in the “ $a - e$ ” diagram at the initial moment of time. The bold dashed line marks the border of the NEA area. The dotted lines correspond to  $q$  values from 0.1 to 1.9 AU with a step of 0.2 AU. Right: Evolutionary changes in the relative number of NEAs. Line “A” shows the change in the relative number of asteroids in the model containing only NEA, line “B” — in the model containing the entire original sample

лось лишь приближено. Однако значение  $t_{\text{NEA}}$  необходимо знать точнее, чтобы можно было количественно оценивать адекватность различных механизмов пополнения населения АСЗ. Поэтому с помощью численной динамической модели эволюции населения АСЗ было проведено исследование динамики (темпа убыли) населения АСЗ и показано, что характерное время истощения составляет 3.5 млн лет. Для исследования были отобраны 3024 реальных астероида размером более 1 км с перигелийным расстоянием  $q < 1.6$  а.е., из них 833 АСЗ ( $q < 1.3$  а.е.), т.е. практически все крупные АСЗ. Главной особенностью нашей работы является то, что в ней впервые исследована зависимость от начальных значений параметров орбиты: большой полуоси  $a$  и эксцентриситета  $e$ . Показано, что эта зависимость весьма сильная: для подмножества астероидов с большими  $a$  и  $e$   $t_{\text{NEA}}$  в десятки раз меньше, чем у подмножества с малыми  $a$  и  $e$ . Полученные оценки зависимости важны для количественного анализа адекватности различных моделей механизмов пополнения населения АСЗ.

roughly. However, the  $t_{\text{NEA}}$  value needs to be known more precisely in order to be able to quantify the adequacy of various mechanisms of population replenishment in the NEA. Therefore, using a numerical dynamic model of the evolution of the NEA population, a study of the dynamics (rate of decline) of the NEA population was carried out and it was shown that the characteristic time of depletion is 3.5 Myr. The 3024 real asteroids were selected for the study with the sizes of more than 1 km and perihelion distances of  $q < 1.6$  AU. There were 833 NEAs ( $q < 1.3$  AU) in the selecton, almost all of them are large NEAs. The main feature of our work is that it was the first to investigate the dependence on the initial values of the orbital parameters: semi-major axis  $a$  and eccentricity  $e$ . This dependence was proved to be very strong: for the subset of asteroids with large  $a$  and  $e$ ,  $t_{\text{NEA}}$  is several tens smaller than for the subset with small  $a$  and  $e$ . The obtained estimates of dependence are important for quantitatively analysis of the adequacy of various models of mechanisms for replenishing the NEA population.

### Основные публикации / Main publications

R.V. Zolotarev, V.M. Shustov, Astron. Rep., 65, 518 (2021)

## СВЯЗЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗВЕЗДНОМ НАСЕЛЕНИИ ГАЛАКТИКИ И ИСТОРИИ БОМБАРДИРОВКИ ЗЕМЛИ МАЛЫМИ ТЕЛАМИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ RELATION BETWEEN DYNAMICAL PROCESSES IN THE STELLAR POPULATION OF THE GALAXY AND HISTORY OF EARTH BOMBARDMENT BY MINOR BODIES OF THE SOLAR SYSTEM

Неизбежные сближения звезд и звездных скоплений с Солнечной системой до критических расстояний оказывали и будут оказывать существенное воздействие на динамику тел в облаке Оорта, вызывая, в частности, появление новых долгопериодических комет. Считается, что очень тесные сближения могли вызвать т. н. кометные ливни, т. е. резкое увеличение темпа выпадения комет на Землю. Частоту таких сближений нужно учитывать, в частности, в анализе проблемы АКО.

В ИНАСАН на основе стохастического моделирования движений звезд и скоплений в окрестности Солнечной системы получена оценка зависимости частоты сближений со звездами от «прицельного расстояния»  $d_{\text{min}}$  до Солнца. Эту

The inevitable close encounters of stars and star clusters to the Solar System up to critical distances has had and will have a significant impact on the dynamics of bodies in the Oort cloud, causing, in particular, the appearance of new long-period comets. It is believed that very close encounters could cause the so-called comet showers, that is, a sharp increase in the rate of comets falling on the Earth. The frequency of such encounters should be taken into account, in particular, in the analysis of the PHO problem.

On the basis of stochastic modeling of the motions of stars and clusters in the vicinity of the Solar System, researchers of INASAN estimated the dependence of the frequency of



зависимость можно использовать, например, для оценки частоты сближений Солнечной системы со звездами на критическое расстояние (0.5 пк, т. е. размер внешнего Облака Оорта). Вывод — критические сближения происходят несколько раз в течение миллиона лет.

#### Основные публикации / Main publications

B.M. Shustov, S.V. Vereshchagin, M.D. Sizova, INASAN Science Reports, 5, 89 (2020)

encounters with stars on the impact distance  $d_{\min}$  to the Sun. This dependence can be used, for example, to estimate the frequency of approaches of the Solar System with stars at a critical distance (0.5 pc, i.e., the size of the outer Oort Cloud). The conclusion is that critical encounters occur several times over a million years.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОТКЛОНЕНИЯ ОПАСНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ ADVANCING METHODS OF DEFLECTION OF HAZARDOUS BODIES

В ИНАСАН изучаются методы отклонения опасного небесного тела (ОНТ) со столкновительной орбиты. Подход условно можно разделить на два типа: кинетический (т.е. использующий передачу импульса телу) и энергетический (т.е. передающий энергию). Чисто кинетический подход при простейшей постановке сводится к решению задачи о (частично) неупругом столкновении ударника и мишени, и при малых скоростях соударения и центральном ударе анализ результатов столкновения весьма прост. Картина существенно усложняется, когда из мишени выбрасывается вещество. На выброс уходит часть энергии ударника. При этом астероиду может передаваться дополнительный импульс. Для оценки этого превышения используется так называемый коэффициент усиления (multiplication factor)  $\beta$ : чем больше  $\beta$ , тем эффективнее воздействие.

Метод пучкового воздействия обычно считают к кинетическому типу, т.е. пучок частиц передает ОНТ свой импульс, и таким образом меняет орбиту этого тела. При этом эффективность такого подхода ограничена запасом импульса ударника. В ИНАСАН разработана идея, предложенная физиками из ИЯФ СО РАН. Идея состоит в том, что часть энергии пучка может тратиться на выброс вещества из мишени. Предлагается использовать зависимость потери энергии частицы от глубины проникновения в вещество. Этот эффект получил название пика Брэгга. Выделение энергии в глубине тела может привести к разрушению и выбросу вышележащих слоев, что означает, что мишень получит импульс в направлении, перпендикулярном облучаемой поверхности, что увеличивает его эффективность.

#### Основные публикации / Main publications

M.D. Sizova, B.M. Shustov, INASAN Science Reports, 4, 349 (2019)

Another area of research in INASAN is studying the methods for deflecting a potentially hazardous objects (PHO) from a collision orbit. The approach can be conditionally divided into two types: kinetic (i.e., using the transfer of momentum to the body) and energetic (i.e., transferring energy). The purely kinetic approach in the simplest formulation is reduced to solving the problem of (partially) inelastic collision of the impactor and the target. At low collision velocities and central impact, the analysis of the collision results is very simple. The picture becomes much more complicated when the material is ejected from the target. Part of the impactor's energy is spent on the ejection. In this case, an additional impulse can be transferred to the asteroid. To estimate this excess, the so-called multiplication factor  $\beta$  is used: the greater  $\beta$  is, the more effective is the impact.

