

ЗЕМЛЯ И

№ 6 (342)

НОЯБРЬ-ДЕКАБРЬ, 2021

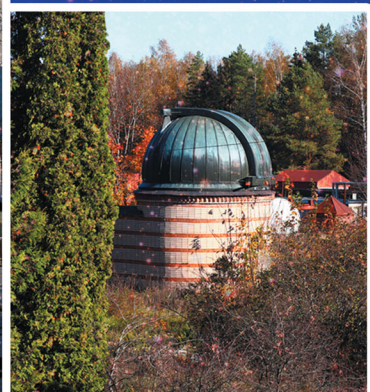
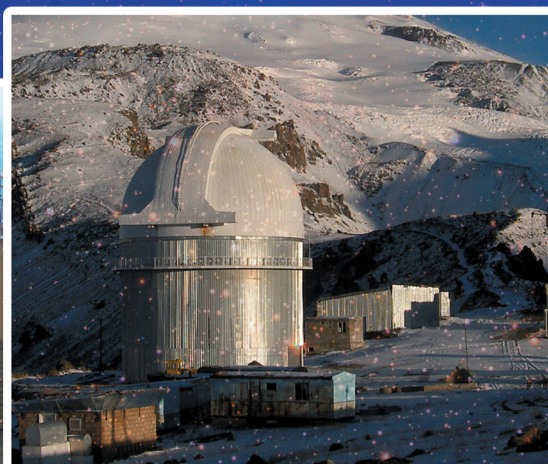
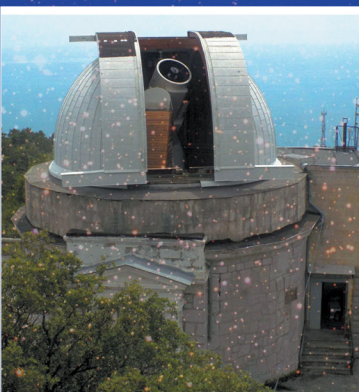
ISSN 0044-3948

космонавтика
астрономия
геофизика

ВСЕЛЕННАЯ



ИНАСАН – 85





- переплетные работы
- тиснение фольгой
- цифровая печать
- офсетная печать
- ламинирование
- цветоделение
- сканирование
- брошюровка
- лакирование
- цветопроба
- нумерация
- высечка
- верстка
- СТР

Типографии ФГУП "Издательство "Наука"
www.tnauka.ru

- ▶ Разумная ценовая политика
- ▶ Высокое качество продукции
- ▶ Реальные сроки выполнения заказов
- ▶ Работа высококлассных профессионалов



- афиши
- календари
- удостоверения
- адресные папки
- визитные карточки
- фирменные бланки
- брошюры, журналы
- эксклюзивные издания
- полноцветные плакаты
- художественные альбомы
- книги в твердом переплете
- листовки, рекламные буклеты
- наклейки на бумажных материалах

- ◆ Удобное месторасположение
- ◆ Тиражи от 20 экземпляров

Москва

Санкт-Петербург

Новосибирск

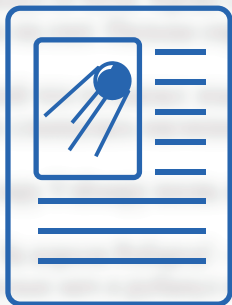


Издательство “Наука” оказывает услуги:

- СОЗДАНИЕ ОРИГИНАЛ-МАКЕТА
 - редактирование
 - вёрстка
 - изготовление рисунков
- ХУДОЖЕСТВЕННОЕ ОФОРМЛЕНИЕ
- ВЕСЬ КОМПЛЕКС ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ УСЛУГ
- РАСПРОСТРАНЕНИЕ В РОЗНИЧНОЙ СЕТИ “АКАДЕМКНИГА”

Высокопрофессиональные специалисты “Науки”
готовы к сотрудничеству

naukapublishers.ru



НАУКА

www.libnauka.ru

*Добро пожаловать
в электронную библиотечную систему
Издательства «Наука»!*

Электронная библиотечная система Издательства «Наука» – это простой и удобный доступ к огромной коллекции статей и книг, входящих в портфолио «Науки»

Электронная библиотечная система это:

- научная, научно-популярная и классическая литература, от статей до монографий
- оперативное обновление новинок благодаря тесной интеграции с редакционно-издательской системой «Науки»
- разветвленный тематический каталог
- простая и эффективная система поиска
- интуитивная и простая система оформления заказа и подписок
- прозрачная система статистики
- надежность доступа и стабильность работы

Реклама

Присоединяйтесь к миру «Науки»!

ЗЕМЛЯ И

№6 (342)

НОЯБРЬ-ДЕКАБРЬ, 2021

ISSN 0044-3948

космонавтика
астрономия
геофизика

ВСЕЛЕННАЯ

Научно-популярный журнал
Российской академии наук
Издается под руководством
Президиума РАН
Выходит с января 1965 года
6 раз в год
«Наука»
Москва

В НОМЕРЕ:

Колонка редактора	3
ДЛУЖНЕВСКАЯ О.Б., ВИБЕ Д.З., ШУСТОВ Б.М., БИСИКАЛО Д.В. Познавая тайны Вселенной (к 85-летию Института астрономии РАН)	4
САЧКОВ М.Е., НАРОЕНКОВ С.А., БАРАБАНОВ С.И., НИКОЛЕНКО И.В. Обсерватории и научные инструменты Института астрономии РАН	19
САЧКОВ М.Е., ШУСТОВ Б.М., СИЧЕВСКИЙ С.Г. Космические исследования в Институте астрономии РАН	30
МАЛКОВ О.Ю., КОВАЛЕВА Д.А., ПОЛЯЧЕНКО Е.В., ХОПЕРСКОВ С.А. Звездные системы во Вселенной	39
БИСИКАЛО Д.В., ШЕМАТОВИЧ В.И., КАЙГОРОДОВ П.В., ЖИЛКИН А.Г. Оболочки горячих юпитеров – ключ к пониманию физики и эволюции экзопланет	49
ШУСТОВ Б.М. Космические опасности: ближний космос	59
ВИБЕ Д.З., КИРСАНОВА М.С. Межзвездная пыль – между светом и тьмой	70
СИТНОВА Т.М. Археология Млечного Пути	80
ШЕМАТОВИЧ В.И., БИСИКАЛО Д.В. Полярные сияния в Солнечной системе	92
Указатель заметок и статей, опубликованных в 2021 году	106
Table of Content and Selected Abstracts	109

На обложке:

Изображение © ИНАСАН, 2021

© Российская академия наук, 2021

© Редколлегия журнала «Земля и Вселенная» (составитель), 2021

© ФГУП «Издательство «Наука», 2021

Earth&Universe: Astronomy, Geophysics, Cosmonautics
Bimonthly popular scientific magazine of the Russian Academy of Sciences & NAUKA Publishing.
Founded 1965.

Published by NAUKA Publishing, Profsoyuznaya Str., 90, 117997, Moscow, Russia.

Редакционная коллегия:

главный редактор
академик Л.М. ЗЕЛЁНЫЙ,
летчик-космонавт
П.В. ВИНОГРАДОВ,
зам. главного редактора
кандидат филолог. наук
О.В. ЗАКУТНЯЯ,
доктор исторических наук
К.В. ИВАНОВ,
летчик-космонавт
А.Ю. КАЛЕРИ,
кандидат физ.-мат. наук
О.Ю. ЛАВРОВА,
доктор физ.-мат. наук
А.А. ЛУТОВИНОВ,
зам. главного редактора
доктор физ.-мат. наук
О.Ю. МАЛКОВ,
доктор физ.-мат. наук
И.Г. МИТРОФАНОВ,
академик И.И. МОХОВ,
член-корр. РАН
И.Д. НОВИКОВ,
доктор физ.-мат. наук
С.П. ПЕРОВ,
доктор физ.-мат. наук
К.А. ПОСТНОВ,
доктор физ.-мат. наук
М.В. РОДКИН,
научный директор
Московского планетария
Ф.Б. РУБЛЁВА,
член-корр. РАН
А.Л. СОБИСЕВИЧ,
член-корр. РАН
О.Н. СОЛОМИНА,
член-корр. РАН
В.А. СОЛОВЬЁВ,
академик
А.М. ЧЕРЕПАЩУК,
доктор физ.-мат. наук
В.В. ШЕВЧЕНКО,
член-корр. РАН
Б.М. ШУСТОВ

Editorial Board:

Editor-in-chief
Acad. Dr. Lev M. ZELENYI
Acad. Dr. Anatoly M. CHEREPASCHUK
Dr. Konstantin V. IVANOV
Pilot-cosmonaut Alexander Yu. KALERI
Dr. Olga Yu. LAVROVA
Dr. Alexander A. LUTOVINOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Oleg Yu. MALKOV
Dr. Igor G. MITROFANOV
Acad. Dr. Igor I. MOKHOV
RAS Corr.Member Dr. Igor D. NOVIKOV
Dr. Stanislav P. PEROV
Dr. Konstantin A. POSTNOV
Dr. Mikhail V. RODKIN
Faina B. RUBLEVA
Dr. Vladislav V. SHEVCHENKO
RAS Corr. Member Dr. Boris M. SHUSTOV
RAS Corr. Member Dr. Alexey L. SOBISEVICH
RAS Corr. Member Dr. Olga N. SOLOMINA
RAS Corr. Member Dr. Vladimir A. SOLOVYEV
Pilot-cosmonaut Pavel V. VINOGRADOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Olga V. ZAKUTNYAYA

Колонка редактора

Дорогие читатели, коллеги, друзья!

Зря кто-то думает, что отмечать юбилеи легко и приятно, особенно если речь идет о большом, активно развивающемся научном институте. Свидетельствую, что коллеги из Института астрономии Российской академии наук, или коротко ИНАСАН, к этому рубежу отнеслись со всей серьезностью, о чем говорят и этот номер журнала, и множество других юбилейных мероприятий. В такие дни всегда есть возможность «остановиться – оглянуться» на то, что сделано, и заглянуть в будущее (что особенно трудно), чтобы наметить пути развития Института, какими они видятся сегодня.

Институт – это прежде всего люди, и, говоря об ИНАСАН, я вспоминаю имена дорогих ушедших друзей и старших товарищей Алексея Максимовича Фридмана и Александра Алексеевича Боярчука. Память об их незабываемых уроках преданности науке, настойчивости и мудрости всегда помогает в трудные минуты.

Сама история образования Института из маленького Совета при Президиуме АН СССР, занимавшегося в основном более или менее формальными вещами, – это «история успеха». Мне кажется, что элегантный открытый стиль, который заложила одна из основательниц Астросовета – Алла Генриховна Масевич, сохранился и в большом современном Институте. Я не буду в этой



колонке рассказывать о достижениях ученых ИНАСАН – этим достижениям и посвящен лежащий перед Вами номер ЗиВ.

Институт астрономии уверенно смотрит в будущее, и я особенно надеюсь, что через несколько лет мы увидим Вселенную глазами главного детища ученых и инженеров ИНАСАН – Международной космической обсерватории «Спектр-УФ».

Редакция нашего журнала (в которую входит и немало ученых ИНАСАН) поздравляет замечательный академический Институт со славным юбилеем и желает коллегам создавать новые красивые теории и проводить уникальные наблюдения нашей Вселенной и с Земли, и из космоса.

*Главный редактор журнала
«Земля и Вселенная» академик
Лев Матвеевич Зелёный*

ИНАСАН – 85 лет

ПОЗНАВАЯ ТАЙНЫ ВСЕЛЕННОЙ (к 85-летию Института астрономии РАН)

ДЛУЖНЕВСКАЯ Ольга Борисовна,

кандидат физико-математических наук

ВИБЕ Дмитрий Зигфридович,

доктор физико-математических наук

ШУСТОВ Борис Михайлович,

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

БИСИКАЛО Дмитрий Валерьевич,

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

Институт астрономии Российской академии наук

DOI: 10.7868/S0044394821060013

История Астрономического совета Академии наук СССР (Астросовета) – Института астрономии Российской академии наук – разделяется на две эпохи: 1936–1990 гг., когда его главной функцией была координация работы астрономических учреждений страны, и период с 1990 г. по настоящее время, когда бывший Астросовет стал многопрофильным научно-исследовательским учреждением (ЗиВ, 2006, № 5; 2016, № 6). У каждой из этих эпох были свои особенности и знаковые моменты. Эта статья посвящена, в основном, первому периоду. О втором периоде – исследованиях, которые проводятся в ИНАСАН в последние годы, – расскажут другие статьи этого номера журнала.

Масштабная индустриализация нашей страны, проводившаяся в 1930-е гг., предполагала одновременное интенсивное развитие науки, в частности, фундаментальных исследований. Новый уровень научных проектов требовал не только значительных средств, но и соответствующего уровня координации.

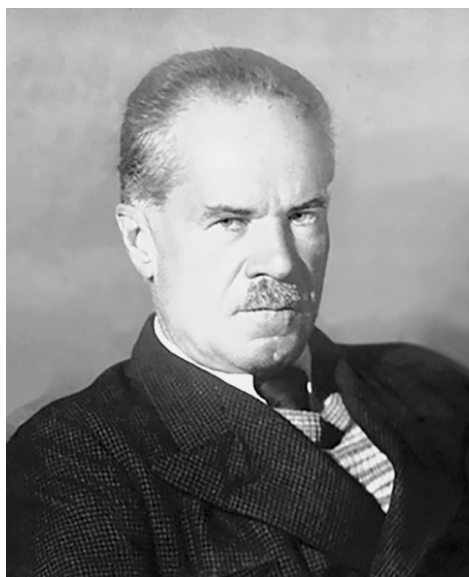
Важной научной инициативой 1930-х гг. стал проект создания большой астрономической обсерватории на юге СССР. К тому времени было совершенно ясно, что старые обсерватории, расположенные близ больших городов, не соответствуют требованиям современных астрономических наблюдений. В 1921 г. по инициативе астрофизика, одного из основателей Российского астрофизиче-

ского института (с 1931 г. – ГАИШ МГУ) и его директора В.В. Стратонова был создан Оргкомитет Главной Российской астрофизической обсерватории. В Крыму, на Северном Кавказе и в окрестностях Одессы были проведены поисковые работы для выбора места расположения обсерватории. Этот проект не получил развития, но необходимость создания южной обсерватории сохранилась. Перед советской астрономией встала задача создания единого органа, который взял бы на себя организацию такой обсерватории, а также в целом координацию развития астрономического приборостроения, согласования планов работы астрономических учреждений СССР, подготовки астрономических кадров и участия в междуна-

родных проектах. Ответственность за организацию фундаментальной науки в то время была возложена на АН СССР, координирующие функции в области астрономии были поручены Астрономическому совету. 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.

Согласно положению, членами Астрономического совета АН СССР (Астросовета) стали академики и члены-корреспонденты АН СССР и АН союзных республик, а также директора всех астрономических учреждений страны, независимо от ведомственной принадлежности. Астросовет управлялся Президиумом, первым председателем которого стал академик В.Г. Фесенков (ЗиВ, 2009, № 4). Президиум заседал два раза в год, а подготовленные для рассмотрения вопросы обсуждались на ежегодных Пленумах Астросовета с участием большого количества делегатов. Пленумы проводились на базе астрономических учреждений АН СССР или университетов в различных городах СССР. К заседаниям Пленума обычно приурочивалось проведение научных совещаний, на которых представлялись доклады по актуальным проблемам.

В довоенные годы руководство Астросовета собирало и систематизировало сведения об исследованиях, проводившихся в различных астрономических учреждениях Советского Союза, чтобы избежать дублирования и наладить согласованную работу по наиболее перспективным направлениям. Члены Президиума Астросовета работали на общественных началах. Оплачиваемой была только должность Ученого секретаря совета с рабочим местом в круглом зале Астрономической обсервато-



Академик Василий Григорьевич Фесенков – один из основоположников астрофизики, директор ГАИШ МГУ (1936–1939). 1936 г.

рии МГУ на Красной Пресне. В этом же зале собирались члены Президиума для обсуждения возникших проблем.

В начале Великой Отечественной войны председатель Астросовета В.Г. Фесенков вместе с экспедицией по наблюдениям солнечного затмения 21 сентября 1941 г. оказался в Алма-Ате (Казахстан), и работа Астросовета была приостановлена до окончания войны.

Война принесла в страну огромные разрушения. Большинство астрономических организаций СССР оказались на захваченной немцами территории и серьезно пострадали, а главный астрономический центр страны – Пулковская обсерватория – был разрушен до основания. Тем не менее астрономы СССР интенсивно работали даже в эти годы, а астрономическое совещание, прошедшее в Москве в сентябре 1943 г., приняло резолюции, поручавшие Астросовету большие и ответственные задачи на будущее в различных направлениях астрономических



*Участники Пленума Астрономического совета АН СССР, Бюраканская обсерватория
АН Армянской ССР. 1971 г.*



*Академик А.А. Михайлов,
директор Пулковской обсерватории
(1947–1964). 1940-е гг.*

исследований. И снова большое внимание было уделено астрономическому строительству.

В 1947 г. Астросовет возобновил свою деятельность под председательством члена-корреспондента (впоследствии академика) АН СССР А.А. Михайлова, который одновременно был назначен на должность директора восстанавливавшейся Пулковской обсерватории (ЗиВ, 1967, № 6; 1990, № 1).

В 1950-е гг. Астросовету были выделены четыре комнаты в здании Института физики Земли АН СССР и несколько ставок научных сотрудников. В одной комнате находились рабочие места заместителя председателя Астросовета доктора физико-математических наук А.Г. Масевич (ЗиВ, 1998, № 5; 2008, № 5; 2019, № 1), второго заместителя председателя доктора физико-математических наук Б.В. Кукаркина (он исполнял обязанности на общественных началах;

ЗиВ, 2009, № 6) и ученого секретаря кандидата физико-математических наук Г.А. Лейкина. Здесь же работал А.А. Михайлов, когда приезжал в Москву. Во второй комнате кандидат физико-математических наук Н.Б. Егорова занималась организацией экспедиций для наблюдения затмений Солнца и других целей, а также подготовкой различных научных мероприятий. В третьей комнате курировал работы астрономических учреждений по проблемам физики планет кандидат физико-математических

наук М.С. Бобров. Два этих направления были началом создания проблемных комиссий Астросовета. Четвертая комната принадлежала Межведомственному научно-техническому совету по исследованию космического пространства, и в ней находилось рабочее место ученого секретаря совета. Кроме того, в штате Астросовета была сотрудница, исполнявшая функции бухгалтера и начальника отдела кадров.

Финансирование, выделявшееся на астрономические исследования, распределялось в соответствии с решениями Пленумов Астросовета. В послевоенные годы основные средства шли на восстановление разрушенных астрономических обсерваторий, в первую очередь Пулковской и Симеизской. В 1954 г. состоялось торжественное открытие (с участием заместителя председателя Совета министров СССР А.Н. Косыгина) воссозданной Главной (Пулковской) астрономической обсерватории страны, причем удалось не только восстановить ее довоенную функциональность, но также существенно расширить число ис-



Сэр Бернард Ловелл, Б.В. Кукаркин, А.Г. Масевич, А.А. Немиро. Астрономическая обсерватория Джодрелл Бэнк. Великобритания, 1955 г.

пользуемых измерительных инструментов. Дополнительно были созданы новые отделения: радиоастрономическое и отделение по изготовлению инструментов с оптической и механической мастерской под руководством члена-корреспондента АН СССР Д.Д. Максутава.