The beam impact method is usually considered to be of the kinetic type, i.e. the particle beam transfers its momentum to the PHO, and thus changes the orbit of this body. Moreover, the effectiveness of this approach is limited by the impulse reserve of the impactor. An idea proposed by physicists from the INP SB RAS was developed at INASAN. The idea is that part of the beam energy can be spent on ejecting matter from the target. It is proposed to use the dependence of the particle energy loss on the depth of penetration into the material. This effect is called the Bragg peak. The release of energy deep in the body can lead to the destruction and ejection of the overlying layers, which means that the target will receive an impulse in the direction perpendicular to the irradiated surface, which increases its effectiveness.

## НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА OBSERVATIONS AND MODELS OF SPACE DEBRIS MOTION

Проблема космического мусора пока еще далека от решения. Мы находимся на стадии ее интенсивного изучения, и роль науки здесь особенно значительна. Можно выделить три основные аспекта проблемы:

- Обнаружение и мониторинг объектов КМ
- Оценка рисков
- Разработка методов предотвращения засорения и очистки околоземного космического пространства

В России первая проблема решается в основном средствами Роскосмоса и партнерских организаций. Однако эти серийные средства (фактически служба) не могут тратить время на детальное изучение отдельных, но важных аспектов. Здесь существенное значение имеет помощь со стороны науки. Проиллюстрируем некоторые уникальные возможности научных центров на примере ИНАСАН.

В связи с бурным ростом интереса к использованию мало-размерных КА все большее внимание уделяется сложной и

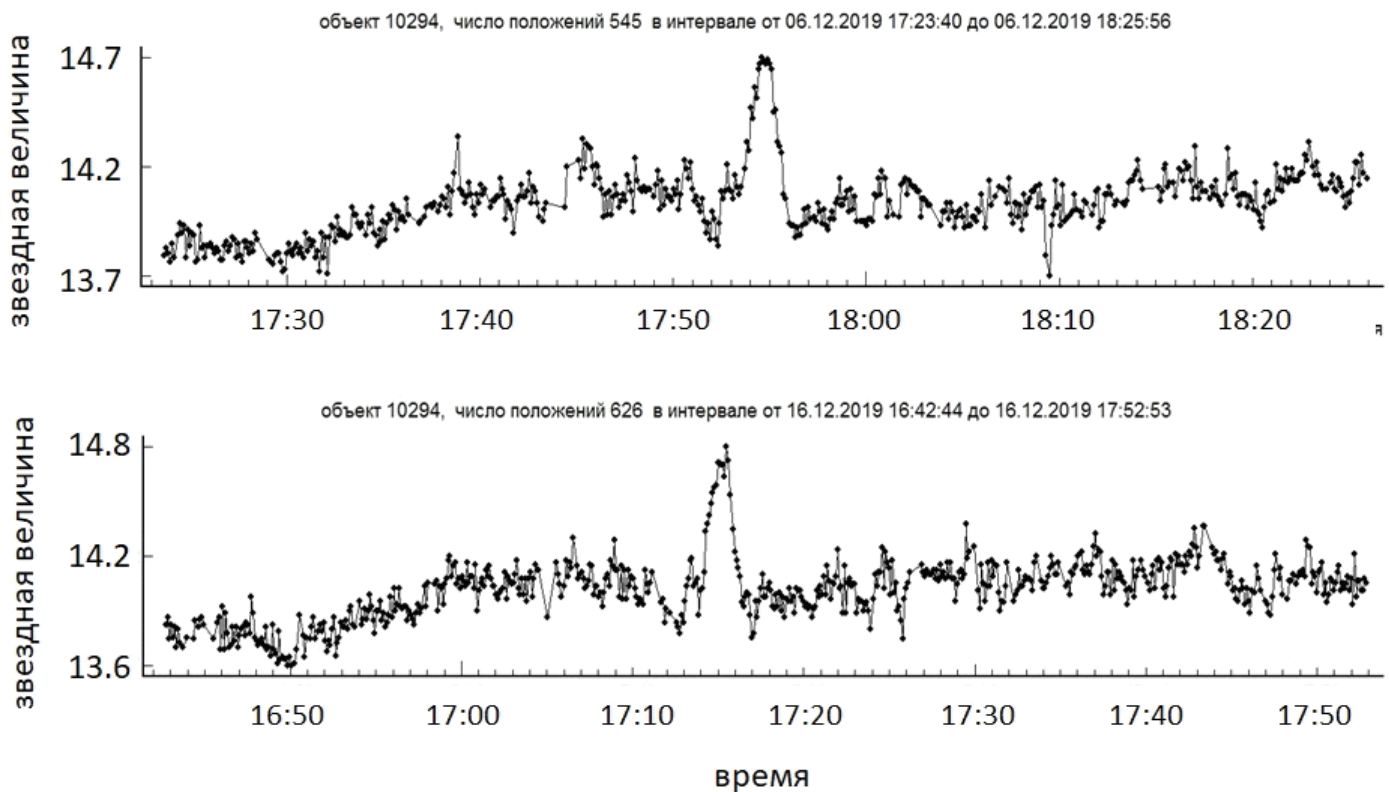
The problem of space debris (SD) is still far from solution. Currently we are at the stage of intensive study of that problem. The role of science is especially significant here. There are three main aspects of the problem:

- Detection and monitoring of SD objects
- Risk assessment
- Development of methods for removal of SD and preventing further contamination of near-Earth space

In Russia, the first problem in the list is being solved mainly by means of Roscosmos and partner organizations.

However, these industrial tools (actually, a service) are not able to spend enough time on a detailed study of specific, but important aspects. So assistance of science is essential here. Let us illustrate some of the unique capabilities of research centers, using INASAN as an example.

Due to the rapid growth of interest in the use of small-sized spacecrafts, attention to the complex and still unresolved



Кривые блеска объекта «Сирио-1» / *Light curves of Sirio-1 object*

пока нерешенной задаче обнаружения и мониторинга сверхмалоразмерных объектов (менее 5 см на низких орбитах и менее 10 см в области геосинхронных орбит — ГСО). В 2020 г. сотрудники ИНАСАН (Н.С.Бахтигараев, П.А.Левкина) продемонстрировали, что для наблюдений на ГСО таких объектов, эффективны крупные астрономические телескопы. На обсерватории на пике Терскол при помощи 2-м телескопа Цейсс-2000 24 сентября 2020 г. впервые был обнаружен и наблюдался в течение двух ночей на геостационарной орбите фрагмент космического мусора 20-й звездной величины (размер менее 10 см). В динамической базе космических объектов ИПМ им. М.В. Келдыша объект каталогизирован под номером 71113. Интересно, что этот фрагмент космического мусора имеет большое отношение площадь/масса 3.38 м<sup>2</sup>/кг. Таким образом, продемонстрированы потенциальные, но пока малоиспользуемые, возможности крупных российских астрономических телескопов для решения важной проблемы, имеющей как научное, так и прикладное значение.

Эти же ученые обнаружили ранее не отмечавшееся необычное поведение некоторых КА. Например, у итальянского экспериментального спутника связи «Сирио-1», запущенного на ГСО в 1977 г и давно отработавшего свой срок, обнаружено характерное изменение блеска с периодом, равным 24 часам звёздного времени. На рисунке вверху приводятся кривые блеска «Сирио-1» вблизи верхней кульминации, полученные 6 и 12 декабря 2019 г. в Терскольской обсерватории в фильтре R. Впервые у этого объекта КМ обнаружено характерное изменение блеска одинаковой амплитуды, одинаковой продолжительности, одинаковой формы с периодом, равным звёздным суткам. В сентябре 2020 г. такие же характерные изменения блеска повторялись на том же участке орбиты. Причины такого странного поведения «мертвого» объекта пока не выяснены.

problem of detecting and monitoring ultra-small-sized objects (less than 5 cm in low orbits and less than 10 cm in the region of geosynchronous orbits — GSO) keeps increasing. In 2020, researchers of INASAN (N.S. Bakhtigaraev, P.A. Levkina) proved that for observing such objects in the GSO larger astrophysical telescopes are effective.

On September 24, 2020 at the Terskol Observatory, a fragment of space debris in geostationary orbit was first discovered and observed for two nights in geostationary orbit using the 2-m Zeiss-2000 telescope. The object was of the 20th magnitude with the size less than 10 cm. In the dynamic database of space objects of the Keldysh Institute of Applied Mathematics, the object is cataloged under the number 71113. Interestingly, this fragment of space debris has a high area-to-mass ratio of 3.38 m<sup>2</sup>/kg. Thus, the potential, but so far underutilized capabilities of large Russian astronomical telescopes for solving this important problem of both scientific and applied significance are demonstrated.

These researchers have discovered previously undetected unusual behavior of some spacecrafts. For example, the Italian experimental communications satellite “Sirio-1”, launched at the GSO in 1977 and long past its service life, has a characteristic change in brightness with a period equal to 24 hours of sidereal time. A diagram above shows the light curves of “Sirio-1” near the upper culmination obtained on December 6 and 12, 2019 at the Terskol Observatory in the R filter. For the first time, a characteristic change in brightness of the same amplitude, the same duration, and the same shape with a period equal to a sidereal day was found in this SD object. In September 2020, the same characteristic brightness variations were repeated in the same part of the orbit. The reasons for this strange behavior of the “dead” object have not yet been clarified.

#### Основные публикации / *Main publications*

Н.С.. Бахтигараев, П.А. Левкина, В.В. Чазов, Сб. трудов Всероссийской конференции с международным участием «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы». / Под ред. Л. М. Зеленого, Б. М. Шустова. М.: ИКИ РАН, с. 139 (2019)  
G.I. Kokhirova, N.S. Bakhtigaraev, P.A. Levkina, V.V. Chazov, U.Kh. Khamroev, INASAN Science Reports, 5, 282 (2020)



# КОСМИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ



# SPACE PROJECTS



Фундаментальные космические исследования являются не только важным направлением исследований, но и «визитной карточкой» ИНАСАН. Институт занимается разработкой наблюдательных инструментов космического базирования — крупной многоцелевой обсерватории «Спектр-УФ» для наблюдений в ультрафиолетовом диапазоне, а также поисковых телескопов для наблюдения астрономических объектов как в ближнем, так и в дальнем космосе.

Советские ученые и специалисты по космической технике добились значительных успехов во внеатмосферных наблюдениях благодаря созданию космической обсерватории «Астрон» (рук. акад. А.А. Боярчук, главный конструктор А.А. Моисеев, головная организация НПО им. С.А. Лавочкина, ныне АО «НПО Лавочкина»). С помощью этой обсерватории (1983–1989 гг.), на борту которой был установлен телескоп «Спика» апертурой 80 см, был получен ряд важных результатов. В частности, удалось пронаблюдать комету Галлея в 1985–1986 гг. и вспышку сверхновой SN1987A в Большом Магеллановом Облаке в конце февраля 1987 г.

Успех обсерватории «Астрон» вдохновил отечественных ученых и специалистов на создание другой крупной обсерватории, сравнимой по возможностям с обсерваторией им. Хаббла. Проект получил название «Спектр-УФ» и стал одним из проектов российской серии «Спектр» наряду с проектами «Спектр-Р» (запущен в 2011 г., завершил работу в 2019 г.) и «Спектр-РГ» (запущен в 2019 г. и уже дает уникальные результаты).

Целью проекта «Спектр-УФ» является создание космической обсерватории, предназначенной для проведения наблюдений в вакуумном и ближнем УФ-диапазонах электромагнитного спектра (115–310 нм). Как в российском, так и в мировом астрономическом сообществе проект «Спектр-УФ» известен также под названием «Всемирная космическая

Fundamental space research is not just an important research direction, but also a notable feature of INASAN. The Institute is engaged in the development of space-based observational instruments — a large multipurpose observatory “WSO-UV” for observations in the ultraviolet range, as well as search telescopes for observing astronomical objects in both near and deep space.

Soviet scientists and specialists in space technology achieved significant success in extra-atmospheric observations thanks to the creation of the “ASTRON” space observatory (headed by Academician A. A. Boyarchuk, Chief constructor A.A. Moisheev, the lead organization “NPO Lavochkin”). The Spica telescope with an aperture of 80 cm, which was installed on the board of this observatory, allowed obtaining a number of important results in 1983–1989. In particular, observations of Halley's comet in 1985–1986 and the SN1987A supernova in the Large Magellanic Cloud at the end of February 1987 were carried out.

Successes of ASTRON inspired Russian scientists and specialists to create another large observatory, comparable in capabilities to the Hubble Space Telescope. The project was named “Spektr-UF”. It became one of the projects of the Russian “Spektr” series along with the projects “Spektr-R” (launched in 2011, operations ended in 2019) and “Spektr-RG” (launched in 2019 and is already yielding unique results).

The goal of the Spektr-UF project is to create a space observatory designed to carry out observations in the vacuum and near-UV ranges of the electromagnetic spectrum (115–310 nm). Both in Russian and in international astronomical community, the Spektr-UF project is also known as World Space Observatory – Ultraviolet (WSO-UV). Its main purpose is to provide a detailed study of astronomical objects by means of UV spectroscopy and to obtain high-quality



обсерватория – ультрафиолет» (WSO-UV, World Space Observatory – Ultraviolet). Ее основное назначение — детальное исследование астрономических объектов методами УФ-спектроскопии и построения высококачественных изображений на сравнительно малом поле зрения (до 10 угловых минут). Головной организацией по космическому комплексу «Спектр-УФ» в целом является АО «НПО Лавочкина», головной научной организацией — ИНАСАН. Работы над проектом ведутся в большой кооперации, помимо АО «НПО Лавочкина» и ИНАСАН включающей ИКИ РАН, ФИАН, САО РАН, Лыткаринский завод оптического стекла, предприятия госкорпораций «Росатом» и Роскосмос и ряд других организаций. В проекте принимает участие Испания: по соглашению с Роскосмосом испанские коллеги поставляют приемники излучения для камер поля и участвуют в работах по созданию наземного научного комплекса. Заявку на участие в проекте сделала Япония, получено официальное письмо о намерениях от космического агентства Японии JAXA.

С помощью приборов проекта «Спектр-УФ» астрономы будут получать спектры слабых источников и строить изображения в УФ. Перед проектом поставлены амбициозные задачи достижения высокого спектрального разрешения (~55 000), очень высокого углового разрешения (лучше 0.1 угловой секунды), а для изучения слабых источников — высокой проникающей способности. В период 2025–2030 гг. это будет единственный и поэтому крайне востребованный крупный УФ-телескоп. Согласно планам зарубежных космических агентств, следующие крупные УФ-телескопы будут запущены не ранее начала 2030-х гг.