Сразу же после окончания войны было начато восстановление Симеизской обсерватории и одновременное строительство Крымской астрофизической обсерватории АН СССР. Первыми телескопами КрАО стали 48-дюймовый рефлектор и двойной 16-дюймовый рефрактор-астрограф фирмы Цейсс, полученные по репарации из Германии.

В эти же годы в Советском Союзе были созданы новые обсерватории в местах, где были предварительно проведены исследования астрокли-



*Член-корреспондент АН СССР Д.Д. Максуптов.
Пулковская обсерватория, 1950 г.*

мата, – Бюраканская в Армении, Абастуманская в Грузии и Шемахинская в Азербайджане. Обсерватории были оснащены передовыми для того времени телескопами и наблюдательной техникой. Также Астросоветом была организована закупка фотопластинок за рубежом и их централизованное распределение.

В послевоенное время в Советском Союзе научным исследованиям уделялось большое внимание, это касалось и астрономии. На восстановленных и построенных обсерваториях активно проводились исследования по ряду актуальных направлений, которые требовали четкой координации и постоянного обмена результатами исследований. Поэтому Пленумом Астросовета было принято решение о создании в структуре Астросовета проблемных комиссий под председательством авторитетных советских ученых 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. В структуре Астросовета была также учрежде-

на Рабочая группа по исследованию астроклимата.

Проблемные комиссии – «маленькие копии Астросовета» – работали по тем же правилам, что и сам Астросовет: координировали исследования во «вверенной» им области, созывали научные совещания, писали планы, представляли отчеты о своей деятельности и на ежегодных Пленумах Астросовета докладывали о важнейших результатах. К Пленумам приурочивалось проведение значительных научных совещаний. К этому времени в Астросовете уже работала типография. Труды научных конференций и совещаний публиковались и широко рассылались по стране.

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.

В 1966 г. Астросовет вернулся к главной мечте советских астрономов – постройке астрономической обсерватории на юге СССР с большим новейшим телескопом, оснащенным современными светоприемниками и вычислительной машиной. Постановление о ее создании (Специальной астрофизической обсерватории) было принято Советом министров СССР, и Академии наук СССР были выделены необходимые средства. Рабочая группа Астросовета по астроклимату провела ряд экспедиций в южных районах СССР с целью поиска подходящих мест для строительства обсерватории. Хотя место, где теперь находится САО РАН (ЗиВ, 2021, № 1), было не лучшим, после долгих комплексных обсуждений было выбрано именно оно, поскольку в других вариантах потребовались бы огромные дополнительные затраты на строительство дорог и обеспечение обсерватории электроэнергией.



Именная медаль «За обнаружение новых астрономических объектов» Астрономического совета АН СССР (лицевая и обратная стороны)

В советские времена такие фундаментальные и дорогие проекты всегда широко освещались в средствах массовой информации и вызывали огром-

ный интерес во всей стране. Гордость за создание в СССР, в Специальной астрофизической обсерватории, самого большого в мире 6-метрового оп-

Специальная астрофизическая обсерватория. Архыз, Карачаево-Черкесия. Современное фото





А.Г. Масевич – руководитель и организатор всех работ по созданию и оснащению станций наблюдений ИСЗ, заместитель председателя Астросовета АН СССР

тического телескопа (БТА), который был введен в плановую эксплуатацию в 1977 г., и гигантского 600-метрового радиотелескопа РАТАН (начало эксплуатации в 1975 г.; ЗиВ, 1976, № 4) можно было сравнить со всенародным ликованием по поводу окончания строительства нового здания Московского государственного университета.

Астрономический совет АН СССР в послевоенные годы играл важную роль в координации международных проектов, в которых участвовали советские астрономы: отвечал за взаимодействие с Международным астрономическим союзом (МАС). На Пленумах Астросовета поименно утверждались кандидатуры представленных Президиумом кандидатов в новые члены МАС. Особое внимание уделялось выдвижению кандидатур на должности «офицеров МАС». В послевоенные годы для астрономов Советского Союза было практически зарезервировано место в руководстве МАС. Астросовет одновре-

менно был Национальным комитетом астрономов страны, перед Генеральными ассамблеями представлял в МАС кандидатуры на все вакантные посты для выборов, и, как правило, предложенные ученые избирались. Регулярно несколько советских ученых становились председателями комиссий МАС: в 1961–1964 гг. В.А. Амбарцумян и в 1991–1994 гг. А.А. Боярчук были Президентами МАС. Вице-президентами в разные годы были А.А. Михайлов, В.А. Амбарцумян, Б.В. Кукаркин, А.Б. Северный, Э.Р. Мустель и Я.С. Яцкив, а Е.К. Харадзе занимал пост Председателя Исполнительного комитета. Из сотрудников Астросовета президентами комиссий в советские времена были Б.В. Кукаркин (Комиссия 27 «Переменные звезды», 1952–1958 гг.) и А.Г. Масевич (Комиссия 35 «Строение звезд», 1967–1970 гг.).

В преддверии запуска первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) Астрономическому совету АН СССР и персонально А.Г. Масевич председателем Президиума АН СССР академиком М.В. Келдышем была поручена организация наблюдений искусственных спутников Земли. На базе астрономических учреждений, университетов и планетариев создавались группы наблюдателей, оснащенных специально изготовленными для этих наблюдений маленькими телескопами – астрономическими трубками АТ-1 (ЗиВ, 1997, № 5).

Эфемериды были неточными, и пролет спутника необходимо было наблюдать на каждом витке, чтобы произвести их уточнение. Группы наблюдателей располагались поперек предполагаемой траектории пролета спутника с частичным перекрытием полей зрения телескопов (барьерный способ), чтобы обязательно «поймать» спутник, зафиксировать координаты и точное время пролета. Новые данные позво-



*Астрономическая трубка АТ-1
для наблюдения ИСЗ в 1957–1958 гг.*

ляли улучшить эфемериды и «не потерять» спутник.

На территории Советского Союза было создано 66 станций наблюдений ИСЗ, а в Астросовете была учреждена группа сотрудников для координации работ этих станций, которая позднее была преобразована в отдел.

В связи с увеличением штата сотрудников Астросовету были выделены две большие и одна маленькая комната в цокольном этаже дома № 61 по Ленинскому проспекту. В самой большой комнате с одним окном располагалась библиотека. Во второй комнате находились рабочие места сотрудников группы наблюдений ИСЗ (Н.П. Словохотова, М.И. Иленко, М.А. Лурье, В.А. Тольская, Т.В. Касименко, С.К. Татевян). В маленькой темной комнате стоял стол заместителя председателя Астросовета по общим вопросам Е.З. Гиндина, за которым в его отсутствие сидела сотрудница, представляющая отдел кадров. Примерно через два года была выделена еще одна комната в соседнем подъезде для Г.А. Лейкина и О.Б. Длужневской. Кроме того, у Астросовета было

несколько площадок в Москве на крышах домов, где проводились попытки наладить наблюдения ИСЗ с помощью телевизионной техники. Однако все они оказались неудачными, и было решено основать небольшую обсерваторию с оптическими телескопами под Москвой. В 1958 г. А.Г. Масевич обратилась к директору Института физики атмосферы АН СССР академику А.М. Обухову с просьбой выделить для Астросовета несколько помещений на Научной станции Института физики атмосферы под Звенигородом.

Искусственные спутники Земли – новый класс астрономических объектов, слабых и быстро движущихся по небу, причем каждый спутник движется по своей орбите и со своей скоростью. Слежение за ними поставило перед астрономами задачу: создать светосильный телескоп, который мог бы долго удерживать изображение спутника. Таким телескопом стала камера ВАУ (высокоточная астрономическая установка). Особенностью ее конструкции была трехосная монтировка, одна из осей которой выставлялась в полюс орбиты спутника. Это существенно

*Высокоточная астрономическая
установка ИНАСАН. Спустя 50 лет
телескоп продолжает определять
точные координаты спутников*



облегчало слежение за быстро движущимися объектами. Для камеры ВАУ на Звенигородской обсерватории была построена уникальная башня с фундаментальной станиной и полностью открывающимся куполом, позволяющим производить наблюдения в любой точке небесной полусферы. Кроме камеры ВАУ на обсерватории были установлены два телескопа фирмы Цейсс с диаметрами объективов 60 и 40 см, а также камеры АФУ-75 и другие астрономические инструменты. В 1972 г. на Звенигородской научной станции был организован сектор прикладной математики и вычислительной техники. Первоначально для решения численных задач использовалась ЭВМ М-222, в 1978 г. на смену ей пришла ЭВМ ЕС-1033, а затем и более мощная ЭВМ ЕС-1045. Эти солидные по тем временам компьютеры использовались как для вычислений, так и для работы с каталогами.

Звенигородская обсерватория сыграла большую роль в получении наблюдательного материала для многих исследований, проводившихся на основе анализа движений ИСЗ, на протяжении многих лет здесь разрабатывались методики наблюдений, испытывались новые приборы. После успешного прохождения стажировки на Звенигородской обсерватории астрономы из обсерваторий СССР направлялись для работы на наблюдательных станциях, распределенных по широте и долготе и расположенных в различных странах мира. Астросоветом на основе двухсторонних соглашений была создана сеть из 28 таких станций. На них был выполнен огромный объем визуальных и фотографических, а позднее и лазерных наблюдений ИСЗ, которые использовались для исследований в области геодезии, геодинамики и геофизики.

Звенигородская научная станция Астросовета





Заседание Ученого совета Астросовета в Звенигородской обсерватории

Созданная Астросоветом сеть пунктов послужила основой для реализации первой глобальной геодезической программы «Большая хорда». К середине 1980-х гг. большинство станций, выполнивших свои задачи, было закрыто, а их оборудование передано университетам и другим учебным заведениям.

С этого же времени важной стороной деятельности Астросовета стало взаимодействие с любителями астрономии. Проблема освоения космического пространства в 1950–1960-е гг. завладела умами огромного количества людей во всех странах. В СССР – государстве, которое первым «проложило дорогу в космические дали», – многие любители астрономии стали активно наблюдать за небом и писать о своих результатах в Академию наук СССР, которая направляла на отзыв в Астросовет всю полученную корреспонденцию.

С 1946 г. в Астросовете велась 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 1970-е гг. начались работы по моделированию эволюции тесных двойных звездных систем и звездных пульсаций.

В 1961 г. Астросовет получил в крыле здания Института молекулярной биологии АН СССР помещение для размещения сотрудников уже созданных отделов наблюдений ИСЗ и астрофизики. В этом же здании была размещена принадлежавшая Астросовету типография, где издавались четыре журнала: «Научные информации», «Переменные звезды», «Бюллетень станций оптического наблюдения ИСЗ» и «Астрономический циркуляр».

В том же 1961 г. в Астросовете была открыта аспирантура по трем специальностям: «Солнечно-земные связи»



Делегации академий наук социалистических стран на Учредительном совещании многостороннего сотрудничества по проблеме «Физика и эволюция звезд». Калуга, 1974 г.

(руководитель Э.Р. Мустель), «Физика и эволюция звезд» (А.Г. Масевич) и «Переменные звезды» (Б.В. Кукаркин). Подготовленные в аспирантуре специалисты позже стали основой созданного на базе Астросовета Института астрономии АН СССР, а иностранные ученые, прошедшие эту подготовку, стали «связующим звеном» целого ряда научных коопераций. Курс лекций по астрономии в Астросовете читался Г.А. Лейкиным даже для первой группы космонавтов.

Начиная с 1966 г., Астросовет совместно с Гидрометцентром СССР проводил исследования по физике солнечно-земных связей. В 1967 г. по предложению Председателя Астросовета Э.Р. Мустеля были начаты исследования в области звездной спектроскопии и нестационарных звезд.

На основе двусторонних соглашений Астросовет в 1960–1970 гг. проводил совместные исследования с астрономами Франции, Финляндии и Индии по тематике физики и эволюции звезд. Наиболее продолжительным и результативным было сотрудничество с группой астрофизиков из Парижского астрофизического института под руководством профессора Э. Шацмана. По-

очередно в СССР и Франции организовывались ежегодные совещания, на которых заслушивались и обсуждались доклады о результатах совместных исследований, публиковавшиеся в виде статей, и намечались планы работ на следующий срок. В Финляндии совместные исследования курировал доктор Илка Туоминен, который несколько лет работал в отделе А.Г. Масевич. С индийскими коллегами деловые контакты начались с визита в Астросовет в 1969 г. профессора Делийского университета доктора Аулука. Позже к работам присоединились коллеги из группы профессора Баппу, директора Института астрофизики в г. Бангалор.

Начиная с конца 1960-х гг. в совместных с Астросоветом исследованиях участвовали ученые практически из всех европейских социалистических стран, поскольку в то время в аспирантуре при Астросовете учились или проходили стажировку многие молодые астрономы, которые возвращались в командировавшие их учреждения и продолжали работать над выбранными проблемами на основе двусторонних соглашений.

Для координации совместных исследований было решено объединить

двусторонние сотрудничества социалистических стран в многостороннее. Учредительное совещание Комиссии многостороннего сотрудничества состоялось в 1974 г. Комиссия состояла из шести проблемных подкомиссий, руководство которыми осуществляли академии наук сотрудничающих стран: «Ранние стадии эволюции звезд» (Чехословакия), «Поздние стадии эволюции звезд» (Польша), «Нестационарные звезды» (Венгрия), «Магнитные звезды» (Германия), «Двойные звезды» (Румыния), «Скопления и ассоциации» (Болгария). Общее руководство осуществляла АН СССР.

Каждая проблемная комиссия ежегодно проводила в различных странах организационные совещания, к которым приурочивались научные симпозиумы по тематике подкомиссии. Труды симпозиумов публиковались в отдельных сборниках. Многостороннее сотрудничество активно работало

15 лет и прекратило свое существование в 1990 г. в связи с распадом социалистического содружества.

Проблематика научных исследований, проводимых в Астросовете, продолжала расширяться. В 1980 г. на базе сектора прикладной математики и вычислительной техники в составе Астросовета был создан Центр астрономических данных (ЦАД) – советский филиал международного Страсбургского центра звездных данных. Создание ЦАД предоставило астрономам Советского Союза и социалистических стран возможность безвозмездно использовать всю накопленную на обсерваториях мира информацию о звездах в виде каталогов и архивов, а также передавать мировому научному сообществу каталоги, подготовленные советскими учеными. Инициатива создания ЦАД принадлежит кандидату физико-математических наук О.Б. Длужневской – руководителю этого центра.

Здание Астросовета на улице Пятницкой, 48



К концу 1980-х гг. Астросовет стал полноценным научно-исследовательским институтом с семью научными секторами, Звенигородской обсерваторией, экспериментальной станцией лазерной локации ИСЗ в Симеизе, собственным вычислительным центром и отдельным зданием на ул. Пятницкой, предоставленным ему в 1974 г. Академией наук СССР.

В собственной типографии Астросовета издавалось несколько журналов, которые широко рассылались астрономическим учреждениям по всему миру. В ответ библиотеки присылали дубликаты книг и монографий, приобрести которые другим путем было невозможно. Эти поступления значительно пополнили фонд библиотеки Астросовета уникальными изданиями.

В 1968 г. в Астросовете был объявлен конкурс эскизов эмблемы Астросовета, в котором приняли участие многие сотрудники. На основе эскизов – «победителей конкурса» – художником-специалистом была создана эмблема Астросовета, использовавшаяся на бланках, обложках сборников трудов и др. Позже она стала современной эмблемой института.

Сотрудники Астросовета активно работали в составах редколлегии различных астрономических журналов: «Астрономический журнал», «Письма в Астрономический журнал», «Переменные звезды», «Астрономический вестник», «Astrophysics and Space Science». Сотрудники Астросовета публиковали популярные книги, читали лекции, проводили экскурсии по зданию Астросовета в Москве и по Звенигородской обсерватории. В Академии наук СССР был создан Совет по выставкам с подчиненным ему комбинатом, где изготавливались макеты космических станций, диорамы и другие экспонаты для ВДНХ и зарубежных выставок. Сотрудники Астросовета ре-

гулярно привлекались для консультаций по изготовлению этих экспонатов и для работы на зарубежных выставках. За эти годы сотрудники приняли участие в работе двух престижных выставок: Экспо-67 (Монреаль, Канада, 1967) и в здании Генеральной ассамблеи ООН (Нью-Йорк, США, 1982). Также они работали в отделах, посвященных исследованию космоса в торгово-промышленных выставках СССР в Генуе (Италия, 1964), Риме (Италия, 1968), Мехико (Мексика, 1981), Сан-Паулу (Бразилия, 1983), Диполи (Финляндия, 1984), Копенгагене (Дания, 1992).

Высокая научная квалификация и энтузиазм сотрудников Астросовета привели к тому, что к 1990-м он фактически 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. Функции Астрономического совета АН СССР по координации деятельности астрономических учреждений с 1991 г. были переданы Научному совету по астрономии РАН (НСА РАН), председателем которого стал академик Н.С. Кардашёв. НСА унаследовал структуру Астрономического совета АН СССР, переименовав комиссии в секции. На базе ИНАСАН по-прежнему функционирует Национальный комитет российских астрономов (НКРА), осуществляющий координацию участия российских ученых в деятельности МАС. В состав НКРА входят директора ведущих астрономических учреждений России, а возглавляется он Председателем комитета. В 1991–2015 гг. эту должность занимал академик А.А. Боярчук. С 2015 г. главой НКРА является член-корреспондент РАН Б.М. Шустов.



Вернер фон Браун на выставке Экспо-67. Монреаль, 1967 г. (слева). Церемония открытия выставки в Генеральной ассамблее ООН. Нью-Йорк, 1982 г. (в центре). Выставка «Космос-2000». Диполи, Финляндия, 1984 г. Визит на выставку Президента Финляндии Мауно Койвисто (внизу)



Сотрудники института по-прежнему активно участвуют в работе МАС. В частности, Б.М. Шустов является вице-президентом МАС. Наши коллеги (помимо упомянутых выше) в разные годы избирались на посты президентов комиссий МАС: О.Б. Длужневская (Комиссия № 5 «Documentation & Astronomical Data», 1997–2003), Н.Н. Самусь (Комиссия № 6 «Astronomical Telegrams», 2009–2012), Л.И. Машонкина (Комиссия № 14 «Atomic & Molecular Data», 2012–2015), Д.В. Бисикало (Комиссия В1 «Computational Astrophysics», 2018–2021).

Но основной деятельностью Института являются теперь научные исследования. При Институте продолжает работать аспирантура, в которой в 2021 г. обучается 15 аспирантов. Сотрудники пишут учебники и научные монографии, читают лекции в различных вузах, руководят курсовыми и дипломными работами студентов, разрабатывают научно-популярные материалы, участвуют в образовательных программах на радио, телевидении, различных интернет-платформах, консультируют

по астрономическим вопросам средства массовой информации и государственные органы.

Главные направления научных исследований в ИНАСАН – физика и эволюция двойных и кратных систем, звездная спектроскопия, нестационарные звезды, геодинамика и геофизика, тела Солнечной системы и экзопланеты, физика межзвездной среды, звездообразование, астрохимия, космология, астрономическое приборостроение, космические исследования. В Институте по-прежнему функционирует Центр астрономических данных, ведется работа по ведению Общего каталога переменных звезд, разрабатываются собственные космические проекты.