Обсерватория «Спектр-УФ» многоцелевая. Главные направления научных исследований с КА «Спектр-УФ» таковы: поиск скрытого барионного вещества во Вселенной; исследование энергетичных (в частности, взрывных) процессов в галактиках, звездах и компактных объектах; исследование роли УФ-излучения в происхождении жизни во Вселенной. УФ-спектроскопия весьма перспективна для исследования атмосфер экзопланет. Наблюдения экзопланет и детальное изучение их атмосфер поможет понять процессы формирования планет и их атмосфер и дальнейшую эволюцию этих систем. Научный комитет обсерватории «Спектр-УФ», включающий как российских, так и зарубежных ученых, приступил к формированию программы научных исследований. Запуск, планируемый в 2025 г., стимулирует команду «Спектр-УФ» в ИНАСАН работать интенсивно и ответственно.

*Космический аппарат «Спектр-УФ» / "Spektr-UF" spacecraft*



images in a relatively small field of view (up to 10 arc minutes). The lead organization for the Spektr-UV space complex as a whole is NPO Lavochkina JSC, the principal scientific organization is INASAN. Works on the project require large cooperation, including also IKI RAS, LPI RAS, SAO RAS, Lytkarino Optical Glass Plant, enterprises of the state corporations “Rosatom” and “Roscosmos” and a number of other organizations. A foreign partner of the project is Spain. Under an agreement with Roscosmos, Spanish colleagues are supplying radiation receivers for field cameras and participate in the creation of a ground-based scientific complex. Japan has made a proposal for participation in the project as well: an official letter of intent has been received from the Japanese space agency JAXA.

With the help of instruments of the Spektr-UV project, astronomers will be able to acquire spectra of faint sources and construct images in UV. The project set ambitious tasks to achieve high spectral resolution (~55000), very high angular resolution (better than 0.1 arc seconds), and high penetrating power for the study of weak sources. In 2025–2030, it will be the only and therefore extremely demanded large UV telescope. According to the plans of foreign space agencies, the next large UV telescopes will be launched no earlier than the early 2030s.

The Spektr-UV observatory is multipurpose. The main scientific interests are: the search for hidden baryonic matter in the Universe; study of energetic (in particular, explosive) processes in galaxies, stars and compact objects; study of the role of UV radiation in the origin of life in the Universe. UV spectroscopy is very promising for studying atmospheres of exoplanets. Observations of exoplanets and a detailed study of their atmospheres will help to understand the formation processes of planets and their atmospheres and the further evolution of these systems. The Scientific Committee of the Spektr-UV Observatory, including both Russian and foreign scientists, started to form a research program. The forthcoming launch, scheduled for 2025, encourages the Spektr-UV team at INASAN to work hard, with full devotion and responsibility.

## ПРОЕКТ КИТАЙСКО-РОССИЙСКОГО ТЕЛЕСКОПА, СОБИРАЕМОГО НА ОРБИТЕ (OAST) CHINESE-RUSSIAN ON-ORBIT-ASSEMBLING SPACE TELESCOPE (OAST)

Для исследования слабых источников необходимо строить астрономические телескопы больших диаметров. Сотрудниками ИНАСАН совместно с китайскими коллегами из Чаньчуньского института оптики, точной механики и физики Академии наук Китая разработана концепция

Building large-diameter astronomical telescopes is essential or studies of faint sources. INASAN employees together with Chinese colleagues from the Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, created a concept of OAST (On-orbit Assembling Space

телескопа OAST (On-orbit Assembling Space Telescope) апертурой 10 м для проведения наблюдений в оптическом, УФ и ИК диапазонах. В отличие от традиционных телескопов, OAST будет спроектирован и изготовлен модульно, после чего будет проведена его сборка в космосе. Использование классических технологий ограничивает диаметр космического телескопа несколькими метрами. Кроме того, такие проекты очень дороги. Общий бюджет космического телескопа им. Хаббла с цельным зеркалом диаметром 2.4 м составляет поистине астрономическую сумму в 10 млрд долларов США. Бюджет космического телескопа JWST (James Webb Space Telescope, телескоп имени Джеймса Уэбба) с диаметром главного зеркала 6.5 м будет не меньше, несмотря на использование технологии зеркала, состоящего из сегментов.

В проекте телескопа OAST, собираемого на орбите, предлагается реализовать один из наиболее осуществимых и экономичных методов создания космического телескопа 10-метрового класса. Проблема изготовления большого зеркала решена за счет использования сегментов умеренного размера. Благодаря модульному принципу конструкции, отсутствует необходимость испытания полностью собранного изделия на наземном стенде. Отдельные модули будут испытываться индивидуально на имеющемся оборудовании, что значительно облегчает эту важную задачу. Большая часть модулей OAST может быть заменена, что увеличивает надежность инструмента. Планируется, что проект будет реализован несколькими странами, в первую очередь Китаем и Россией. При таком модульном подходе каждая из стран-участниц может быть ответственна за определенные элементы конструкции, что существенно упрощает взаимодействие между партнерами. Запуск модулей телескопа на орбиту может быть осуществлен несколькими носителями, таким образом размеры и выводимая масса больше не являются непреодолимыми ограничениями.

Научные задачи, решение которых станет возможным с помощью установленных на OAST приборов весьма разнообразны: динамика звезд и газа в окрестностях ядер галактик и черных дыр; абсорбционные линии в спектрах квазаров, ядер активных галактик; туманности и сопутствующие объекты (объекты Хербига-Аро, области ионизованного водорода); спектроскопия межзвездного вещества; протопланетные диски; экзопланеты; авроральные явления в Солнечной системе; звездная активность; лучевые скорости звезд и отождествление новых линий, профили линий звезд со сверхвысоким разрешением и др.

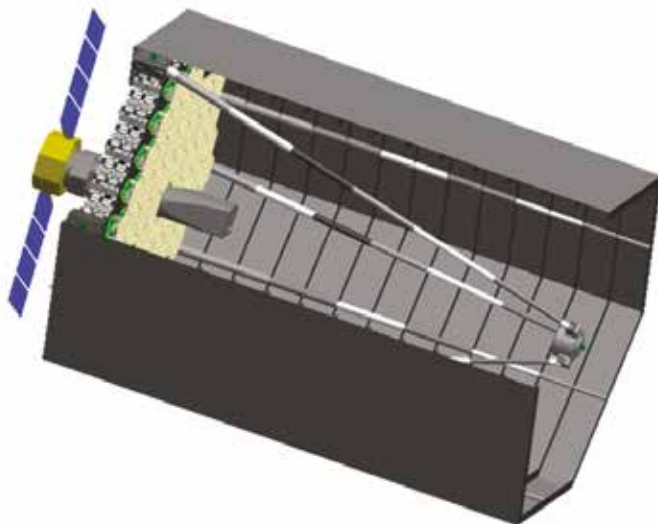
В настоящий момент основные космические агентства мира обсуждают проекты крупных УФ, оптических и ИК миссий следующего поколения на период после 2030 г. OAST, возможно, удастся реализовать ранее. Одной из сложностей проекта является проблема комплектации ИК детекторами большого формата с приемлемыми для астрофизических исследований характеристиками. Мощное развитие китайской промышленности в этом направлении в последние годы позволяет надеяться, что китайско-российский проект будет оснащен самыми современными и эффективными приемниками излучения.

Telescope) with an aperture of 10 m, able to conduct observation in the optical, UV and IR ranges. Unlike traditional telescopes, OAST will be designed and manufactured in a modular fashion, delivered to the orbit in parts and only there assembled. Traditional technology sets its limits on the diameter of the space telescope by few meters. Moreover, such projects are usually very expensive. The total budget of the Hubble Space Telescope with a 2.4 m solid mirror cost a truly astronomical \$10 billion. The budget for the JWST space telescope (James Webb Space Telescope) with a main mirror of 6.5 m will cost no less, despite the use of segment mirror technology.

The OAST project proposes to implement one of the most feasible and cost-effective methods for creating a 10-meter class space telescope. The problem of making a large mirror is solved by using moderately sized segments. Due to the modular design principle, there is no need to test the fully assembled product on a ground bench. Individual modules will be tested individually on existing hardware, making this important task much easier. Most of the OAST modules are replaceable, which increases the reliability of the tool. It is planned that the project will be implemented by several countries, primarily China and Russia. With this modular approach, each of the participating countries can be responsible for certain structural elements, which greatly simplifies the interaction between partners. The launch of the telescope modules into orbit can be carried out by several carriers, so the dimensions and the mass to be launched are no longer insurmountable restrictions.

Scientific tasks, the solution of which will become possible with the help of instruments installed at OAST, are very diverse: dynamics of stars and gas in the vicinity of galactic nuclei and black holes; absorption lines in the spectra of quasars, nuclei of active galaxies; nebulae and related objects (Herbig-Haro objects, ionized hydrogen regions); spectroscopy of interstellar matter; protoplanetary disks; exoplanets; auroral phenomena in the Solar System; stellar activity; radial velocities of stars and identification of new lines, profiles of lines of stars with super-high resolution, etc.

At the moment, the world's major space agencies are discussing projects for large next-generation UV, optical and IR missions for the period after 2030. OAST can be implemented earlier. One of the difficulties of the project is the problem of equipping large-format IR detectors with characteristics acceptable for astrophysical research. Powerful development of Chinese industry in this direction in recent years gives hope that the Chinese-Russian project will be equipped with the most modern and efficient radiation detectors.



*Общий вид телескопа OAST в рабочем состоянии /  
General view of the OAST in working order*



## ПРОЕКТ АСТРОН-2 ASTRON-2 PROJECT

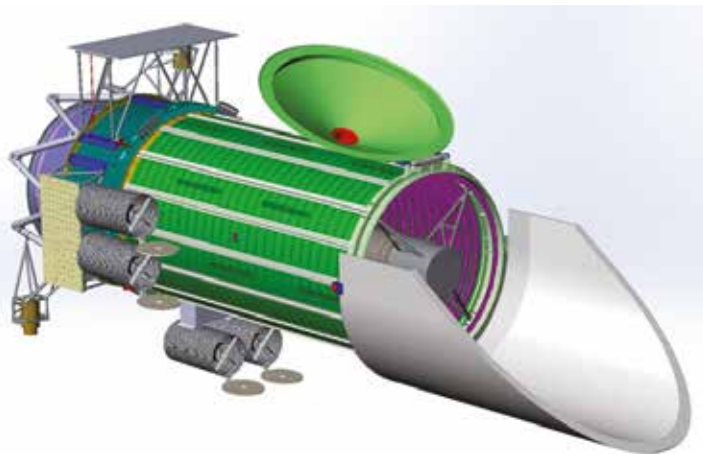
Еще одним из разрабатываемых в ИНАСАН проектов УФ-обсерваторий следующего поколения является миссия «Астрон-2». Проанализировав перспективы УФ-астрономии, сотрудники ИНАСАН пришли к выводу, что будущая УФ-обсерватория должна быть нацелена на решение задач, связанных с использованием УФ-обзоров. «Астрон-2» будет представлять собой космическую астрофизическую обсерваторию для проведения всенебесного спектрального и фотометрического обзора в УФ. Он позволит дать ответы на многие вопросы по истории образования нашей Вселенной, формирования и эволюции галактик и звезд. По своим параметрам космическая обсерватория «Астрон-2» существенно превзойдет космический обзорный УФ-эксперимент GALEX (2003–2013 гг.).

По замыслу разработчиков, проект «Астрон-2» будет продолжением проектов «Астрон» и «Спектр-УФ» и будет основываться на технической базе и стендах, созданных в процессе работы над проектом «Спектр-УФ». К числу основных задач космического комплекса «Астрон-2» относится создание спектральных и фотометрических обзоров всей небесной сферы в ультрафиолетовом диапазоне для нескольких эпох в течение активного времени использования космического аппарата. Основу космической астрофизической обсерватории будет составлять телескоп с диаметром зеркала 210 см. Увеличенное поле зрения телескопа (примерно два угловых градуса) позволит провести полные фотометрические обзоры и глубокие спектральные обзоры всех объектов вплоть до 20<sup>m</sup> с умеренным спектральным разрешением в диапазоне длин волн 120–310 нм. Телескоп GALEX провел первый масштабный фотометрический обзор большей части небесной сферы, но вследствие особенностей приемников излучения ему были недоступны области вокруг звезд ярче 10<sup>m</sup>. В результате область галактической плоскости и Магеллановы Облака оказались практически исключены из исследования. Задачи проведения нового глубокого обзора Вселенной в УФ предстоит решить проекту «Астрон-2», который по аналогии иногда называют супер-GALEX.

Another next-generation UV observatory projects being developed at INASAN is the ASTRON-2 mission. After analyzing the prospects for UV astronomy, INASAN researchers came to the conclusion that the future UV observatory should be aimed at UV survey tasks. ASTRON-2 will be a space astrophysical observatory for carrying out all-sky spectral and photometric surveys in UV. It will answer many questions about the history of the Universe, the formation and evolution of galaxies and stars. Parameters of the ASTRON-2 will significantly surpass GALEX (2003–2013).

As conceived by the developers, the ASTRON-2 project will be a continuation of the ASTRON and Spektr-UF projects and will be based on the technical solutions and test equipment created in the process of developing the Spektr-UF project. One of the main tasks of the ASTRON-2 space complex is the making the spectral and photometric surveys of the entire celestial sphere in the ultraviolet range for several epochs during the life time of the spacecraft. A telescope with a mirror diameter of 210 cm will become the core of the observatory. The enlarged field of view of the telescope (approximately two angular degrees) will make it possible to carry out complete photometric surveys and deep spectral surveys of all objects up to magnitude 20<sup>m</sup> with a moderate spectral resolution in the wavelength range of 120–310 nm. The GALEX telescope conducted the first large-scale photometric survey of most of the celestial sphere, but due to the specific features of the radiation detectors, regions around stars brighter than 10<sup>m</sup> were inaccessible to it. As a result, the region of the galactic plane and the Magellanic Clouds were practically excluded from the study. The tasks of a new deep survey of the Universe

in UV are to be solved by the ASTRON-2 project, which, by analogy, is sometimes called super-GALEX.