В целом можно утверждать, что Институт астрономии РАН подходит к очередному юбилею в статусе научного и образовательного центра мирового уровня. О некоторых недавних результатах наших исследований вы узнаете из других статей этого номера журнала.

Реклама

Издательство предлагает услуги по редакционно-издательской подготовке материалов, сборников, а также весь комплекс полиграфических услуг

Издательство «Наука» готово оказать услуги под ключ по организации и проведению семинаров, конференций, презентаций, выставок в конференц-залах и на экспозиционных площадках издательства по адресам:

г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
Московская обл., г. Люберцы, Октябрьский пр-т, д. 403

По всем интересующим вопросам обращайтесь по тел.: +7(495)276-7735
Подробная информация на сайте www.naukapublishers.ru/history/partnership

ИНАСАН – 85 лет

ОБСЕРВАТОРИИ И НАУЧНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН

САЧКОВ Михаил Евгеньевич,

доктор физико-математических наук, профессор РАН

НАРОЕНКОВ Сергей Александрович,

кандидат физико-математических наук

БАРАБАНОВ Сергей Иванович,

кандидат физико-математических наук

НИКОЛЕНКО Игорь Владимирович

Институт астрономии Российской академии наук

DOI: 10.7868/50044394821060025

Сотрудники Института астрономии РАН (ИНАСАН) ведут исследования по многочисленным направлениям современной астрономии: вычислительная астрофизика, спектроскопия высокого разрешения, физика межзвездной среды, астрофизика звездных и галактических систем, переменные звезды, космическое приборостроение для работ в ультрафиолетовой области электромагнитного спектра, работы по проблемам астероидно-кометной опасности. В последние годы в ИНАСАН выросло и стало важным направление исследований экзопланет, особенно их атмосфер. Развитие большинства из этих направлений неразрывно связано с развитием экспериментальной базы для получения новых астрономических данных. О существующих и планируемых к вводу в строй астрономических приборах на наблюдательных площадках ИНАСАН: обсерваториях в Звенигороде, Симеизе, Кисловодске, на пике Терскол, о Российско-Кубинской обсерватории и пойдет речь в данной статье.

НЕМНОГО ИСТОРИИ

В 1930-е гг. перед советской астрономией встала задача по созданию единого органа, который взял бы на себя координацию развития обсерваторий СССР, астрономического приборостроения и участия в международных проектах. Академики А.Е. Ферсман и В.Г. Фесенков представили в Президиум Академии наук СССР проект «Положения об Астрономическом совете при АН СССР», который был утвержден 20 декабря 1936 г. Эта дата и считается датой рождения «Астросовета», впоследствии – Института астрономии РАН.

Важным направлением работ для Астросовета в 1950-х гг. стали наблюдения искусственных спутников Земли, подготовка к которым началась задолго до запуска первого спутника. Сотрудники Астросовета под руководством А.Г. Масевич организовали тренировки наблюдателей, занимались подготовкой специальных станций для визуальных наблюдений ИСЗ по всей территории Советского Союза. В 1959 г. с этой целью недалеко от Звенигорода была создана экспериментальная станция Астросовета. Основными задачами этой станции были организация наблюдений ИСЗ и разработка мето-

дик для последующего применения по всей стране и в других странах. Особое внимание уделялось обучению специалистов, которые затем создавали коллективы в высших учебных заведениях. Также в задачи Звенигородской экспериментальной станции входила разработка нового оборудования, его испытание и создание методик наблюдений с ним. Позднее Звенигородская станция была преобразована в Звенигородскую обсерваторию ИНАСАН на правах отдела (ЗиВ, 2019, № 4).

Условия наблюдений вблизи городов, особенно таких мегаполисов как Москва, непрерывно ухудшаются. Поэтому новые инструменты строятся в удалении от больших населенных пунктов, в районах с оптимальным астроклиматом. В 1975 г. Астросовет организовал экспериментальную станцию лазерной локализации ИСЗ на базе Симеизской обсерватории в Крыму.

В 2005 г. на пике Терскол было создано научное подразделение ИНАСАН –

Терскольский филиал, который функционирует во взаимодействии с украинскими коллегами. С 2018 г. ИНАСАН ведет работы по созданию новой научной обсерватории на плато Шатджатмаз вблизи Кисловодска и совместной Российско-Кубинской обсерватории на территории Республики Куба.

С 2016 г. в ИНАСАН создан Центр коллективного пользования научным оборудованием (ЦКП) «Терскольская обсерватория». В состав ЦКП входят научные комплексы телескопов «Цейсс-2000», «Цейсс-1000», «Цейсс-600» и малые роботизированные телескопы, расположенные в обсерваториях ИНАСАН. Центр коллективного пользования оказывает услуги и обеспечивает проведение астрономических исследований при выполнении фундаментальных и прикладных наблюдений, включающих исследования малых тел Солнечной системы, астероидно-кометной опасности, мониторинга околоземного пространства, переменности звезд, гамма-всплес-

Общий вид Звенигородской обсерватории ИНАСАН





Башня и телескоп «Цейсс-600» Звенигородской обсерватории

ков, астросейсмологии, астрофизики внесолнечных планет и межзвездной среды. В 2020 г. услугами ЦКП воспользовались 28 российских и зарубежных научных организаций.

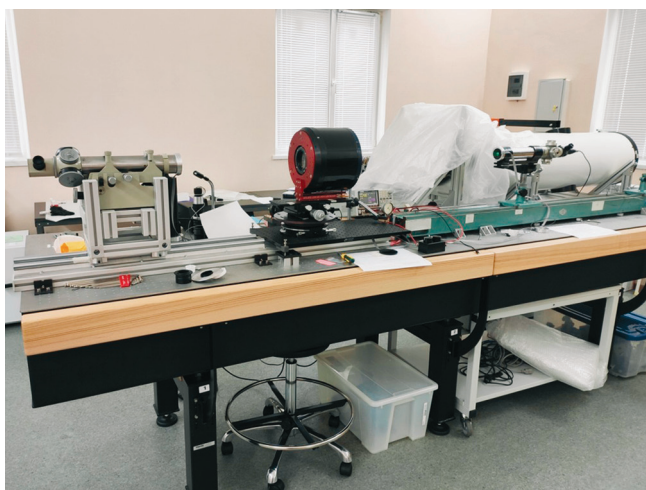
ЗВЕНИГОРОДСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

В наши дни Звенигородская обсерватория ИНАСАН выполняет важную роль в разработке нового оборудования и служит научно-методической базой его применения. Большая часть новых приборов ИНАСАН сначала проходит отработку на экспериментальной базе обсерватории, и только затем устанавливается в отдаленных астрономических площадках. Для выполнения этих задач в Звенигородской обсерватории была восстановлена и укомплектована новым современным оборудованием оптическая лаборатория.

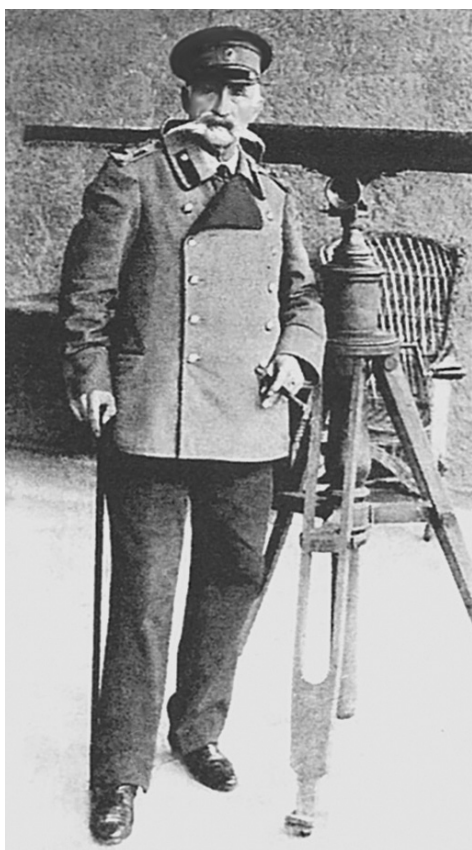
С 2019 г. сотрудники ИНАСАН совместно с сотрудниками Российского квантового центра проводят эксперимент по передаче квантовых состояний фотонов с использованием низкоорбитальных космических аппаратов. Такая технология имеет большой потенциал использования в самых разных

областях науки и техники и представляется весьма перспективной, так как передача квантовых состояний по оптоволоконным линиям имеет существенные ограничения по дальности, не превышающей 100 км. Основным инструментом данного эксперимента стал небольшой телескоп *Officina Stellare RC-600* на опорно-поворотном устройстве *ASA DDM160*. Результаты исследования будут являться заделом для создания системы передачи квантовых состояний по открытому оптическому каналу.

Звенигородская обсерватория служит основной базой для проведения практических занятий студентов и аспирантов астрономических специальностей не только ИНАСАН, но и многих других институтов и вузов по подготовке к работе на телескопах в других обсерваториях. Каждый год, весной и осенью, она 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, Дни открытых дверей приурочены к астрономическим событиям или к знаменательным датам космонавтики. Для образовательных школ – партнеров ИНАСАН («Созвез-



*Стенд оптической лаборатории
Звенигородской обсерватории*



Н.С. Мальцов у телескопа. 1910-е гг.

дие», «Траектория», «Звенигородский дом» и др.) в обсерватории ведутся экскурсии и занятия по различным астрономическим темам.

Все вышеперечисленные виды деятельности обязательно будут продолжены на Звенигородской обсерватории ИНАСАН. У обсерватории есть серьезный потенциал развития, в частности предполагается создание на ее базе элемента Наземного

научного комплекса космического проекта «Спектр-УФ» (см. статью об этой миссии) – аппаратуры приема научных данных. ИНАСАН также планирует задействовать мощности обсерватории при работе над другим космическим проектом «СОДА» (Система обнаружения дневных астероидов).

СИМЕИЗСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

Симеизская обсерватория является одной из важных наблюдательных площадок ИНАСАН, она расположена рядом с поселком Симеиз в Крыму, на высоте 346 метров над уровнем моря.

История Симеизской обсерватории насчитывает более 120 лет (ЗиВ, 2006, № 4). Она была основана Николаем Сергеевичем Мальцовым (1849–1939) – большим любителем астрономии и почетным членом Академии наук. В 1900 г. на склоне горы Кошка на собственные средства Н.С. Мальцовым были построены две астрономические башни, в которых были установлены оптические телескопы, заказанные на фирме «Карл Цейсс Йена» (ГДР). В 1906 г. Николай Сергеевич познакомился с астрономами из Пулковской обсерватории, которые приехали

в Крым в поисках места для организации южной наблюдательной станции. И видя большую заинтересованность астрономов в работе обсерватории, в 1908 г. Н.С. Мальцов передает ее в дар ученым Пулковской обсерватории. Осенью 1913 г. была закончена постройка главного здания обсерватории. Наряду с действующим оборудованием (двойным астрографом и гелиографом Даймейера) в Англии был заказан большой 41-дюймовый рефлектор. На тот момент в штате обсерватории работало два астронома: С.И. Белявский занимался поисками и фотометрией переменных звезд, а заведующий отделением Г.Н. Неуймин занимался поиском малых тел Солнечной системы. После установления советской власти в Крыму обсерватория стала быстро развиваться. В кратчайшие сроки под руководством Г.А. Шайна и при участии В.А. Альбицкого в новой астрономической башне был смонтирован 41-дюймовый рефлектор.

В 1926 г. начались первые наблюдения. К этому времени увеличился штат обсерватории, который состоял уже из пяти астрономов, двух вычислителей, механика-оптика, машиниста и завхоза. На должность директора Симеизской обсерватории был избран Г.Н. Неуймин (1885–1946), который ее возглавлял до 1931 г. и в 1936–1941 гг. После установки спектрографа начались работы по спектрометрии звезд, положившие начало большому циклу работ по астрофизике. В обсерваторию приезжали работать Пулковские астрофизики В.А. Амбарцумян, П.П. Добронравин, О.А. Мельников, Н.А. Козырев и др. В результате из скромной провинциальной любительской обсерватории она превратилась в одно из самых крупных на территории Крыма научных учреждений, оснащенное новейшими в СССР астрономическими инструментами. До начала Великой



*Георгий Николаевич Неуймин.
Портрет художника Б.Д. Харченко. 1954 г.*

Отечественной войны было получено несколько тысяч спектрограмм звезд, определены лучевые скорости около 700 звезд, и в процессе этой работы открыто около 40 спектрально-двойных звезд. В 1933 г. был опубликован каталог лучевых скоростей звезд. Обсерватория была лидером по открытию астероидов и комет в Советском Союзе: к 1941 г. было открыто 110 малых планет и 8 комет.

Великая отечественная война прервала работу обсерватории. В октябре 1941 г. ее сотрудники были эвакуированы. К сожалению, удалось вывести лишь незначительную часть оборудования и научного материала. Осенью 1943 г. фашистами была вывезена обширная научная библиотека и все научные приборы, включая большой рефлектор. После освобождения Крыма в 1944 г. вернувшиеся сотрудники обсерватории увидели полуразрушенные здания. Сразу по окончании войны, согласно постановлению Правительства



Общий вид Симеизской обсерватории ИНАСАН

СССР, Симеизская обсерватория была выделена в самостоятельное научное учреждение. В 1947 г. первым был восстановлен спектрогелиоскоп, и обсерватория активно включилась в работу службы Солнца. Немногим позже были установлены светосильные камеры с диаметром объективов 640 и 450 мм, небулярный спектрограф. Г.А. Шайном были привлечены на работу в Симеизскую обсерватории многие известные астрофизики – Э.Р. Мустель, А.Б. Северный, С.Б. Пикельнер, В.Ф. Газе, В.Б. Никонов, Н.А. Козырев, П.П. Добронравин. Несколько лет в работе обсерватории принимал активное участие И.С. Шкловский. Научные исследования в это время проводились по двум главным направлениям: физика звезд и туманностей, структура Млечного Пути и физика Солнца.

В 1950-е гг. ее центр постепенно переместился в новую обсерваторию в пос. Научный, куда переехала и боль-

шая часть сотрудников. К 1970-м гг. остался один инструмент АЗТ-8 и два астронома, научная деятельность начала замирать.

В 1974 г. Астросовет на основании решения Президиума АН СССР организовал на базе Симеизской обсерватории Экспериментальную станцию наблюдений искусственных спутников Земли. В течение 1974–1975 гг. было установлено современное уникальное оборудование, установлены и запущены в работу фотографическая спутниковая установка АФУ-75, спутниковая камера SBG и астролябия Данжона, а также лазерный дальномер, изготовленный в рамках сотрудничества по программе «Интеркосмос».

С 1975 г. Симеизская спутниковая станция принимала участие во всех международных и специальных программах по геодинاميке и космической геодезии в сети «Интеркосмос». На камере АФУ-75 проводились систе-

матические фотографические наблюдения ИСЗ по программам «Атмосфера», «Большая хорда», «Динамика». На дальномере «Криптон» впервые в СССР была произведена локация американского геодезического спутника «Lageos». В 1988 г. был введен в строй лазерный спутниковый дальномер второго поколения «Крым», работающий по настоящее время.

В середине 1980-х гг. Институтом космических исследований АН СССР (ИКИ РАН) в старой башне, построенной Н.С. Мальцовым, был установлен 60-см телескоп «Карл Цейсс Йена». На этом телескопе использовались дифракционный спектрограф, одноканальный фотометр, планетарная камера.

В 1983 г. Астросоветом АН СССР было принято решение установить на территории Симеизской обсерватории 1-метровый телескоп «Цейсс-1000» фирмы «Карл Цейсс Йена». Для установки телескопа была реконструирована большая башня, которая с начала 1960-х гг. не использовалась. В 1989 г. был завершен монтаж телескопа и начались первые исследования.

В 1991 г., после распада СССР, на базе станции была организована Симеизская международная обсерватория. Однако просуществовала она недолго, была национализирована Украиной, и в 1993 г. она вошла в состав Крымской астрофизической обсерватории. Девяностые годы – сложный период в истории Симеизской обсерватории. Прекратилось сотрудничество с ИКИ РАН и другими организациями, сократилось количество сотрудников. В этот период в основном работали два инструмента – лазерный дальномер «Крым» и 1-метровый телескоп «Цейсс-1000». Лазерный дальномер был включен в международную сеть лазерных станций (ILRS). Телескоп «Цейсс-1000» продолжил работать по программам ИНАСАН. Основными на-



*Телескоп «Цейсс-1000»
Симеизской обсерватории ИНАСАН*

правлениями работы были позиционные и фотометрические наблюдения геосинхронных спутников, поиск крупных тел в метеорных и болидных потоках, позиционные наблюдения астероидов, фотометрия сближающихся с Землей астероидов.

Для поиска малых небесных тел были изготовлены несколько редукторов фокуса с разными характеристиками, позволившие впервые обнаружить в 1995 г. объекты декаметрового размера в метеорном потоке Персеиды, альфа-Каприкорниды, Комиды, Леониды. В настоящее время частью программы на 1-метровом телескопе является определение параметров вращения и физико-химических свойств поверхности астероидов из различных групп, в основном из каталога астероидов, сближающихся с орбитой Земли.

После перехода Крыма в состав России в 2014 г. началась новая глава в жизни Симеизской обсерватории.

Большая часть ее зданий и научного оборудования была передана в ведение ИНАСАН. С 2019 г. Институт реализует программу развития и модернизации научного оборудования обсерватории. Проведены работы по обновлению систем управления телескопа «Цейсс-1000» и куполом, изготовлен новый редуктор фокуса, позволяющий увеличить поле зрения телескопа «Цейсс-1000» с 11' до 48', приобретена новая ПЗС-камера FLI с колесом фотометрических фильтров системы SDSS и Джонсона–Козинса. Для проведения спектральных исследований телескоп «Цейсс-1000» оснастили двумя спектрографами – эшелным спектрографом «Baches» от Baader Planetarium со средним разрешением ($R = 5000$ и $18\,000$) и оптоволоконным спектрографом высокого разрешения ($R = 40\,000$) со стокс-поляриметрической модой, изготовленным в CAO РАН. В обсерватории размещен узел для системы хранения данных Центра коллективного пользования объемом 40 Тб. Проводятся работы по модернизации сетевой и электрической инфраструктуры обсерватории, установлена метеостанция, датчик облачности и all-sky 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 ведутся исследования по нескольким научным задачам: измерению лучевых скоростей звезд, фотометрии переменных звезд и кратных звездных систем, поляриметрии протяженных астрономических объектов, исследованию орбитальных и физико-химических характеристик малых тел Солнечной системы, фотометрическим исследованиям транзиентных событий.

История международной обсерватории на пике Терскол началась вначале 1970-х гг., когда учеными Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины были начаты работы по созданию новой высокогорной астрофизической базы – ее астрофизического филиала. Решение о строительстве обсерватории на пике Терскол было принято в 1970 г. после исследования семи возможных пунктов расположения на территории СССР. Проведенные исследования подтвердили высокое качество астроклимата в горах Северного Кавказа, что способствовало принятию предложения НАН Украины о строительстве самой высокой в Европе астрономической обсерватории на пике Терскол. Обсерватория создавалась объединенными усилиями советских ученых, инженеров и строителей (ЗиВ, 2002, № 5).

В 1982 г. был разработан комплексный план по строительству астрономической башни и установке 2-метрового телескопа «Цейсс-2000» фирмы «Карл Цейсс Йена». В 1983 г. на обсерватории был установлен 60-см зеркальный телескоп Кассегрена «Цейсс-600», а также горизонтальный солнечный телескоп «АЦУ-26», а в 1996 г. введен в строй главный инструмент обсерватории – телескоп «Цейсс-2000».

В 2005 г. на пике Терскол было создано обособленное научное подразделение ИНАСАН – Терскольский филиал, который успешно функционирует, выполняя фундаментальные, прикладные и поисковые астрономические исследования. Филиал совместно с Международным центром астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины организовал широкое международное сотрудничество по научным программам, утверждаемым



Общий вид обсерватории на пике Терскол



Астрономическая башня и телескоп Цейсс-2000 обсерватории на пике Терскол

РАН, НАНУ и Международной ассоциацией академий наук. За прошедшие годы были успешно выполнены четыре международных научные программы астрономических исследований и принята пятая программа «Астрономия в Приэльбрусье. 2021–2025 гг.» В программе участвуют 33 научные орга-

низации из 14 стран ближнего и дальнего зарубежья, в том числе России, Украины, Германии, Франции, Болгарии, Польши, Литвы, Таиланда и др. На обсерватории работает так же целый ряд малых роботизированных телескопов, таких как «Meade 14"», «Celestrone RASA 11"» и др.



Комплекс телескопа «Цейсс-2000»

Преимуществом комплекса телескопа «Цейсс-2000» по сравнению с другими приборами такого класса в Европе считается то, что, будучи установленным на существенно большей высоте в условиях хорошего астроклимата и разреженной атмосферы, он обладает дополнительными возможностями при проведении спектральных исследований, а также большей проникающей способностью. Сравнительно большой диаметр зеркала телескопа, высокая скорость работы прецизионных автоматических приводов и высокочувствительные приемники излучения позволяют успешно наблюдать объекты слабее 23 звездной величины с позиционной ошибкой не более половины угловой секунды. Для проведения многочисленных астрофизических исследований телескоп оснащен научным оборудованием: мозаичным эшелле-спектрографом в фокусе Куде («МАЭСТРО») с разрешающей способностью $R = 60\,000$ в спектральном диапазоне 300–1000 нм; навесной многомодовый спектрометр в фокусе Кассегрена («ММС») с разрешающей спо-

собностью $R = 100, 1500, 5000, 13\,500$; шестиканальный апертурный поляриметр, ПЗС-камера FLI Cobalt 4320 с колесом фотометрических фильтров BVRI.

Зеркальный телескоп «Цейсс-600» с диаметром зеркала 600 мм в основном используется для фотометрических исследований блеска переменных звезд и других небесных объектов, для изучения взаимных явлений в системах спутников больших планет, а также для отслеживания «космического мусора». Малые роботизированные телескопы «Meade 14"» и «Celestrone 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. К преимуществам роботизированных систем относится способность выполнять задачи либо совсем без участия оператора, либо с минимальным вмешательством человека в процесс наблюдения. Особенно ценно использование таких систем в труднодоступных местах, например, высоко в горах либо в местах со сложными метеоусловиями. Международная обсерватория на пике Терскол как раз является таким местом.

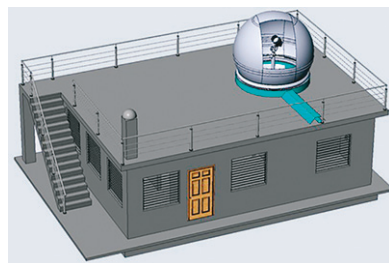
Начиная с 2019 г. оборудование обсерватории было значительно модернизировано и пополнено благодаря грантовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. На обсерватории появились новые приемники излучений (ПЗС и КМОП-камеры), обновлены вспомогательные приборы.

Благодаря коллективу Терскольского филиала ИНАСАН и Международного центра астрономических и медико-экологических исследований обсерватория всегда готова к новым научным открытиям.



Проект башни телескопа Astrosib RC-500 Кисловодской обсерватории ИНАСАН на плато Шатджатмаз. Планируется, что телескоп будет установлен в высокой башне с целью минимизации влияния турбулентции воздушных потоков на получаемые изображения

Проект лабораторного корпуса и купола первого телескопа Российско-кубинской обсерватории



НОВЫЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПЛОЩАДКИ ИНАСАН

Перспективной площадкой для новых научных инструментов стала Кисловодская обсерватория ИНАСАН на плато Шатджатмаз. С 2018 г. эту площадку осваивает ИНАСАН. В 2021 г. в обсерватории планируется установить первый телескоп Astrosib RC-500, который предназначен для проведения фотометрических исследований звезд с экзопланетами. Телескоп будет работать в автоматическом режиме, без присутствия оператора. В будущем в обсерватории планируется установить новые широкоугольные телескопы для астрометрических и фотометрических обзоров небесной сферы.

Важным проектом для ИНАСАН стало создание совместной Российско-Кубинской обсерватории на территории Республики Куба. На первом этапе работ ИНАСАН совместно с Институтом геофизики и астрономии (ИГА) Республики Куба на территории ИГА создал небольшую обсерваторию с широкоугольным 20-см телескопом, в основном использующимся в образовательных целях для практики молодых кубинских специалистов. Но на нем также ведутся научные исследования, в первую очередь требующие получе-

ния длительных рядов фотометрических данных, как при решении задач астросейсмологии: объект наблюдается телескопами на территории России, а затем они продолжают на Кубе. Как и большинство современных инструментов, этот телескоп полностью роботизирован. В планах Российско-Кубинской обсерватории установка 1-м широкоугольного телескопа как части сети телескопов ИНАСАН для задач мониторинга околоземного пространства.

Развитие наблюдательных баз ИНАСАН ведется в соответствии с принятой программой развития института на 2019–2023 гг. Работы на телескопах наземного базирования Института осуществляются по утвержденным научным программам отечественных и зарубежных исследователей. Организуются мероприятия по модернизации телескопов Института, по информационному обеспечению астрономических исследований, разработке приборов и методов наблюдений искусственных и естественных небесных тел. Кроме того, ИНАСАН участвует в выполнении федеральных, региональных, межведомственных, международных научных программ и проектов. Важно отметить, что роботизированные телескопы ИНАСАН объединены в астрономическую сеть, которая, как мы показали в настоящей статье, постоянно развивается и обновляется.

ИНАСАН – 85 лет

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИНСТИТУТЕ АСТРОНОМИИ РАН

САЧКОВ Михаил Евгеньевич,

доктор физико-математических наук,
профессор РАН

ШУСТОВ Борис Михайлович,

член-корреспондент РАН

Институт астрономии Российской академии наук

СИЧЕВСКИЙ Сергей Григорьевич,

кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник

DOI: 10.7868/S0044394821060037

Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН) является одним из ведущих научных институтов России. Важным направлением исследований ИНАСАН, его «визитной карточкой» являются фундаментальные космические исследования. Институт занимается разработкой средств космического базирования для наблюдений астрономических объектов. В статье кратко рассказывается об этих проектах: крупной многоцелевой космической обсерватории «Спектр-УФ» для наблюдений в ультрафиолетовом диапазоне, а также поисковых космических средствах наблюдения астрономических объектов как в дальнем, так и в ближнем космосе.

ПРОЕКТ «СПЕКТР-УФ»

Земная атмосфера поглощает практически все излучение небесных светил в диапазоне электромагнитного спектра с длиной волны короче 300 нм. Точное значение границы пропускания излучения атмосферой зависит от состояния озонового слоя и содержания в ней других молекул. Ультрафиолетовый (УФ) участок спектра (от 10 нм до 400 нм) доступен для наблюдения наземными оптическими инструментами только в диапазоне 300–400 нм. На более коротких длинах волн наблюдения возможны лишь с помощью заатмосферных приборов. Такие наблюдения дают важные уникальные (т. е. недополучаемые другими методами) научные данные. Внимание исследователей к этому диапазону объясняется широким спектром возможностей, открывающимися перед учеными при использовании наблюдений

Вселенной в УФ. Впервые заатмосферные наблюдения в УФ были проведены 10 октября 1946 года, когда с борта ракеты А-4 («Фау-2») был получен УФ-спектр Солнца. Только через десятилетие, в 1955 году, были впервые проведены УФ-наблюдения ночного неба. Наблюдения методами ультрафиолетовой звездной фотометрии (измерение блеска) и спектроскопии низкого разрешения были впервые осуществлены в 1957 и 1968 гг. соответственно. Изучение звезд в УФ-диапазоне по спектрам с высоким разрешением ведется с 1972 г. Напомним, что спектральное разрешение это величина, характеризующая способность отличать близкие по длине волны сигналы, равная отношению длины волны наблюдения к минимальной разнице длин волн, которую способен фиксировать прибор. С тех пор в мире проведено большое количество кратковременных космических экспериментов и запущено около двух десятков орбитальных косми-

ческих аппаратов (обсерваторий) для долговременных наблюдений объектов в УФ. Даже знаменитый Космический телескоп имени Хаббла (КТХ) был спроектирован как инструмент прежде всего для наблюдений в УФ и является в настоящее время единственным инструментом для УФ-спектроскопии высокого разрешения.

Советские ученые и специалисты по космической технике также добились в УФ-исследованиях значительных достижений благодаря созданию космической обсерватории «Астрон» (рук. акад. А.А. Боярчук, главный конструктор А.А. Моишеев, головная организация – НПО им. С.А. Лавочкина, ныне АО «НПО Лавочкина»). С помощью спутника «Астрон» (1983–1989 гг.), на борту которого летал крупнейший в те годы космический телескоп «Спика» апертурой 80 см, был получен ряд важных результатов: определен темп истечения вещества из звезд различных спектральных классов; определено содержание химических элементов в атмосферах необычных (пеккулярных) звезд классов Ар и Ам; выявлены свойства нестационарных звезд (например, карликовых Новых), квазаров и галактик, галактических туманностей и диффузного ультрафиолетового излучения Галактики. «Астрону» удалось пронаблюдать такие объекты и явления, как водяная кома кометы Галлея (в 1985–1986 гг.) и вспышка сверхновой в Большом Магеллановом облаке в конце февраля 1987 г. (SN1987A).

Успех обсерватории «Астрон» и запуск обсерватории КТХ вдохновил отечественных ученых и специалистов на создание крупной обсерватории, сравнимой по возможностям с обсерваторией КТХ. Проект получил название «Спектр-УФ»; он стал одним из проектов российской серии «Спектр» наряду с проектами «Спектр-Р» (запущен в 2011 г., успешно завершил работу в 2018 г.) и «Спектр-РГ» (успешно

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). Проект «Спектр-УФ» известен как в российском, так и в мировом астрономическом сообществе также под названием «Всемирная космическая 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). Идея проекта «Спектр-УФ» возникла еще в конце 80-х годов прошлого века. Однако вследствие огромных сложностей в стране периода 90-х – начала 2000-х, проект жил что называется «под капельницей». Но астрономы продвигали проект, надеясь на лучшее (см. публикации в ЗиВ, 2006, № 5; 2009, № 6). Промышленное финансирование работ началось только с 2010 г. (с перерывом в 2015 г.). Головной организацией по космическому комплексу «Спектр-УФ» в целом является АО «НПО Лавочкина», головной научной организацией – ИНАСАН. Работы над проектом ведутся в большой кооперации, включающей помимо АО «НПО Лавочкина» и ИНАСАН 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,



Космический аппарат «Спектр-УФ»

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 достаточно 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. Выбор параметров телескопа Т-170М (диаметр главного зеркала – 170 см., фокальное отношение – 10) обеспечивает эти требования. По всей видимости, проект будет работать на орбите уже после завершения успешной работы КТХ (обсуждается 2024 г. как срок окончания работы), т. е. 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.

Обсерватория «Спектр-УФ» многоцелевая. Главные направления научных исследований с КА «Спектр-УФ» относятся к самым актуальным. Перечислим основные из них: поиск скрытого барионного (обычного) вещества во Вселенной (пока наблюдается лишь около 50% вещества); исследование энергетичных (в частности взрывных) процессов в галактиках, звездах и компактных объектах; исследование роли УФ-излучения в проблеме происхождения жизни во Вселенной. УФ-спектроскопия весьма перспективна для исследования атмосфер экзопланет. Напомним, что именно применение УФ-спектроскопии высокого разрешения с помощью спектрографа STIS (КТХ) впервые привело к открытию атмосферы экзопланеты HD209458b. 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 – лидеров УФ исследований, приступил к формированию Программы научных исследований. Научные планы проекта «Спектр-УФ» весьма амбициозны. Нас ожидает много захватывающих открытий, которые будут сделаны с ее помощью. Планируемый запуск в 2025 г. стимулирует команду «Спектр-УФ» в ИНАСАН работать очень интенсивно и ответственно.

ПРОЕКТ КИТАЙСКО-РОССИЙСКОГО ТЕЛЕСКОПА, СОБИРАЕМОГО НА ОРБИТЕ (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 (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences) разработана концепция 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. Естественно возникает вопрос о преимуществах такого подхода. Использование классических технологий ограничивает диаметр космического телескопа несколькими метрами. Кроме того, такие проекты очень дороги. Общий бюджет космического телескопа HST (Hubble Space Telescope, космический телескоп «Хаббл») с цельным зеркалом 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 главным зеркалом 6.5 м будет стоить не меньше, несмотря на использование технологии зеркала, состоящего из сегментов.

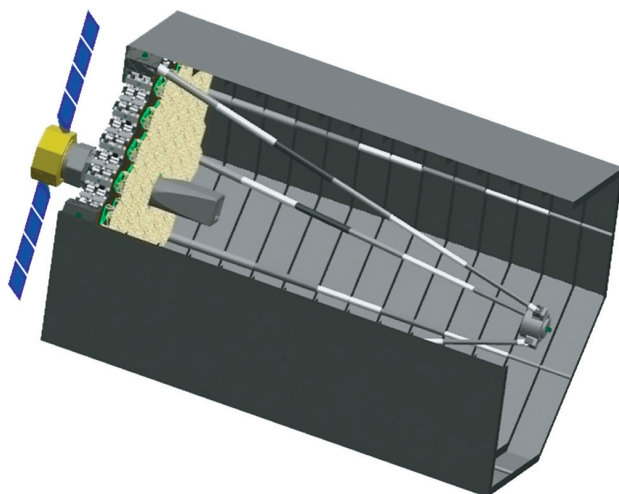
Проект телескопа OAST, собираемого на орбите, предлагает один из наиболее осуществимых и экономичных методов реализации космического телескопа 10-метрового класса. Проблема изготовления большого зеркала решена за счет использования сегментов умеренного размера. Благодаря модульному принципу конструкции 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. Напомним, что именно этот принцип был заложен и в конструкцию Космического телескопа имени Хаббла. В этом кроется секрет долголетия этого уникального телескопа – более 30 лет работы на орбите (!!!). 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 (НН объекты, НII области); спектроскопия межзвездной среды; 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.

Как мы уже отмечали выше, в настоящий момент главные космические агентства мира обсуждают проекты крупных УФ, оптических и ИК миссий следующего поколения на период после 2030 года. OAST, возможно, удастся реализовать ранее. Одной из сложностей проекта является проблема комплектации ИК детекторами большого формата с приемлемыми для астрофизических исследований характеристиками. В условиях прогнозируемой недоступности ИК детекторов производства США мощное развитие китайской промышленности в этом направлении в последние годы позволяет надеяться, что китайско-российский проект будет оснащен самыми современными и эффективными приемниками излучения без всякого санкционного давления.

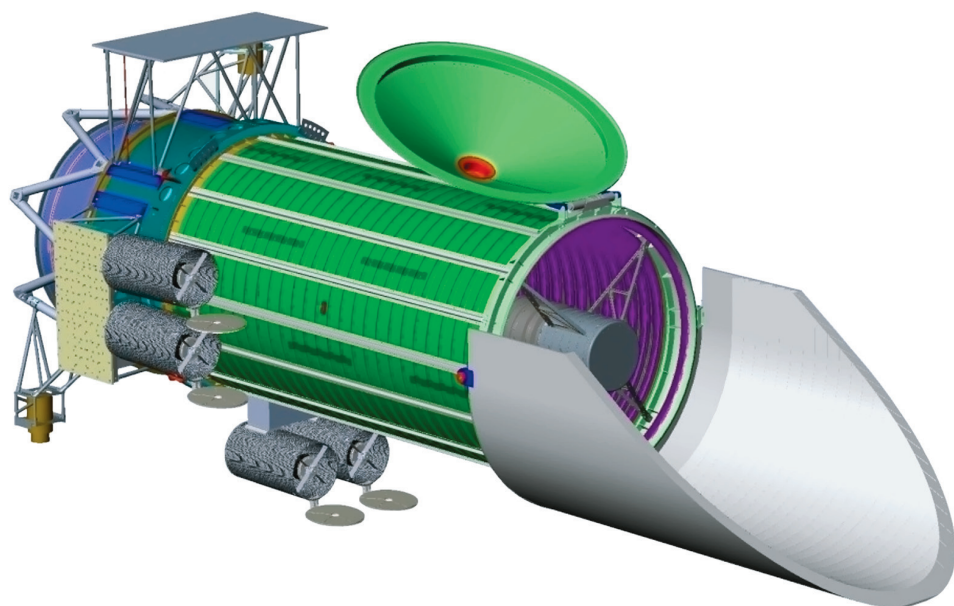
Общий вид телескопа OAST в рабочем состоянии



ПРОЕКТ «АСТРОН-2»

Одним из разрабатываемых в ИНАСАН проектов УФ-обсерваторий следующего поколения является миссия «Астрон-2». При анализе перспектив УФ-астрономии, сотрудники ИНАСАН пришли к выводу, что будущая перспективная УФ-обсерватория должна быть нацелена на решения 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 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.), который имел в своем составе телескоп системы Ричи-Кретьена с главным зеркалом 50 см. Поле зрения телескопа составляло 1.2 градуса. Рабочий спектральный диапазон составлял 135 нм – 280 нм.

По замыслу разработчиков, проект «Астрон-2» будет являться 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 решаемых 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



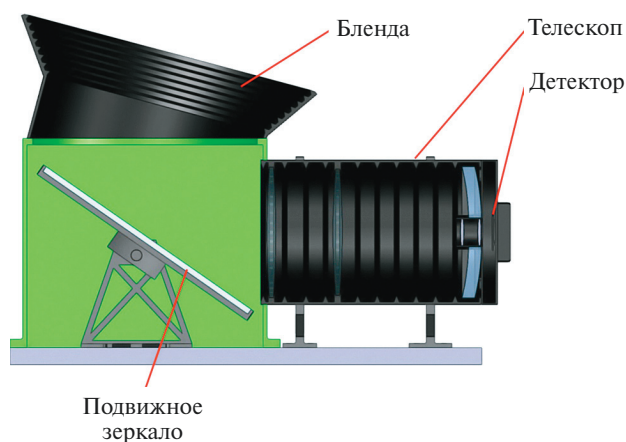
Внешний вид космической миссии «Астрон-2»

космического аппарата. Основу космической астрофизической обсерватории будет составлять телескоп с диаметром зеркала 210 см. Увеличенное поле зрения телескопа (~2 угловых градуса) позволит провести полные фотометрические обзоры и глубокие спектральные обзоры всех объектов вплоть до 20 звездной величины со спектральным разрешением 500 в диапазоне длин волн 120–310 нм. Проект GALEX провел первый масштабный всенебесный фотометрический обзор большей части небесной сферы, но вследствие особенностей приемников излучения проекту GALEX были недоступны области вокруг ярких звезд (ярче 10-й звездной величины). 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.