*Внешний вид космической миссии «Астрон-2» / Appearance of the space mission "ASTRON-2"*

## ПРОЕКТ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ ЛУННОЙ ПРОГРАММЫ ULTRAVIOLET TELESCOPE PROJECT FOR THE LUNAR PROGRAM

Сотрудниками ИНАСАН прорабатывается проект небольшого телескопа УФ диапазона (120–300 нм) «Луна-УФ» для реализации в рамках лунной программы России. Основная задача научного прибора — проведение обзоров избранных областей небесной сферы в УФ. УФ наблюдения с поверхности Луны (рассматривается также и вариант орбитального телескопа) представляют уникальную возможность проведения исследований со стабильной платформы за пределами земной атмосферы. Для перенаведения телескопа предпола-

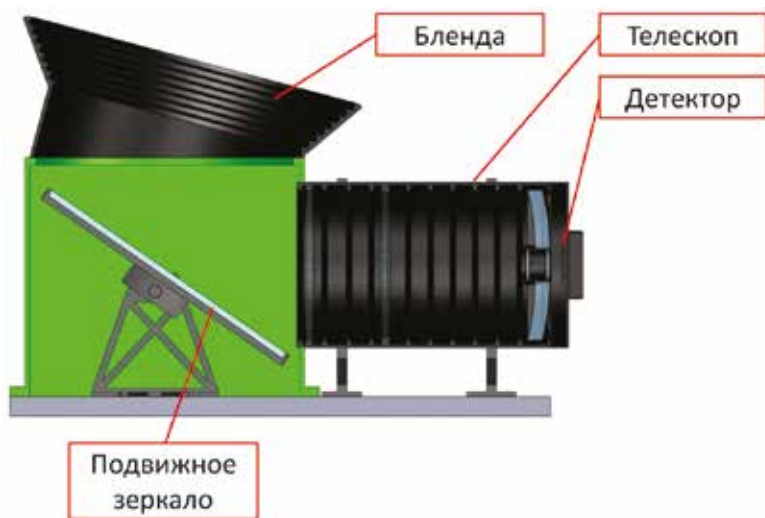
INASAN employees are working on a project of a small telescope in the UV range (120–300 nm) "Luna-UV" for implementation within the framework of the lunar program of Russia. The main task of the scientific instrument is to carry out surveys of selected regions of the celestial sphere in the UV. UV observations from the lunar surface (a variant of an orbiting telescope is also being considered) represent a unique opportunity to conduct research from a stable platform outside the Earth's atmosphere. To re-point the telescope, it is

гаются использовать полноапертурное подвижное зеркало, установленное перед телескопом. Для посадочного модуля зона обзора будет определяться рельефом и широтой места посадки и составит от 40 до 60% небесной сферы, что позволит пронаблюдать, в частности, около половины области, не вошедшей в обзор GALEX. В случае размещения телескопа на орбитальном модуле прецессия восходящего узла орбиты обеспечит обзор всей небесной сферы за половину периода прецессии. В простейшем случае поворотное устройство может иметь одну ось, осуществляющую наведение по углу места, близкому к углу по оси склонений, а наведение по оси прямого восхождения будет осуществляться вращением Луны. Использование современных КМОП детекторов с низким шумом чтения позволит вести съемку относительно короткими экспозициями, не требующими слежения за объектом.

В основе прибора «Луна-УФ» лежит ультрафиолетовый телескоп VT-Луна-УФ, разработанный в ИНАСАН с использованием наработок В.Ю. Теребижа (КрАО РАН). Предлагается использовать полностью готовые технологические решения в части детекторов, широкоугольной оптической системы (см. также далее о проекте СОДА), электронных систем.

proposed to use a full-aperture movable mirror installed in front of the telescope. For the lander, the field of view will be determined by the relief and latitude of the landing site and will cover from 40 to 60% of the celestial sphere, which will allow observing, in particular, about half of the area not included in the GALEX survey. If the telescope is placed on an orbital module, the precession of the ascending node of the orbit will provide an overview of the entire celestial sphere for half the precession period. In the simplest case, the rotary device can have one axis, which provides guidance along an elevation angle close to the angle along the declination axis, and guidance along the right ascension axis will be carried out by the rotation of the Moon. The use of modern CMOS detectors with low read-out noise will allow shooting at relatively short exposures that do not require tracking the object.

The instrument "Luna-UV" is based on the ultraviolet telescope VT-Luna-UV, developed at INASAN using the developments of V.Yu. Terebizh (CrAO RAS). It is proposed to use completely out-of-shelf technological solutions in terms of detectors, wide-angle optical system (see also further on the SODA project), electronic systems



Телескоп VT-Луна-УФ /  
Telescope VT-Luna-UV

## ПРОЕКТ ИНДИЙСКО-РОССИЙСКОГО УФ СПЕКТРОГРАФА ДЛЯ КИТАЙСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ (SING) INDIAN-RUSSIAN UV SPECTROGRAPH PROJECT FOR CHINA SPACE STATION (SING)

Снимки неба в УФ позволяют в деталях отслеживать морфологию протяженных космических объектов. Большие надежды астрономы связывают с блоком камер поля проекта «Спектр-УФ». Однако для полного понимания физических условий (температур, плотностей, полей излучения) в таких объектах требуются также спектральные данные. Большая часть спектроскопических наблюдений УФ-неба сосредотачивается на исследованиях точечных источников, вследствие чего инструменты имеют небольшие поля зрения, а наблюдения протяженных областей требуют большого количества перенаведений космических телескопов и выделения огромного количества наблюдательного времени, что реализовать на практике невозможно. В результате даже для Крабовидной туманности, самого знаменитого остатка взрыва сверхновой, спектральные наблюдения были получены только для некоторых участков. В целом, ни один из реализованных УФ экспериментов не обладал достаточным сочетанием спектрального и пространственного разрешения, чувствительности и продолжительности полета, необходимым для исследования физики туманностей и межзвездной среды (МЗС). Разрабатываемый в ИНАСАН совместно с коллегами из Индийского института

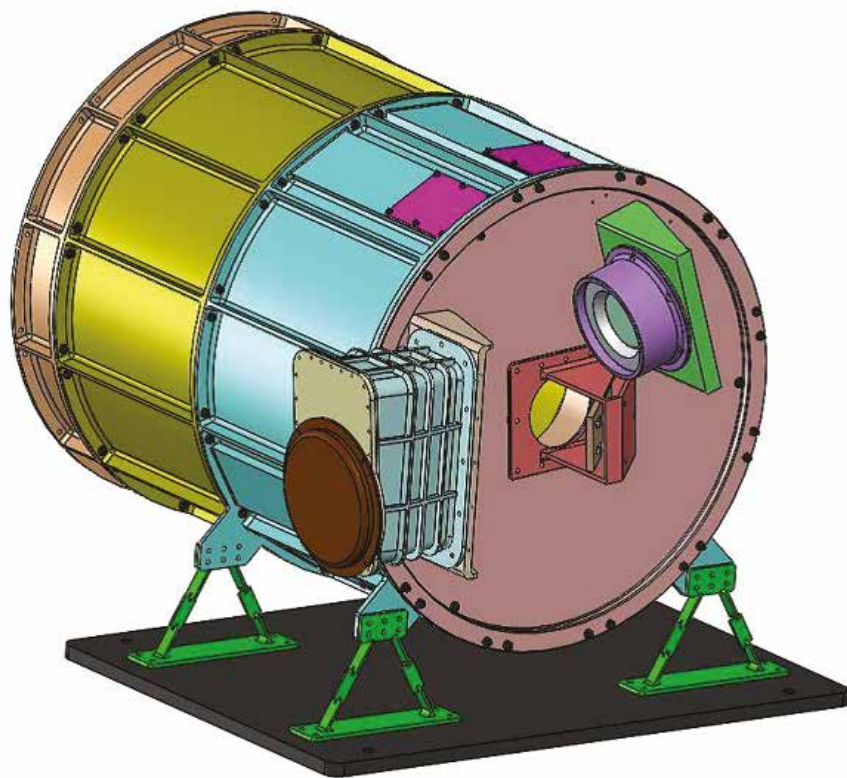
Images of the sky in UV make it possible to trace in detail the morphology of extended space objects. Astronomers put great hopes on the field camera unit of the Spektr-UF project. However, to fully understand the physical conditions (temperatures, densities, radiation fields) in such objects, spectral data are also required. Most of the spectroscopic observations of the UV sky are focused on studies of point sources, as a result of which the instruments have small fields of view, and observations of extended regions require a large number of re-pointing of space telescopes and the allocation of a huge amount of observation time, which is impossible to implement in practice. As a result, even for the Crab Nebula, the most famous remnant of a supernova explosion, spectral observations were obtained only for some areas. On the whole, none of the implemented UV experiments possessed a sufficient combination of spectral and spatial resolution, sensitivity, and flight duration required for studying the physics of nebulae and the interstellar medium (ISM). The SING (Spectroscopic Investigation Of Nebular Gas) instrument for spectroscopic studies of nebular gas, which is being developed at INASAN together with colleagues from the Indian Institute of Astrophysics (Bangalore, India), will fill the existing gap.