ПРОЕКТ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ ЛУННОЙ ПРОГРАММЫ

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. Использование в УФ-телескопе современного приемника излучения (ПЗС либо КМОП), не чувствительного к локальной пересветке и имеющего большой динамический диапазон, позволит устранить основной недостаток всенебесного обзора GALEX – отсутствие наблюдений примерно для 30% небесной сферы в области Млечного пути и рядом с яркими объектами. УФ-наблюдения с поверхности Луны (рассматривается также и вариант орбитального телескопа) представляют

Телескоп VT-Луна-УФ



уникальную возможность проведения исследований со стабильной платформы за пределами земной атмосферы. Для перенаведения телескопа предполагается 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 работок 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. Планируется, естественно, максимально использовать имеющийся у ИНАСАН опыт и задел работ в рамках проекта «Спектр-УФ».

ПРОЕКТ ИНДИЙСКО-РОССИЙСКОГО УФ СПЕКТРОГРАФА ДЛЯ КИТАЙСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ (SING)

Прямые снимки неба в УФ позволяют отслеживать морфологию протяженных объектов Вселенной. В этой связи впечатляющими являются результаты работы на орбите телескопов GALEX и ASTROSAT/UVIT, камер Космического телескопа им. Хаббла, с помощью которых получены изображения с беспрецедентной детализацией. Большие надежды астрономы связывают с Блоком камер поля готовящегося к запуску проекта «Спектр-УФ». Однако для полного понимания физических условий (температур, плотностей, полей излучения) в таких объектах требуются также спектральные данные. Тем не менее большая часть спектроскопических наблюдений УФ-неба сосредотачивается на исследованиях точечных источников, вследствие чего инструменты имеют небольшие поля зрения, и наблюдения протяженных областей требуют большого количества перенаведений космических телескопов и выделения

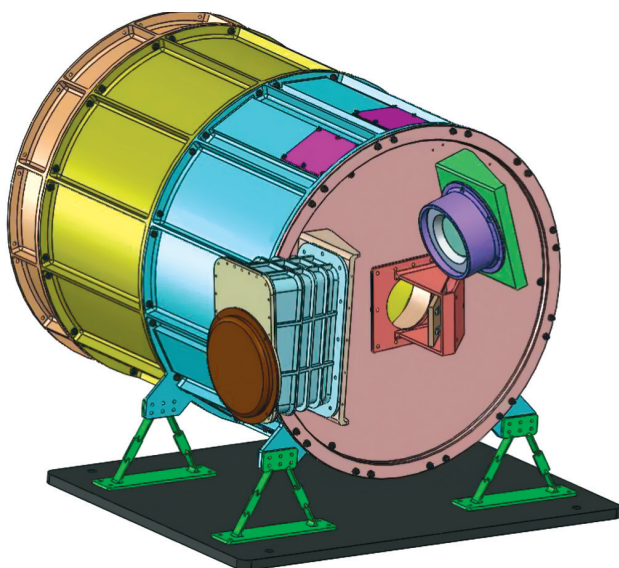
огромного количества наблюдательно-го времени, что реализовать на практике невозможно. В результате даже для Крабовидной туманности, самого знаменитого остатка взрыва сверхновой, были получены спектральные наблюдения только некоторых отдельных ее участков. Можно сделать вывод, что ни один из реализованных УФ-экспериментов не обладал достаточным сочетанием спектрального и пространственного разрешения, чувствительности и продолжительности полета, необходимым для исследования физики туманностей и межзвездной среды (МЗС). Единственным спектроскопическим обзором протяженных объектов по всему небу в УФ диапазоне спектра было совместное американо-корейское исследование SPEAR/FIMS. В результате были получены важные данные о распределении горячего газа в остатках сверхновых, горячего газа в межзвездной среде, флуоресценции молекулярного водорода и диффузного рассеянного фона пыли. Однако задача детального исследования этих объектов не была решена.

Нам представляется, что разрабатываемый в ИНАСАН совместно с коллегами из Индийского института 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 исполь-

зованию 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 с высокой щелью для работы в диапазоне длин волн 140–270 нм. Хотя большинство современных УФ-космических телескопов создаются на основе схемы Ричи-Кретьяна, вследствие требований к телескопу прибора SING: компактность, ограничения на длину и кривизну поля зрения, – была выбрана схема Кассегрена с параболическим главным зеркалом и гиперболическим вторичным зеркалом. Фокусное расстояние телескопа составляет 1500 мм, а диаметр главного зеркала 300 мм. Предполагается,

Внешний вид прибора SING



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.

КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ, ПРИБЛИЖАЮЩИХСЯ К ЗЕМЛЕ С ДНЕВНОГО НЕБА («СОДА»)

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 задачу предупреждений о возможных столкновениях со временем упреждения в несколько часов. Количество таких потенциально опасных тел размером 10–20 м и более оценивается

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.

в 10^8 штук, 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.

Проект СОДА впервые был представлен в ЗиВ в 2018 г. (№ 4), а в данном выпуске Журнала «Земля и Вселенная» в статье Б.М. Шустова «Космические угрозы» представлен его статус. Поэтому здесь мы ограничимся лишь упоминанием об этом проекте, работа над которым продолжается. Букваль-

но накануне сдачи номера в редакцию из Европейского космического агентства сообщили о заинтересованности в развитии сотрудничества по проекту. Сообщение предварительное, так что подождем...

В заключение отметим, что начатое с приходом в институт в 1987 г. академика А.А. Боярчука направление фундаментальных космических исследований успешно развивается. В Институте астрономии РАН ведется целый ряд ис-

следовательских работ по разработке космических проектов, с реализацией которых мы связываем планы существенного продвижения наших знаний о Вселенной.

С новыми книгами
Издательства “Наука”
вы можете ознакомиться на сайте
naukabooks.ru



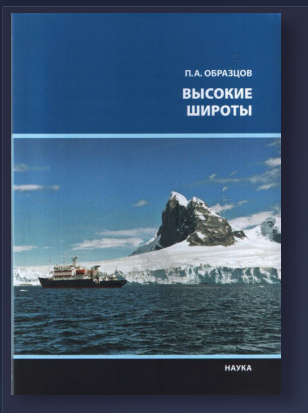
Капанадзе А.Л.

**Опытным путем:
Эксперименты, изменившие мир.**

М.: Наука, 2019. - 319 с.

В книге рассказывается об основных вехах в развитии экспериментальных методов в самых разных областях наук о природе, человеке и обществе – физике, химии, астрономии, биологии, физиологии, медицине, археологии, социологии, психологии, экономике. Охвачен период с античных времен до наших дней. Читатель узнает о знаменитых и малоизвестных опытах, оказавших огромное влияние на формирование наших представлений о мире и о нас самих. Большое внимание автор уделяет не только истории приборов и технологий, но и истории идей. Затрагиваются проблемы отличия классического эксперимента от наблюдения (когда опыт «ставит» сама природа), преемственности технических инноваций, влияния общественного климата на работу экспериментатора, роли случайности в этой работе.

Для широкого круга читателей.



Образцов П.А.

Высокие широты.

М.: Наука, 2018. – 192 с. – (Научно-популярная литература)

Книга повествует об открытии и освоении Арктики и Антарктики, этих двух полюсов холода и мужества, об отважных героях, благодаря которым человечество узнало о природе, животном мире самых северных и самых южных земель, а также о том, какая непростая и вместе с тем увлекательная жизнь идет сегодня в этих суровых, таинственных и манящих краях.

Для широкого круга читателей.



Верещагин Г.В., Аксенов А.Г.

Релятивистская кинетическая теория с приложениями в астрофизике и космологии.

М.: Наука, 2018. – 471 с.

Релятивистская кинетика широко применяется в астрофизике и космологии. В последние годы интерес к этой теории вырос, поскольку появилась возможность ставить эксперименты при таких условиях, где релятивистские эффекты становятся существенными. Настоящая монография состоит из трех частей. В первой части представлены основные идеи и концепции, уравнения и методы теории, включая вывод кинетических уравнений из релятивистской цепочки Боголюбова, а также соотношение кинетического и гидродинамического описаний. Вторая часть – это введение в вычислительную физику, причем особое внимание уделяется численному интегрированию уравнений Больцмана и смежным вопросам, а также многокомпонентной гидродинамике. В третьей части дан обзор приложений, который охватывает вопросы ковариантной теории отклика, термализации плазмы, комптонизации в статических и динамических средах, кинетики самогравитирующих систем, образования структуры в космологии и излучения нейтрино при гравитационном коллапсе.

Для студентов старших курсов университетов, аспирантов и исследователей, специализирующихся в области теоретической физики, астрофизики и космологии.

ЗВЕЗДНЫЕ СИСТЕМЫ ВО ВСЕЛЕННОЙ

МАЛКОВ Олег Юрьевич,

доктор физико-математических наук

ПОЛЯЧЕНКО Евгений Валерьевич,

доктор физико-математических наук

КОВАЛЕВА Дана Александровна,

кандидат физико-математических наук

ХОПЕРСКОВ Сергей Александрович,

кандидат физико-математических наук

Институт астрономии Российской академии наук

DOI: 10.7868/50044394821060049

Отдел физики звездных систем – одно из подразделений Института астрономии РАН. Отдел насчитывает 18 сотрудников и занимается следующими научными проблемами: исследование строения, кинематики и динамической эволюции галактик; изучение проблемы спиральной структуры галактик; развитие теории устойчивости гравитирующих систем; исследование гидродинамических неустойчивостей в астрофизике; изучение звездного состава и структуры звездных скоплений; изучение происхождения и эволюции населения рассеянных скоплений в Галактике; изучение кинематики и пространственной структуры звездных групп; развитие методов параметризации звезд; изучение межзвездного поглощения в Галактике; изучение двойных и кратных звездных систем; создание, поддержка и развитие астрономических каталогов и баз данных; создание Российской виртуальной обсерватории и ее интеграция в Международную виртуальную обсерваторию.

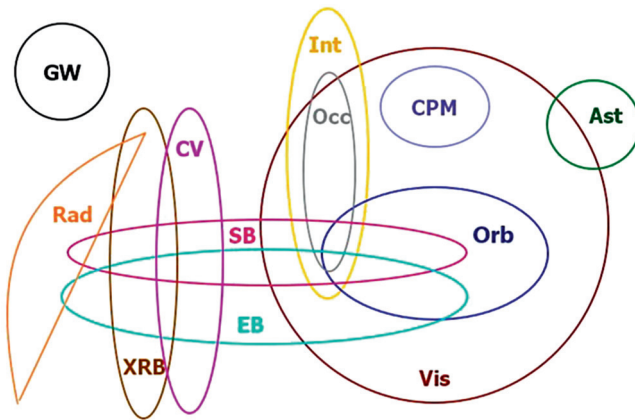
В данной статье мы опишем современное состояние дел в области исследования различных звездных систем: от двойных звезд до гигантских звездных систем – галактик. В частности, мы обращаем внимание читателя на нерешенные вопросы и загадки в этой области современной астрономии.

ДВОЙНЫЕ И КРАТНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Двойные звезды весьма многочисленны: более половины (по некоторым оценкам, более 90%) звезд образуются в двойных и кратных системах. Кроме того, двойные звезды чрезвычайно важны для определения фундаментальных характеристик звезд: масс, радиусов и температур. В частности, масса звезды (параметр, практически в одиночку определяющий всю звездную эволюцию) принципиально не может быть определена из наблюдений одиночных звезд (единственное исключение – Солнце). Таким образом, двойные звезды – единственный источник данных для получения фундаментальных соотношений между звездными пара-

метрами (соотношения «масса–светимость», «масса–радиус» и т.п.). Эти соотношения необходимы в астрономии для оценки параметров звезд, а также являются ключом к решению вопроса об образовании двойных и одиночных звезд (так называемая история звездообразования – распределение по разным параметрам звезд, образующихся в данной звездной системе). Поэтому изучение двойных звезд является одной из наиболее актуальных задач современной астрофизики.

Двойственность звезд проявляется по-разному и может быть обнаружена, например, из визуальных позиционных наблюдений (компоненты наблюдаются как две отдельные звезды), из фотометрических наблюдений (компоненты пары сливаются в один объект,



Связь между наблюдательными типами двойных систем. Vis – визуальные, CPM – пары с общим собственным движением, Ast – астрометрические, Orb – орбитальные, Int – интерферометрические, Occ – покрываемые Луной, SB – спектроскопические, EB – затменные, CV – катаклизмические, XRB – рентгеновские, Rad – двойные в радиопульсарах, GW – гравитационно-волновые

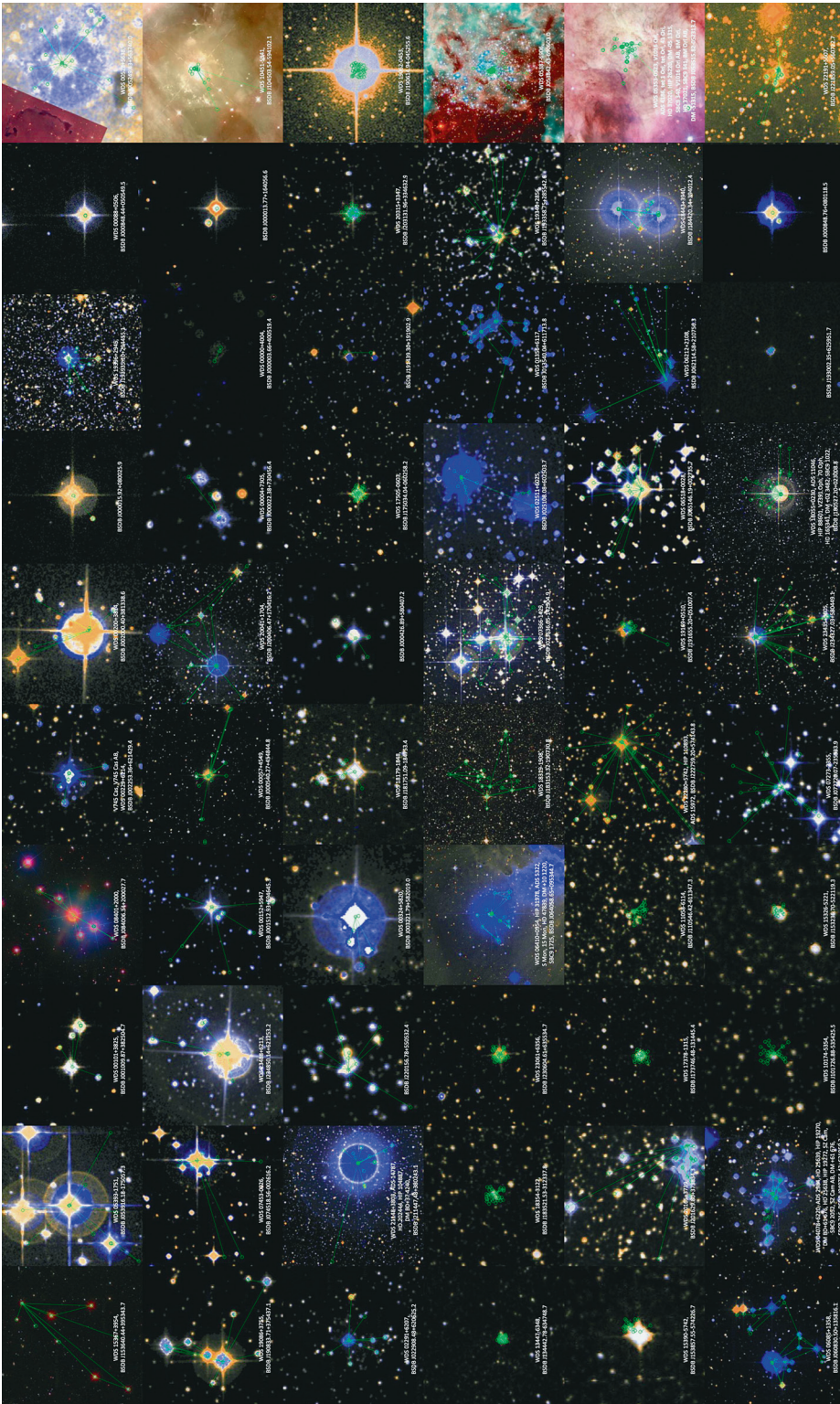
блеск которого периодически меняется из-за орбитального движения, приводящего к затмениям в системе), из спектроскопических наблюдений (орбитальное движение компонентов проявляется из эффекта Доплера – периодического смещения линий в спектре звезды), из рентгеновских наблюдений (регистрируется излучение от нагретого до сверхвысоких температур вещества, перетекающего с одного компонента на другой) и пр.

Комплексное исследование двойных звезд затруднено тем, что разные ансамбли двойных звезд, полученные с помощью различных методик наблюдения, а) исследуются, как правило, разными научными коллективами (таким образом, публикуемые списки – базы данных и каталоги – содержат сведения лишь о двойных определенного типа); и б) зачастую представляют весьма различные семейства в пространстве параметров.

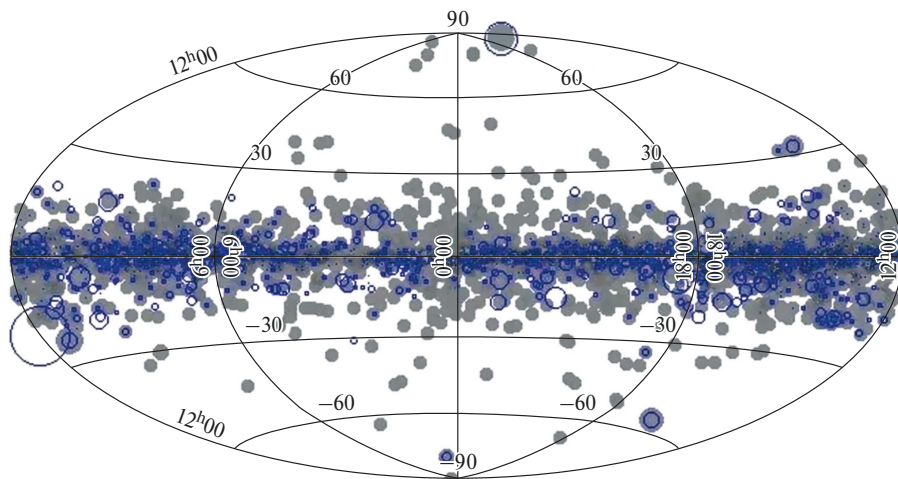
Помимо двойных систем в мире звезд существуют и кратные системы, содержащие три и более компонентов. Известны иерархические (гравитационно устойчивые) системы с кратностью до 6 и неиерархические (мини-скопления) с кратностью 20 и выше. Они являются ценным источником информации о звездных параметрах и процессе звездообразования и также требуют пристального внимания и тщательного изучения. Остается, в частности, открытым вопрос о том, почему не наблюдаются (теоретически возможные) иерархические системы с сотнями (или хотя бы с десятками) компонентов.

В рамках работ по теме «Российская виртуальная обсерватория» и в сотрудничестве с Безансонской обсерваторией Института UTINAM (Франция) в Институте астрономии РАН была создана База данных двойных и кратных звезд (BDB – Binary star DataBase; <http://bdb.inasan.ru>). Целью ее создания стало объединение информации из множества разнородных каталогов двойных и кратных звезд, а также разработка удобного инструмента для работы с данными каталогов (Земля и Вселенная, 2018, № 1).

Сегодня BDB содержит данные о 260 000 компонентах из 120 000 звездных систем всех наблюдательных типов (с кратностью от 2 и выше) из основных каталогов двойных и кратных звезд. Сделать запрос к BDB можно по идентификатору объекта либо по его параметрам (координаты, звездные величины, спектральный класс, орбитальные характеристики и др.). Количество двойных звезд в BDB должно существенно



Некоторые двойные и кратные системы, представленные в базе данных ВДВ (коллаж подготовлен В. Гриншпун)



В галактических координатах на рисунке показано распределение скоплений, исследованных в ходе глобального обзора MWSC (серые кружки, их размер отображает радиус наиболее плотной, центральной части скопления), и скоплений, исследованных и (частично) обнаруженных по данным Gaia в ходе обзора Cantat-Gaudin et al. (2020) (синие кружки)

возрасти в результате поиска пар с общим собственным движением в данных космической миссии Европейского космического агентства *Gaia*¹.

ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ

Звездные скопления – важная составляющая населения Галактики. Известно, что звезды рождаются в группах. Часть таких групп разрушается в процессе звездообразования, составляя, таким образом, население галактического поля; другие группы, относительно компактные, с массами в десятки, сотни, иногда тысячи масс Солнца и характерными размерами 1–10 парсек, постепенно разрушаясь, продолжают

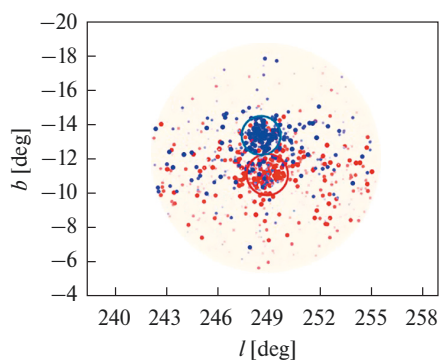
тем не менее существовать на протяжении десятков и сотен миллионов лет как рассеянные звездные скопления. Возраст же наиболее массивных и компактных звездных групп, шаровых звездных скоплений может превышать десять миллиардов лет; их радиусы составляют 10–25 парсек, а массы могут доходить до сотен тысяч и даже миллионов масс Солнца. Изучение характеристик звездных скоплений позволяет понять процессы звездообразования и динамической эволюции Галактики.

Звезды одного рассеянного скопления, как правило, имеют очень близкий возраст и начальное содержание химических элементов, и величину межзвездного поглощения для них можно считать примерно одинаковой в связи с тем, что характерные расстояния от Солнца до звездных скоплений Галактики (сотни, тысячи и даже десятки тысяч парсек) намного больше их собственных размеров. Для скоплений эти важные характеристики могут быть определены со значительно лучшей точностью, чем для каждой отдельной звезды.

¹ Космический телескоп *Gaia* запущен Европейским космическим агентством в 2013 г. с космодрома Куру (Французская Гвиана) с помощью ракеты-носителя «Союз» с разгонным блоком «Фрегат». С 2016 г. по настоящий момент были успешно опубликованы три релиза данных о примерно 1.8 млрд звезд Млечного Пути и ближайших карликовых галактик.

Наступление эпохи всенебесных фотометрических и астрометрических обзоров позволило астрономам перейти от исследований отдельных звездных скоплений к исследованию их популяции в целом. Так, сотрудники нашего отдела внесли значительный вклад в исследования рассеянных звездных скоплений нашей Галактики, в частности, в рамках масштабного проекта – однородного глобального обзора MWSC (Milky Way Stellar Systems), совместно с зарубежными коллегами (2012–2018).

В настоящее время значительный прогресс в обнаружении и изучении рассеянных звездных скоплений и звездных групп обеспечивается использованием результатов действующей астрометрической космической миссии *Gaia*. Высокоточные данные о положении звезд в пространстве и их скоростях позволили значительно повысить точность выделения членов рассеянных скоплений и определения их характеристик. В число научных коллективов, занятых поиском и исследованиями характеристик новых рассеянных звездных скоплений и звездных групп, а также исследованиями ранее известных скоплений на новом уровне точности, входят и сотрудники нашего отдела. В одной из работ мы демонстрируем, 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 от Солнца. Сотрудники нашего отдела исследуют движение скоплений в Галактике, занимаются поиском и анализом разрушающихся звездных групп – приливных хвостов рассеянных звездных скоплений, их корон, звездных потоков – остатков разрушенных скоплений. Пока оста-



Взаимное расположение наиболее вероятных членов скоплений Collinder 135 (красный цвет) и UBC7 (синий цвет) в галактической системе координат. Интенсивность цвета соответствует вероятности принадлежности к скоплению. Окружности очерчивают центральные области скоплений

ется неясным, какие характеристики рассеянного звездного скопления определяют время его жизни, характер и скорость его разрушения.

Данные *Gaia* дали толчок исследованиям групп скоплений, связанных общим происхождением, и, в частности, обнаружению ранее неизвестных пар скоплений. Мы занимаемся поисками и исследованием таких образований. Одной из целей этих исследований может быть поиск ответа на вопрос, часто ли звездные скопления взаимодействуют между собой и каков результат такого взаимодействия. 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 выполнено исследование свойств и эволюции двойной системы рассеянных звездных скоплений Collinder 135 и UBC7. Обнаружено, что эти два скопления могли образоваться одновременно 50 млн лет назад. В прошлом, вероятно, они были гравитационно связаны, но, потеряв

значительную часть своей массы в виде газа в ходе начальной эволюции, стали постепенно удаляться друг от друга.

ДИНАМИКА ГРАВИТИРУЮЩИХ СИСТЕМ

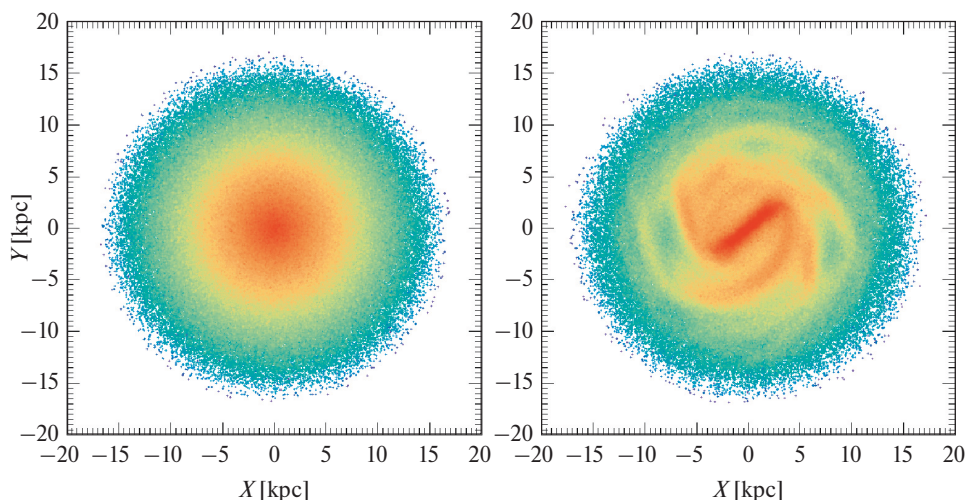
Отдел активно участвует в международных проектах по исследованию общих вопросов динамики гравитирующих систем. Наш большой опыт в теоретическом исследовании устойчивости вместе с самыми современными технологиями компьютерного моделирования, включая вычисления на графических ускорителях, дают плодотворные результаты.

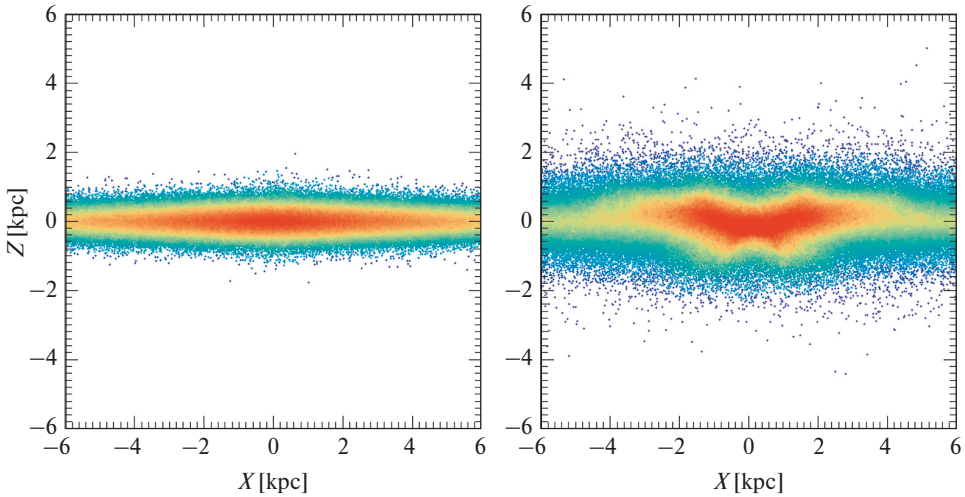
Одна из наших работ с зарубежными коллегами посвящена проблеме возникновения и поддержания перемычек (баров) в спиральных узорах в галактиках с каспом. Согласно существовавшим представлениям, очень плотный галактический балдж обязан подавлять образование бара. Численное моделирование, однако, показывает, что бар все-таки формируется. Удалось пока-

зать, что теоретические представления неприменимы для реалистичных моделей звездных дисков с конечной толщиной. Наличие плотного балджа в центре сильно затрудняет образование бара. Для того, чтобы этот процесс шел, звездный диск должен быть массивным. Этот факт позволяет предположить, что бар в таких галактиках образовался относительно недавно, уже после того, как в результате аккреции вещества и звездообразования диск стал достаточно массивным.

Формирование бара сопровождается изменением динамических характеристик звездного диска, прежде всего увеличением радиальной дисперсии скоростей звезд c_R . Это приводит к падению относительной вертикальной дисперсии c_z/c_R ниже критического уровня ($c_z/c_R \approx 0.6$). Становится возможным возникновение так называемой изгибной неустойчивости (buckling), вызывающей взрывной рост центральной области диска в вертикальном направлении, образование псевдобалджа и X-образной структуры.

Самопроизвольное образование в однородном по углу звездном галактическом диске (слева, вид сверху) бара и спиральных ветвей (справа). Численное моделирование выполнено с помощью GPU-кодов [13, 14], использующих графические ускорители



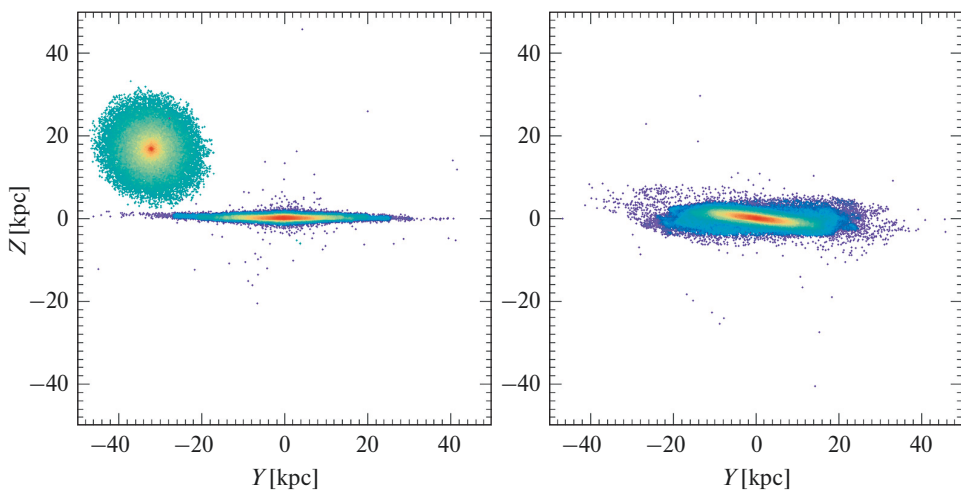


Галактический диск после образования бара (слева, вид сбоку) может испытывать очень быстрое вспучивание (*buckling*). Справа показан момент эволюции, в который диск оказывается максимально несимметричным относительно экваториальной плоскости Галактики. В дальнейшем распределение звезд становится симметричным и формируется так называемый псевдобалдж

Численное моделирование позволяет изучать сложные звездные системы, такие как взаимодействующие дисковые галактики и карликовые гало тем-

ной материи (последние в большом количестве предсказываются новейшими космологическими моделями, например, <https://www.tng-project.org/>).

Образование изгиба плоскости Галактики (*warp*, справа) в результате прохождения сквозь диск Галактики карликовой сферической Галактики (слева, вид сбоку). Численное моделирование проводилось в центре JSC (Юлих, Германия) и GPU-кластере Kepler (Гейдельберг, Германия)



Такие гало могут иметь массу порядка 10^{11} масс Солнца. В нашей работе мы исследуем возможное влияние таких гало или карликовых галактик на геометрию искривление диска спиральной галактики типа нашей Галактики Млечный Путь. На рисунке показаны гало, приближающиеся к диску (слева), и результат нескольких его прохождений в течение 4 млрд лет (справа). Центральная часть диска (до 15 килопарсек) сохраняет свою целостность, но начинает прецессировать в поле тяжести гало Галактики и пришедшего гало темной материи. В результате этой прецессии плоскость диска меняется и наблюдается изгиб в периферийной части диска (warp). Такое взаимодействие может также приводить к образованию звездных колец низкой плотности вне плоскости центрального диска Галактики, типа кольца Единорога.

Млечный Путь считается типичной для местной группы дисковой спиральной Галактикой. В отличие от ранних этапов своей эволюции на протяжении последних ~5–9 млрд лет она характеризуется относительно низким усредненным темпом звездообразования, около 1 массы Солнца в год, постепенно исчерпывающим газовый диск и увеличивающим массу звездного диска.

малой степени они были сформированы благодаря данным *Gaia*.

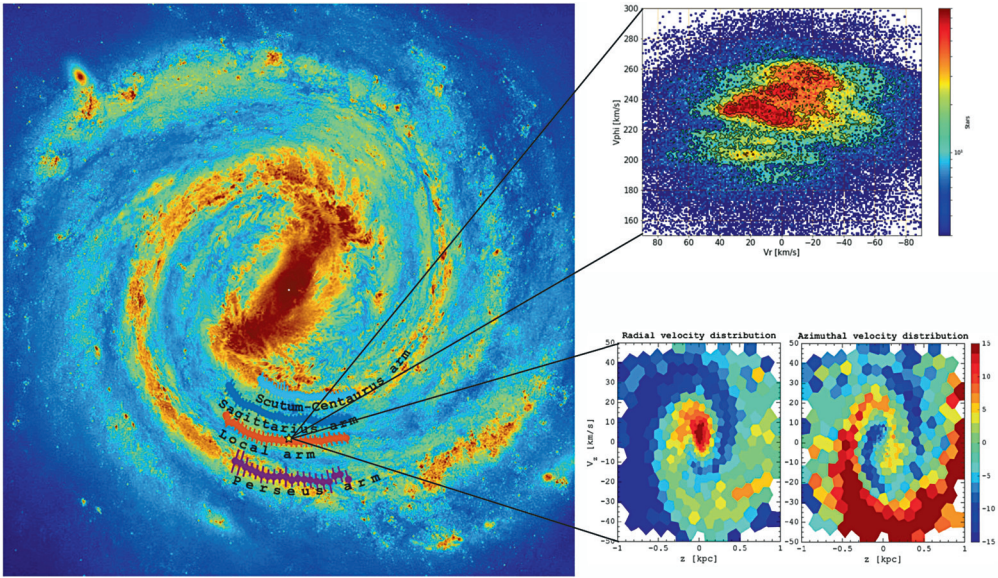
Млечный Путь считается типичной для Местной группы дисковой спиральной галактикой. В отличие от ранних этапов своей эволюции на протяжении последних ~5–9 млрд лет она характеризуется относительно низким темпом звездообразования, около 1 массы Солнца в год, постепенно исчерпывающим газ и увеличивающим массу звездного диска. Последний традиционно разделяется на две подсистемы: толстый и тонкий диски, заметно отличающиеся по возрастам, химическом составе, кинематике и пространственному распределению звезд. В результате продолжительных дебатов относительно

такого дуализма диска Млечного Пути принято считать, что толстый и тонкий диски сформированы в различные эпохи эволюции Галактики. Так, толстый звездный диск был образован в первые 2–3 млрд лет в режиме интенсивного звездообразования в турбулизованном толстом газовом слое. В свою очередь тонкий диск является результатом дальнейшего более спокойного звездообразования в течение последующих 8–9 млрд лет.

По различным прямым и косвенным признакам установлено, что во внутренней по отношению к Солнцу части Галактики имеется бар. В самом центре бар переходит в так называемый массивный псевдобалдж, обладающий сложной морфологией, напоминающей по форме арахис (boxu/peanut bulge). Современные данные указывают на доминирование этого компонента в центре Галактики, что практи-

НАША ГАЛАКТИКА МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ

Современная звездная астрономия переживает взрывное развитие благодаря успешной работе нескольких масштабных обзоров галактики Млечный Путь, таких как *RAVE*, *Gaia-ESO*, *LAMOST*, *APOGEE*, *Galah* и др. Среди них безусловным лидером в исследовании звездных населений Галактики является проект *Gaia*. Сегодня нам стали доступны для анализа положения в пространстве и скорости огромного числа звезд. Здесь мы дадим некоторые представления о строении Галактики. В не-



Слева: Иллюстрация морфологии Млечного Пути, где положение 4-х спиральных рукавов определено по данным Gaia. Справа: примеры особенностей фазового пространства в солнечной окрестности: движущиеся группы (сверху) и фазовая спираль (внизу)

чески не оставляет места для классического квазисферического балджа. За пределами бара по диску простираются тугозакрученные спиральные ветви, образующие многорукавный, вероятно нерегулярный, крупномасштабный спиральный узор. Современные измерения, в том числе и данные *Gaia*, указывают на наличие четырех основных спиральных рукавов, между которыми в последнее время были обнаружены несколько мелкомасштабных ответвлений.

На больших расстояниях от центра за Солнечным радиусом диск Галактики заметно искривлен в виде так называемого ворпа (warp), вероятно, являющегося результатом взаимодействия с ближайшими галактиками-спутниками Млечного Пути. Диск Галактики окружен звездным гало, которое, по современным представлениям, в основном состоит из звезд галактик, разрушенных при слиянии

с Млечным Путем на самых ранних этапах его формирования, около 9–10 млрд лет назад. Звездная компонента Галактики погружена в массивное гало темной материи, которое косвенно прослеживается до расстояний, в десятки раз превышающих размеры самого диска. Общую картину основных компонент Млечного Пути следует дополнить несколькими десятками галактик-спутников, оказывающих существенное влияние на динамическое состояние диска Галактики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В описанных выше разделах современной астрономии остается масса нерешенных и вместе с тем очень важных вопросов. Какова функция звездообразования двойных систем? Какие параметры являются фундаментальными при их образовании? Откуда при этом

берутся одиночные звезды? Имеем ли мы дело с двумя подсистемами с различными механизмами звездообразования (широкие и тесные двойные) или это одна система, искаженная эффектами селекции? Какова реальная кратность звездного населения? Сколько барионной скрытой массы содержится в двойных и кратных системах? Одинаковы ли законы, по которым образуются двойные звезды, для всей Галактики или они различаются от одной области звездообразования к другой, от звездного скопления к скоплению? Как эволюционирует популяция двойных звезд в скоплениях и в звездном поле?