астрофизики (Бангалор, Индия) прибор для спектральных исследований газа туманностей SING (Spectroscopic Investigation of Nebular Gas), восполнит существующий пробел.

Проект индийско-российского спектрографа SING был выбран на конкурсной основе и одобрен для установки на Китайской модульной космической станции (CSS) в рамках программы международного сотрудничества по использованию CSS для космических экспериментов управления Организации объединенных наций по вопросам космического пространства (UNOOSA). Космическая станция обеспечивает относительно стабильную платформу для наблюдений в течение длительного периода времени. SING будет установлен как сканирующий телескоп и будет наблюдать небо по мере движения станции по орбите вокруг Земли. Конструкция прибора SING состоит из двух частей: телескопа Кассегрена и спектрографа для работы в диапазоне длин волн 140–270 нм. Фокусное расстояние телескопа составляет 1500 мм, а диаметр главного зеркала 300 мм. Предполагается, что программа наблюдений SING будет скоординирована с научной программой проекта «Спектр-УФ». Спектрограф проекта «Спектр-УФ» имеет лучшее пространственное разрешение, но гораздо меньшее поле зрения, чем SING. Появится возможность проводить детальные исследования интересных областей газовых туманностей с помощью спектрографа «Спектр-УФ», предварительно изученных инструментом SING.

The Indian-Russian SING spectrograph project was selected on a competitive basis and approved for installation on the China Modular Space Station (CSS) under the International Cooperation Program on the Use of CSS for Space Administration Experiments of the United Nations Organization for Outer Space Affairs (UNOOSA). The space station provides a relatively stable observation platform over a long period of time. SING will be installed as a scanning telescope and will observe the sky as the station orbits around the Earth. The construction of the SING instrument consists of two parts: a Cassegrain telescope and a spectrograph for operation in the wavelength range 140–270 nm. The focal length of the telescope is 1500 mm, and the diameter of the main mirror is 300 mm. It is assumed that the SING observing program will be coordinated with the scientific program of the Spektr-UF project. The spectrograph of the Spektr-UF project has a better spatial resolution, but a much smaller field of view than the SING. It will be possible to carry out detailed studies of interesting regions of gaseous nebulae, first studied by SING, using the Spektr-UF spectrograph.



*Внешний вид прибора SING / The SING instrument appearance*

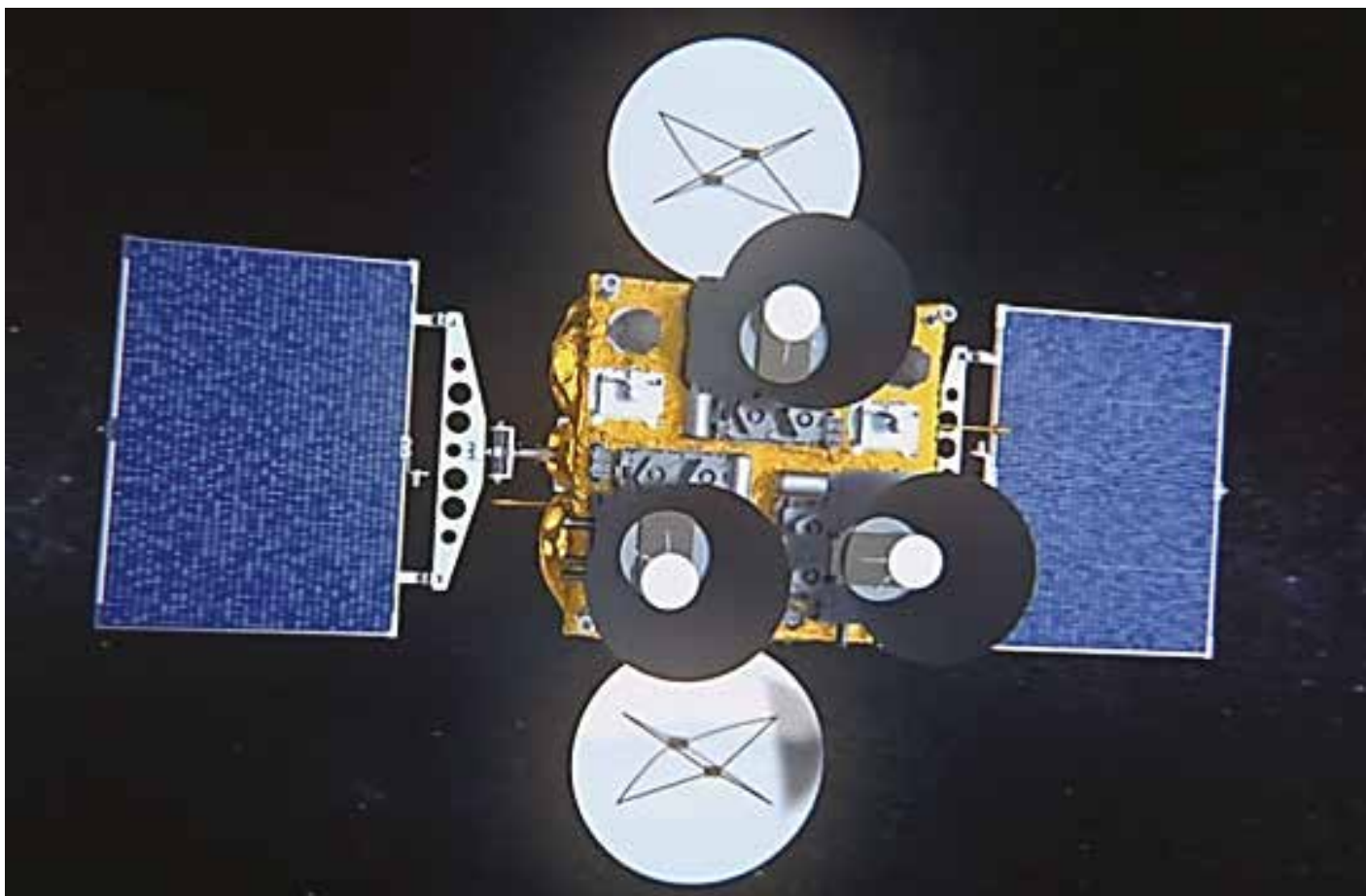
## КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ, ПРИБЛИЖАЮЩИХСЯ К ЗЕМЛЕ С ДНЕВНОГО НЕБА («СОДА») SPACE SYSTEM FOR DETECTION OF HAZARDOUS CELESTIAL BODIES APPROACHING THE EARTH FROM THE SKY (SODA)

В настоящее время, в основном, благодаря выполненной в США программе Space Guard, выявлена большая часть (не менее 90%) малых тел Солнечной системы размером более 1 км, могущих представлять опасность столкновения с Землей. Совсем другая ситуация с перспективами обнаружения более мелких тел размером от 10 м. Задача исчерпывающего обнаружения таких тел на большом расстоянии не будет решена на протяжении как минимум нескольких десятилетий, а может быть и больше. Более реально решить задачу обнаружения таких тел в ближнем космосе и обеспечить выдачу предупреждений о возможных столкновениях со временем упреждения в несколько часов. Количество таких потенциально опасных тел размером 10–20 м и более оцени