Несмотря на кажущуюся цельность картины наших представлений о структуре и эволюции Млечного Пути, и здесь по-прежнему существует ряд вопросов, нуждающихся в ответе. В частности, до конца не выяснены причины перехода от режима формирования толстого диска к тонкому и что служит источником турбулентности на начальных этапах. По всей видимости, Млечный Путь не испытывал множества слияний с другими массивными галактиками, что несколько не согласуется со сценариями, предсказанными доминирующей космологической теорией Λ CDM, предполагающей основной рост галактик за счет слияний. На настоящий момент у нас нет никаких оценок времени формирования бара и X-структуры в центрах галактик. Обычно в динамических расчетах эволюции галактик типа Млечный Путь оба события происходят на относительно короткой шкале времени и разумно предположить, что бар в Галактике также сформировался довольно рано. Однако пока мы не можем ответить на вопрос, возник ли он на ста-

дии образования толстого или тонкого звездных дисков. Наконец, *Gaia* позволила рассмотреть кинематику Галактики в подробностях, никогда не доступных ранее. Оказалось, что звездный диск не находится в динамическом равновесии. Это проявляется в виде множества подструктур и особенностей в фазовом пространстве (комбинации координат и скоростей звезд). Пока мы только начали изучение этих новых особенностей диска нашей Галактики. Их понимание позволит нам лучше узнать процессы формиро-

вания и эволюции галактик в целом. Можно сказать, что *Gaia* произвела революцию наших представлений о структуре, кинематике и прошлом Млечного Пути. Нет сомнений, что следующие десятилетия будут эрой *Gaia* в звездной астрономии и динамике галактик.

Накопленный объем данных наблюдений за звездами Галактики и опыт

в построении теоретических моделей не оставляют сомнений, что в ближайшие годы нас ждет еще много замечательных открытий на пути исследования звездных систем во Вселенной.

Рекомендованная литература

1. Поляченко В.Л., Фридман А.М. Равновесие и устойчивость гравитирующих систем. М.: Наука, 1976.
2. Fridman A.M., Polyachenko V.L. Physics of Gravitating Systems I – Equilibrium and Stability N.Y.: Springer, 1984.
3. Космическая миссия Европейского космического агентства Gaia <https://www.cosmos.esa.int/gaia>
4. Kharchenko N.V. et al. Global survey of star clusters in the Milky Way. Astronomy and Astrophysics. 2012–2018 (серия статей).
5. Cantat-Gaudin et al. Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters. Astronomy and Astrophysics. 2020.

Можно сказать, что Gaia произвела революцию наших представлений о структуре, кинематике и прошлом Млечного Пути. Нет сомнений, что следующие десятилетия будут эрой Gaia в звездной астрономии и динамике галактик.

ОБОЛОЧКИ ГОРЯЧИХ ЮПИТЕРОВ — КЛЮЧ К ПОНИМАНИЮ ФИЗИКИ И ЭВОЛЮЦИИ ЭКЗОПЛАНЕТ

БИСИКАЛО Дмитрий Валерьевич,
член-корреспондент РАН, профессор

КАЙГОРОДОВ Павел Вячеславович,
кандидат физико-математических наук

ШЕМАТОВИЧ Валерий Иванович,
доктор физико-математических наук

ЖИЛКИН Андрей Георгиевич,
доктор физико-математических наук

Институт астрономии Российской академии наук

DOI: 10.7868/50044394821060050

Идея о том, что у далеких звезд могут быть планеты, восходит как минимум к Джордано Бруно, однако реальные доказательства их существования были получены не так давно. До этого момента предполагалось, что планетные системы должны быть более или менее похожи на Солнечную, с несколькими газовыми гигантами на довольно высоких орбитах и сравнительно небольшими каменными планетами, расположенными ближе к звезде. Тем не менее одна из первых открытых экзопланет совершенно неожиданно оказалась массой около половины массы Юпитера и на очень низкой орбите, примерно в 7 раз ближе к звезде, чем Меркурий к Солнцу. Позднее множество похожих планет было обнаружено у различных звезд, все они получили общее название «горячие юпитеры» (ГЮ).

Механизм их происхождения и эволюции до сих пор неясен. Принятые на настоящий момент космогонические теории предсказывают образование планет-гигантов только на высоких орбитах, где они могут аккрецировать достаточно вещества до исчерпания газа в протопланетном диске.

Чтобы оказаться на низкой орбите, ГЮ должен мигрировать в результате взаимодействия с другими массивными планетами и/или с газообразным диском. Также есть гипотеза, объясняющая формирование ГЮ аккрецией вещества протопланетного диска на каменные ядра – суперземли.

Интерес к ГЮ обусловлен прежде всего тем что в нашей Солнечной системе отсутствует аналог такой планеты, а также тем, что детальные характеристики атмосфер экзопланет в настоящее время можно определить из наблюдений в основном только для ГЮ. Также ГЮ проще обнаружить, чем планеты других типов, и их уже известно довольно много.

Как показали первые наблюдения транзитов ГЮ, эти планеты зачастую окружены весьма протяженными оболочками, оптическая плотность которых достаточна для обнаружения на фоне излучения звезды. Например, планета HD 209458b может блокировать только 1.8% света звезды во время затмения, но в линии Ly-alpha затмение может достигать 15%, кроме того, для некоторых ГЮ затмения в линиях начинаются намного раньше и закан-

чиваются намного позже, чем в континууме, что также свидетельствует о наличии протяженных газовых оболочек. Оболочки должны интенсивно взаимодействовать с родительской звездой, звездным ветром и самой планетой, при этом их свойства можно определить из наблюдений, что дает нам уникальную возможность получить дополнительную информацию как о них самих, так и о характеристиках ветров родительских звезд.

Кроме факта наличия протяженных оболочек ГЮ обладают целым рядом других интересных особенностей. Наличие протяженной атмосферы и газовой оболочки приводит к формированию большой переходной области (часть атмосферы, где числа Кнудсена¹ порядка единицы), что обуславливает значительную роль нетепловых процессов в физике атмосфер ГЮ. Близость к звезде означает наличие сильного приливного воздействия, что, как мы знаем по двойным звездам, может вызывать переполнение их атмосферами полостей Роша и формирование истечений через точки либрации.

В статье, предлагаемой вашему вниманию, мы попытаемся кратко осветить все аспекты, перечисленные выше, основываясь на результатах исследований, полученных в ИНАСАН в течение последних лет. Читателям, желающим более углубленно рассмотреть поставленные вопросы, реко-

мендуем прочесть нашу монографию [1] и недавний обзор, опубликованный в 2021 г. в УФН [2].

1. Верхние атмосферы горячих юпитеров – зона неравновесных процессов

В верхней атмосфере планеты выделяют две основные области: термосферу и экзосферу, а внутри них также ионосферу, содержащую электроны и ионы различного состава и концентрации. Помимо нагрева звездным жестким УФ-излучением структура и динамика

термосферы контролируются также ИК нагревом в ее нижних слоях, радиационным и столкновительным охлаждением, диссипацией энергии гравитационных² и планетарных волн, тепловыми приливами, высыпанием заряженных частиц. В экзосфере (называемой также планетной короной) столкновения практически отсутствуют. Экзосфера отделена от термосферы экзобазой, выше которой молекулы и атомы движутся практически свободно и могут, если им позволяет энергия, покидать планету.

Взаимодействие верхней атмосферы с излучением звезды и звездным ветром определяет важнейшие параметры – температуру атмосферы, а также скорость потери газа атмосферой. Существуют как тепловые процессы потери атмосферы (джинсов-

В верхней атмосфере планеты выделяют две основные области: термосферу и экзосферу, а внутри них также ионосферу, содержащую электроны и ионы различного состава и концентрации. Помимо нагрева звездным жестким УФ-излучением структура и динамика термосферы контролируются также ИК нагревом в ее нижних слоях, радиационным и столкновительным охлаждением, диссипацией энергии гравитационных и планетарных волн, тепловыми приливами, высыпанием заряженных частиц.

²Под «гравитационными волнами» здесь имеются в виду колебания атмосферы, аналогичные волнам на поверхности воды, а не волны гравитационного поля.

¹ Отношение длины свободного пробега к характерному размеру течения.

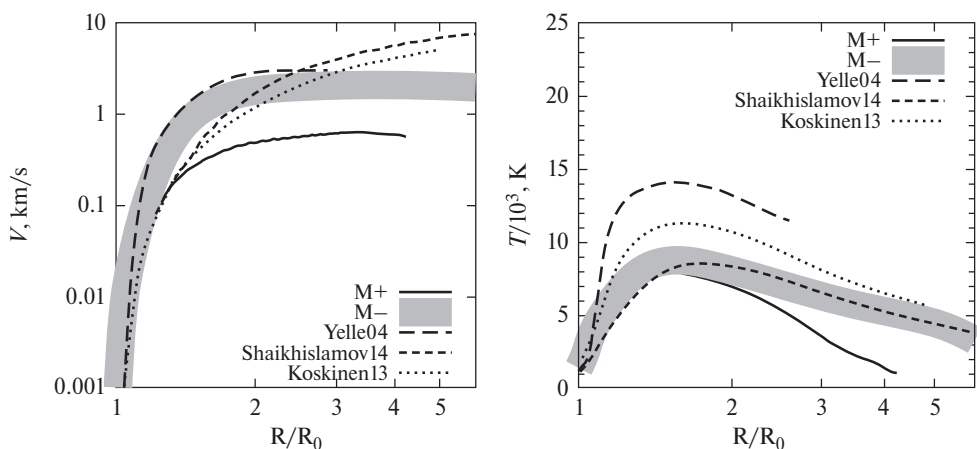


Рис. 1. Высотные профили скорости и температуры, полученные по результатам аэрономического моделирования для типичного ГЮ

ское убегание, планетный ветер), так и нетепловые, когда скорости убегающих частиц не зависят от температуры. Из тепловых процессов, ведущих к нагреву атмосферы, наиболее важными считаются нагрев жестким звездным излучением и нагрев за счет высыпания электронов в верхнюю атмосферу экзопланеты. Среди нетепловых процессов следует отметить диссоциацию молекулярного водорода, а также фотоионизацию атомарного водорода в верхних слоях термосферы.

Для исследования процессов нагрева нами была разработана самосогласованная аэрономическая модель верхней атмосферы ГЮ с учетом надтепловых фотоэлектронов. Для расчета переноса и кинетики фотоэлектронов в верхней атмосфере экзопланеты с преобладанием водорода и гелия использовалась модель Монте-Карло, адаптированная к водородным атмосферам. В модель включены ударные реакции и перенос надтепловых электронов в атмосфере. В модели решается одномерная сферически-симметричная адиабатическая система уравнений газодинамики на лагранжевой сетке.

Для расчета нами были выбраны параметры, соответствующие атмосфере планеты HD 209458b и солнечному звездному ветру. Спектр звезды в УФ-диапазоне принят равным спектру современного Солнца и пересчитанному для расстояния в 0.045 а.е. Поскольку модель одномерная, рассматривалось решение вдоль линии, соединяющей центры планеты и звезды. Были выполнены расчеты для двух моделей с учетом (M+) и без учета (M-) фотоэлектронов, результаты которых представлены на рис. 1. На рисунках показаны высотные профили температуры и скорости для атмосферного газа. Для сравнения на рисунках также представлены результаты из работ других авторов, которые обозначены на рисунках как модели Yelle04, Koskinen13 и Shaikhislamov14 соответственно. Как следует из полученных результатов, для корректного рассмотрения процессов нагрева атмосферы необходим детальный учет не только всех потоков энергии, преобразуемой в совокупности процессов атмосферной химии, но и учет энергии, переносимой в пределах верхней атмосферы посредством надтепло-

вых частиц – фото- и вторичных электронов. Именно такие модели позволяют более строго изучить космогонию образования и потери атмосфер экзопланет.

Как правило, течения в протяженных оболочках рассматриваются без учета давления излучения звезды. Однако, если оценить отношение силы давления излучения к силе гравитации для невозбужденного атома водорода в оболочке, можно показать, что эта величина близка к 1. Для оценки влияния давления излучения на динамику оболочек ГЮ нами было проведено трехмерное численное моделирование с учетом давления излучения. Как показали результаты расчетов, типичные солнечные параметры излучения не могут оказать значительного влияния на течение, однако во время вспышек интенсивность излучения звезды может возрастать на порядки, так что учет его влияния на оболочку может быть важен (см. раздел 4).

2. Газодинамика оболочек горячих юпитеров

Горячие юпитеры расположены близко к родительским звездам, и взаимодействие со звездой играет определяющую роль в формировании их оболочек. На больших высотах гравитацион-

ный потенциал уже не может считаться строго сферическим, а также необходимо учитывать дополнительные силы, связанные с движением планеты по орбите. Это приводит к тому, что протяженная оболочка ГЮ, расположенная выше экзобазы, имеет достаточно большие размеры, относительно высокую плотность и характеризуется значительными отклонениями от сферической формы.

Наличие раннего начала затмения, когда начало транзита в УФ-диапазоне опережает начало транзита в видимой части спектра, было впервые обнаружено у экзопланеты WASP-12b³. Это свидетельствует о наличии поглощающего вещества перед планетой на расстоянии примерно 4–5 ее радиусов. Нами была предложена идея о формировании квазистационарных оболочек вследствие взаимодействия истекающего с планеты вещества со звездным ветром.

Из условия баланса атмосферного давления и давления набегающего на планету потока звездного ветра можно определить положение точки лобо-

³ Fossati L. Metals in the Exosphere of the Highly Irradiated Planet WASP-12b // *ApJ*. Vol. 714, no. 2. P. L222–L227, 2010. DOI: 10.1088/2041-8205/714/2/L222

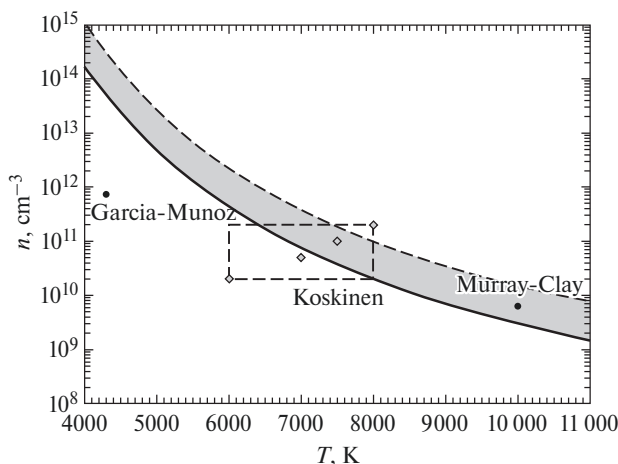


Рис. 2. Параметры атмосферы HD209458b (температура и концентрация вещества на фотометрическом радиусе), при которых атмосфера планеты может открытой (область выше штриховой линии), квазизамкнутой (область, закрашенная серым цветом) или замкнутой (область ниже сплошной линии). Точками и штриховым прямоугольником показаны значения, полученные разными авторами по результатам обработки наблюдений

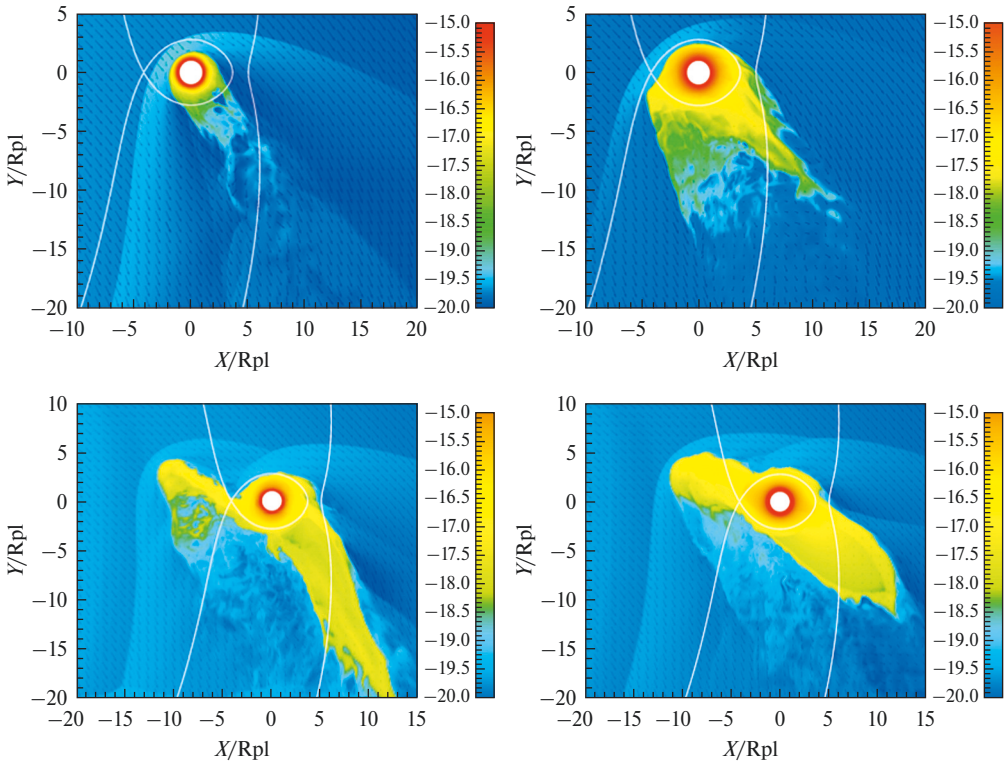


Рис. 3. Распределение плотности и скорости в оболочках разных типов – замкнутой (две верхние панели), квазизамкнутой (левая нижняя панель) и открытой (правая нижняя панель). Показана экваториальная плоскость системы. Белой линией обозначена эквипотенциаль Роша, проходящая через внутреннюю точку Лагранжа L_1

вого столкновения (ТЛС), через которую проходит граница между звездным ветром и атмосферой планеты. Если ТЛС лежит внутри полости Роша, то истечение отсутствует, поскольку атмосфера в таком случае не касается точек Лагранжа L_1 и L_2 . На рис. 2 сплошная линия разделяет области параметров полностью замкнутой (ниже линии) и истекающей (выше линии) атмосфер, рассчитанные для экзопланеты HD 209458b при параметрах звездного ветра, соответствующих солнечному. В области над сплошной линией могут формироваться истечения из окрестности внутренней точки Лагранжа L_1 . Такие истечения при определенных условиях могут быть остановлены динами-

ческим давлением звездного ветра. Для экзопланеты HD 209458b, если предположить солнечные параметры звездного ветра, остановка истечения должна происходить на расстоянии ~ 7 радиусов планеты от точки L_1 , что хорошо согласуется с данными наблюдений. На рис. 2 область параметров, где возможна остановка струи, заштрихована.

Нами были проведены численные расчеты для 4-х наборов параметров (показаны ромбами на рис. 2), соответствующих трем возможным типам оболочек (замкнутой, квазизамкнутой и открытой), а также для интересного промежуточного случая, когда атмосфера еще замкнута, но оболочка уже имеет несферическую форму. Резуль-

таты моделирования представлены на рис. 3. Как показало численное моделирование, темп потери массы атмосферой в квазизамкнутом случае незначительно отличается от темпа потери массы замкнутой оболочки, что позволяет объяснить стабильность оболочек множества наблюдаемых ГЮ, переполняющих свои полости Роша.