At present, mainly thanks to the Space Guard program carried out in the United States, a large part (at least 90%) of small bodies in the Solar System larger than 1 km in size, which could pose a danger of collision with the Earth, have been identified. The situation with the smaller bodies with a size of 10 m is completely different. It will take at least several decades to solve the problem of exhaustive detection of such bodies at a large distance. More realistic approach is to solve the problem of detecting such bodies in near space and ensure the issue of alerts about possible collisions with a lead time of several hours. The number of such potentially dangerous bodies 10–20 m and more in size is estimated at  $10^8$ , and the frequency of their collisions with the Earth is approximately

ваются в  $10^8$ , а частота их столкновений с Землей составляет примерно одно событие в 10–30 лет, а более мелкие тела падают ежегодно. Челябинское событие 15 февраля 2013 г. наглядно показало, что столкновение с Землей достаточно небольшого тела размером около 17 м способно привести к заметным разрушениям. Почти половина таких гостей приходит с дневного неба, на котором наблюдать их в оптическом диапазоне нельзя из-за сильного рассеянного света в атмосфере. Именно для обнаружения таких «дневных» астероидов и предназначен проект СОДА (Система обнаружения дневных астероидов), работа над которым ведется в ИНАСАН. Один или два КА с космическими широкоугольными телескопами апертурой 30 см на борту будут размещены в окрестности точки  $L_1$  (в системе Земля-Солнце) на расстоянии около 1.5 млн км от Земли. Один такой КА будет способен каждые несколько минут осматривать конусный барьер вокруг Земли с прониканием до  $17^m$  и обеспечивать точность угловых измерений лучше  $0.5''$  в режиме сопровождения объекта. В 2020 г. проработана схема телескопа с преапертурным поворотным зеркалом, обеспечивающим область наведения  $50^\circ \times 120^\circ$ . Время перенаведения составит не более 3 с, время однократного обзора оптического барьера вокруг Земли тремя телескопами (именно такая конфигурация показана на рисунке) составит 3.5 минуты.

one event in 10–30 years. Smaller bodies fall annually. The Chelyabinsk event on February 15, 2013 clearly showed that a collision with the Earth of a sufficiently small body about 17 m in size could lead to noticeable destruction. Almost half of these guests come from the daytime sky, where it is impossible to observe them in the optical range due to the strong scattered light in the atmosphere. The detection of such “daytime” asteroids is what the SODA project (Daytime Asteroid Detection System) is devoted to. SODA is currently being developed in INASAN. It will consist of one or two spacecrafts with wide-angle telescopes with a 30 cm aperture on board. The system will be located in the vicinity of point  $L_1$  (in the Earth-Sun system) at a distance of about 1.5 million km from the Earth. One such spacecraft will be able to inspect the conical barrier around the Earth every few minutes with a penetration of up to  $17^m$  and provide an accuracy of angular measurements better than  $0.5''$  in the object tracking mode. The re-pointing time will be no more than 3 s, the time of a single survey of the optical barrier around the Earth by three telescopes will be 3.5 minutes.



*Вариант КА СОДА для обнаружения астероидов, приходящих с дневного неба / Variant of the SODA spacecraft for detecting asteroids coming from the daytime sky*



# СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

<b>Общие сведения / General information</b>	<b>1</b>
Краткая история / Brief history	1
Основные научные направления и структура института / Main scientific activities and structure of the institute	5
Материальная база исследований / Research facilities of the institute	7
Организационная и международная деятельность / Organisational and international activity	10
Звенигородская обсерватория / Zvenigorod Observatory	12
Терскольский филиал / Terskol Observatory	14
Симеизская обсерватория / Simeiz Observatory	16
Кисловодская обсерватория / Kislovodsk Observatory	17
<b>Научные задачи / Scientific Tasks</b>	<b>18</b>
Солнечная система / The Solar System	19
Экзопланеты / Extrasolar Planets	28
Звездные атмосферы / Stellar Atmospheres	37
Нестационарные звезды / Nonstationary Stars	42
Двойные звезды / Binary Stars	48
Происхождение звезд и планет / Origins of Stars and Planets	53
Галактики / Galaxies	60
Астрономические данные / Astronomical Data	66
Космические угрозы / Space Hazards	72
<b>Космические проекты / Space Projects</b>	<b>79</b>



*Материалы о научных достижениях предоставлены руководителями отделов и тем НИР.  
Часть иллюстраций взята из внешних источников (NASA, ESA)*





**ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ РАН  
INSTITUTE OF ASTRONOMY RAS**

*Почтовый адрес:*

**Институт астрономии РАН**

**Пятницкая ул., д. 48**

**119017, г. Москва, Россия**

*Address:*

**Institute of Astronomy of the RAS**

**48 Pyatnitskaya str.**

**119017, Moscow, Russia**

*Телефон: / Phone:* **+7(495)9515461**

*Факс: / Fax:* **+7(495)9515557**

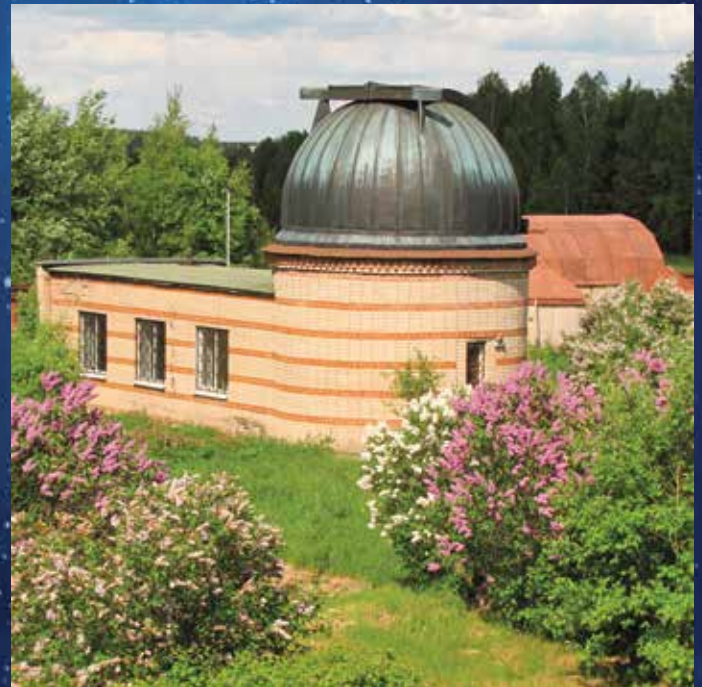
*E-mail:* **admin@inasan.ru**

*Web:* **http://www.inasan.ru**

**ЗВЕНИГОРОДСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ  
ZVENIGOROD OBSERVATORY**

*Телефон: / Phone:* **+7(495)9924206**

**+7(495)9924207**



**ТЕРСКОЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ ИНАСАН  
INASAN TERSKOL OBSERVATORY**

*Почтовый адрес:*

**361603, Кабардино-Балкария, пос. Эльбрус**

*Address:*

**Elbrus,**

**Kabardino -Balkarian Republic**

**361603, Russia**

*Телефон: / Phone:* **+7(86638)7-16-45**

**+7(86638)7-16-31**

*E-mail:* **admin@terskol.com**