3. Влияние магнитного поля

ГЮ могут обладать собственным магнитным полем, которое также должно оказывать влияние на их протяженные оболочки. Оценки собственного магнитного поля ГЮ показывают, что оно, скорее всего, является достаточно слабым, их магнитные моменты должны быть порядка 0.1–0.2 от магнитного момента Юпитера. Следует отметить, что магнитное поле ГЮ может генерироваться не только в недрах, но и в верхних слоях атмосферы, а также из-за близкого расположения к родительской звезде ГЮ могут обладать наведенным магнитным полем, по аналогии с магнитным полем Венеры.

Мы провели численное моделирование течения в протяженных оболочках ГЮ в присутствии как (гипотетического) магнитного поля планеты, так и поля звездного ветра. Анализ пара-

метров известных экзопланет показал, что почти все ГЮ располагаются в так называемой субальфвеновской зоне звездного ветра родительской звезды, где скорость ветра меньше альфвеновской, при этом с учетом орбитального движения планеты скорость обтекания оказывается близкой к альфвеновской. Поэтому при небольших вариациях параметров системы может реализоваться как сверхальфвеновский, так и субальфвеновский режимы обтекания. Отметим, что в сверхальфвеновском режиме магнитосфера ГЮ будет содержать все основные элементы (отошедшая ударная волна, магнитопауза, магнитосферный хвост на ночной стороне и другие), присутствующие в магнитосферах планет Солнечной системы, а в субальфвеновском режиме головная ударная волна в структуре магнитосферы будет отсутствовать.

На рис. 4 показано распределение горячих юпитеров на двумерной диаграмме, где по горизонтали отложено магнитное давление, а по вертикали – динамическое давление звездного ветра. Отметим, что большинство планет на этой диаграмме образуют некоторую регулярную последовательность (нижний левый угол диаграммы). Эти планеты расположены достаточно далеко

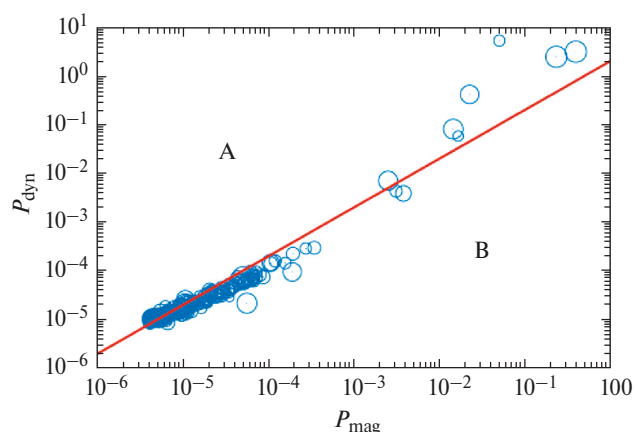


Рис. 4. Распределение ГЮ на двумерной диаграмме динамическое/магнитное давление ветра. Параметры планет взяты из базы данных сайта <http://www.exoplanet.eu>. Сплошная линия показывает положение альфвеновской точки солнечного ветра. Размеры кружков в логарифмическом масштабе соответствуют массам планет. Буквами обозначены: А – сверх-альфвеновская зона, В – субальфвеновская зона

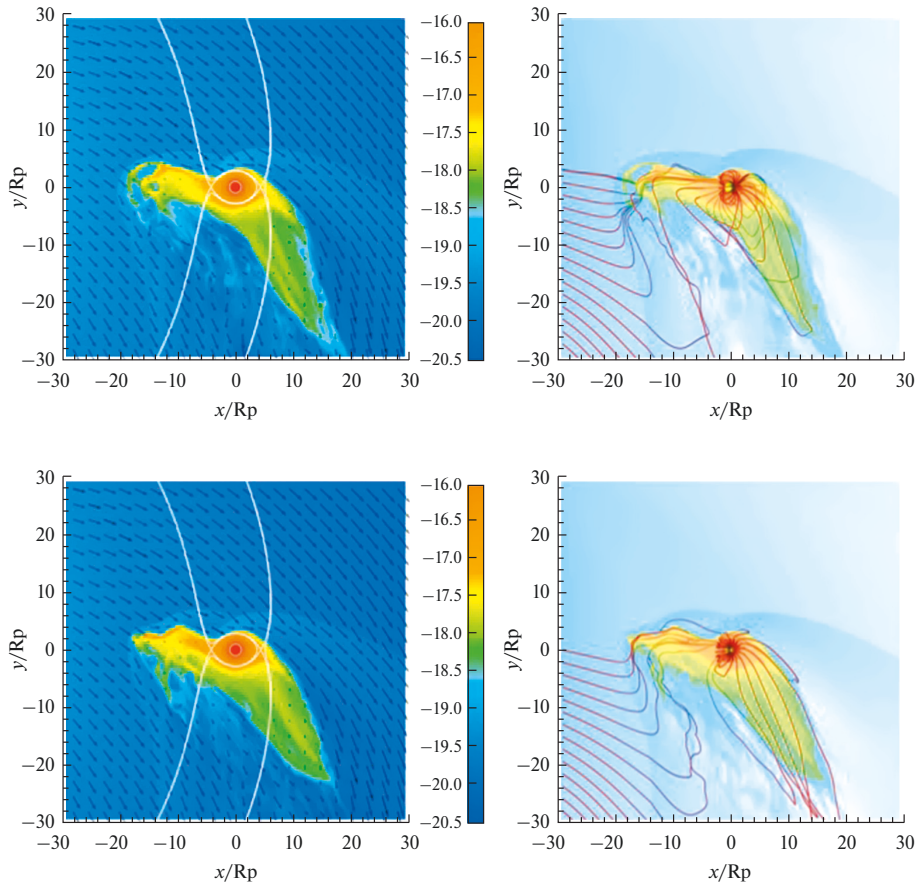


Рис. 5. Течение в квазизамкнутой оболочке в присутствии магнитного поля. Цветом показано распределение плотности в экваториальной плоскости системы, векторами – распределение скорости, красными линиями – силовые линии магнитного поля. Белой линией показана эквипотенциаль Роша, проходящая через точку L_1

от звезды, где зависимости плотности и скорости ветра от радиуса хорошо описываются степенными законами. Близкие к звезде планеты разбросаны на диаграмме весьма хаотично. Следует иметь в виду, что данное распределение получено для солнечного ветра в модели спокойного Солнца. При учете изменений в параметрах ветра положение ГЮ на диаграмме по отношению к альфвеновской точке может измениться как в ту, так и в другую сторону. Исходя из возможных соотношений между параметрами системы, нами

было выделено 9 возможных видов МГД-течений в оболочках, часть из них позднее была получена при трехмерном численном моделировании.

Течение при сверхальфвеновском режиме представлено на рис. 5. Качественно картина течения в окрестности горячего юпитера в данном случае вполне соответствует чисто газодинамической картине течения для квазизамкнутой оболочки, однако магнитное поле все же оказывает заметное влияние, поскольку затрудняет истечение через окрестность внутренней

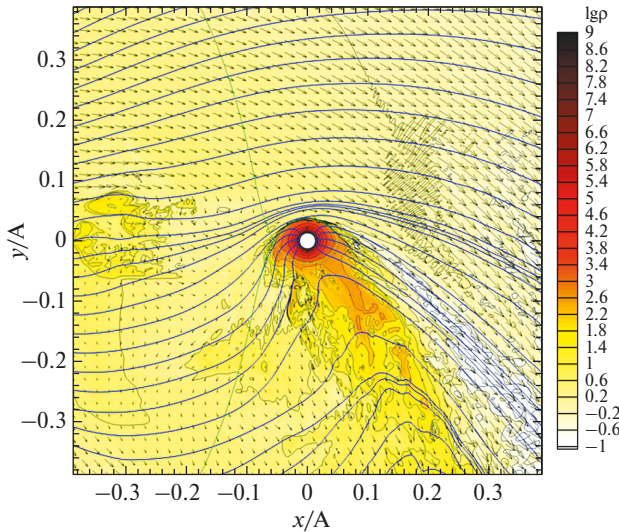
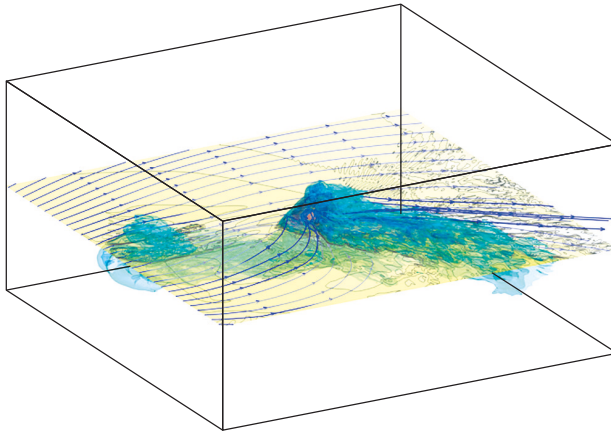


Рис. 6. Течение в оболочке при субальфвеновском режиме течения. Показано распределение плотности в экваториальной плоскости, трехмерные изоповерхности плотности (на нижней панели), вектора скорости и силовые линии магнитного поля

точки Лагранжа и для получения квази-замкнутой оболочки нужна более высокая плотность атмосферы, чем в чисто газодинамическом случае. Течение в субальфвеновском режиме показано на рис. 6. Как видно из рисунка, в этом случае отсутствует головная ударная волна, а магнитное поле ветра оказывается настолько сильным, что оно

препятствует свободному движению плазмы в экваториальной плоскости системы.

4. Влияние вспышечной активности звезды

Результаты космической миссии «Kepler» показали, что в среднем для солнечноподобных звезд вспышки, когда интенсивность излучения вырастает на ~ 2 порядка с характерной длительностью в полчаса, происходят раз в 500–600 лет. В то же время была обнаружена звезда солнечного типа, у которой такие вспышки происходят с частотой раз в 100 дней⁴. Очевидно, что столь значимая вспышечная активность должна оказывать существенное влияние на оболочки ГЮ.

Наиболее сильные возмущения солнечного ветра обусловлены выбросами вещества из солнечной короны, так называемыми корональными выбросами массы (КВМ). Средняя скорость и частота солнечных КВМ изменяются в зависимости от цикла солнечной активности. Даже для относительно спокойного

Солнца частота КВМ довольно высока и составляет от ~ 0.5 в день во время солнечного минимума до ~ 4 в день во время максимума солнечной активности.

⁴ Shibayama T., Maehara H., Notsu S., Notsu Y., Nagao T., Honda S., Ishii T.T. et al. 2013, ApJS, Vol. 209, P. 5. DOI: 10.1088/0067-0049/209/1/5

Для исследования влияния вспышек на атмосферы и протяженные оболочки ГЮ нами было создано и исследовано несколько численных моделей. Для моделирования нами был применен одномерный аэрономический код, включающий в себя расчет химии с 9-ю компонентами и 19 химическими реакциями между ними, а также учет нагрева надтепловыми и сверхтепловыми фотоэлектронами. Расчеты проведены для звездной сильной вспышки, при которой УФ-излучение звезды возрастает в 100 раз и остается неизменным в течение 24 минут. Локальный нагрев от вспышки приводит к образованию двух ударных волн, распространяющихся во внутрь и наружу атмосферы. Также нами было проведено трехмерное численное моделирование воздействия вспышки на протяженную оболочку ГЮ. Оказалось, что распространение возмущения в атмосфере длится намного дольше, чем сама вспышка: так, для вспышки средней интенсивности характерное время распространения возмущения до контактного разрыва атмосферы составляет ~5 часов, а потеря вещества планеты длится десятки часов.

Также нами было проведено трехмерное моделирование процесса прохождения КВМ через протяженную оболочку горячего юпитера с параметрами HD 209458b. Характеристики КВМ брались аналогичными солнечным на расстоянии, соответствующем орбите экзопланеты. На рис. 7 показан процесс

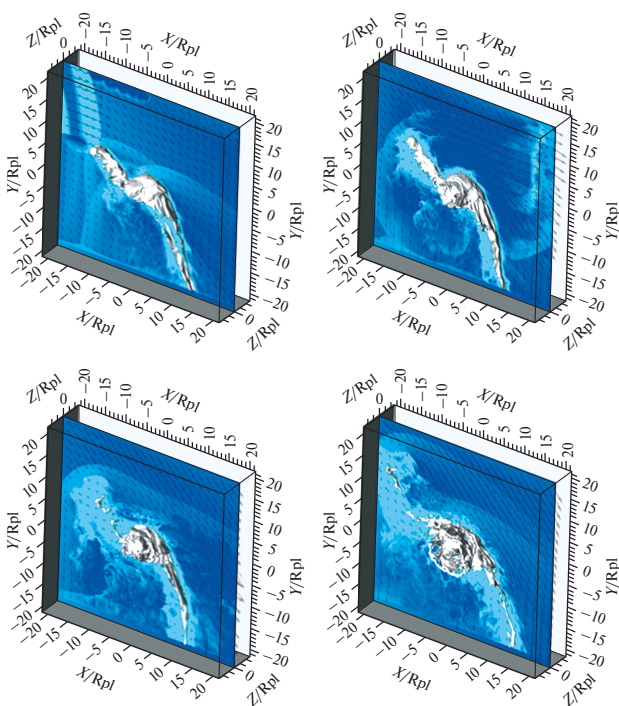


Рис. 7. Процесс разрушения оболочки корональным выбросом массы (вид течения для 4-х моментов времени). Показано распределение плотности в экваториальной плоскости (цветом), изоповерхность плотности (белым цветом), а также вектора скорости.

разрушения протяженной оболочки ГЮ при прохождении через КВМ. Для всех исследованных видов КВМ (в том числе слабых, взаимодействующих с планетой касательно) воздействие на течение оказалось примерно сходным – они приводили к полному разрушению оболочки. Это вполне предсказуемо, поскольку оболочка очень слабо связана с планетой гравитационно. В целом наши оценки показывают, что КВМ должны оказывать заметное (хотя и не определяющее) влияние на темп потери массы планетой, особенно на ранних стадиях, когда молодая звезда выбрасывает КВМ более часто.

Довольно интересный эффект может быть связан с возможным переключе-

нием режима МГД-течения при прохождении планеты через КВМ. Поскольку многие ГЮ располагаются в субальфвеновской зоне звездного ветра, скорость ветра оказывается меньше быстрой магнитозвуковой скорости и головная ударная волна перед планетой может отсутствовать. Для ГЮ, находящихся вблизи альфвеновской точки звездного ветра, даже относительно небольшие флуктуации его потока могут приводить к исчезновению или, наоборот, к появлению ударных волн вокруг планеты. Учитывая относительно высокую светимость головной ударной волны, эффект ее возникновения/исчезновения может быть обнаружен в ходе рентгеновских наблюдений в момент прохождения планеты через КВМ. Примером являются результаты наблюдений вспышки в системе CVSO 30⁵, где в жестком диапазоне было зарегистрировано кратковременное падение светимости через ~2.7 часа после начала вспышки, что можно связать с переходом течения вокруг горячего юпитера из сверхальфвеновского в доальфвеновский режим и исчезновением головной ударной волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования атмосфер и протяженных оболочек ГЮ начаты сравнительно недавно и к решению многих проблем подходы еще только намечены, поскольку до недавнего времени было довольно мало наблюдательных данных, связанных с атмосферами и протяженными оболочками ГЮ. Однако, ситуация постепенно улучшается –

⁵ *Czesla S., Schneider P.C., Salz M., Klocová T., Schmidt T.O.B., Schmitt J.H.M.M.* X-ray emission in the enigmatic CVSO 30 system // *A&A*. 2019. Vol. 629. DOI: 10.1051/0004-6361/201935351.

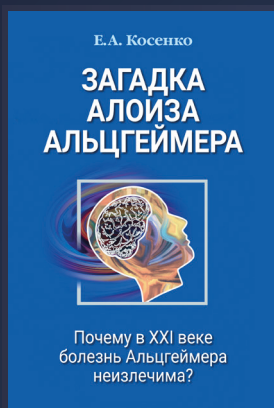
в настоящий момент действуют многообещающие наблюдательные программы с использованием как крупных наземных телескопов, так и телескопов космического базирования, а также планируется запуск новых миссий. За новыми наблюдениями всегда следует и развитие теоретических моделей, так что довольно скоро, в течение нескольких лет, можно ожидать новых открытий в этой области.

Наиболее интересным для человечества является вопрос о возможности существования жизни за пределами Солнечной системы. Исходя из этого, некоторые скептики считают, что исследования ГЮ ведутся по принципу поиска «под фонарем», так как в силу особенностей этого класса экзопланет существование каких-либо форм жизни на них невозможно, однако именно для них накоплен основной наблюдательный материал. Тем не менее сведения об оболочках ГЮ могут служить источником важной информации, необходимой для поиска внеземной жизни, так как вещество, выброшенное из их оболочек, может влиять на атмосферы землеподобных планет, если они присутствуют в этих системах. Кроме того, изучая оболочки ГЮ, мы опосредованно получаем множество ценнейшей информации о ветре их родительских звезд, данные, которые невозможно получить другими путями.

Рекомендованная литература

1. *Бисикало Д.В., Шематович В.И., Кайгородов П.В., Жилкин А.Г.* Газовые оболочки экзопланет – горячих юпитеров. М.: Наука, 2020.
2. *Бисикало Д.В., Шематович В.И., Кайгородов П.В., Жилкин А.Г.* Газовые оболочки экзопланет – горячих юпитеров // *УФН*. 2021. Т. 191, № 8. С. 785-845. DOI: 10.3367/UFNr.2020.11.038879.

С новыми книгами
Издательства “Наука”
вы можете ознакомиться на сайте
naukabooks.ru



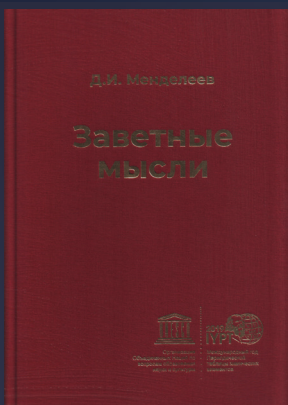
Косенко Е.А.

Загадка Алоиза Альцгеймера. Почему в XXI в. болезнь Альцгеймера неизлечима?

М.: Наука, 2019. — 319 с.

В монографии изложена актуальнейшая на сегодняшний день медико-биологическая проблема, связанная с болезнью Альцгеймера (БА), и предпринята попытка ответить на вопрос: почему заболевание, известное с начала XX в. и на изучение которого тратятся триллионы долларов, в настоящее время все еще остается неизлечимым, а имеющиеся антиамилоидные препараты приносят больше вреда, чем пользы? Для объяснения механизмов, лежащих в основе нейродегенерации при БА, формулируется «эритроцитарная гипотеза», согласно которой эритроциты рассматриваются не просто как клетки, переносящие кислород, а как клетки, от эндогенного метаболизма которых зависит адекватная доставка кислорода в ткани, и в частности в мозг. Именно функциональное несоответствие между эритроцитами и биоэнергетикой мозга, считает автор, лежит в основе гибели нейронов.

Книга может быть интересна широкому кругу читателей – студентам, обучающимся по специальностям «биология», «биомедицина», а также физиологам, биохимикам научно-исследовательских лабораторий, преподавателям высших образовательных медицинских и биологических учреждений.



Менделеев Д.И.

Заветные мысли.

М.: Наука, 2019. — 310 с.

Д.И. Менделеев в работе «Заветные мысли» рассуждает о желательных, на его взгляд, путях развития России в геополитической, экономической и научной областях. Круг анализируемых ученым вопросов чрезвычайно широк: государственное устройство, образование, народонаселение, внешняя торговля, взаимосвязь между просвещением и национальным богатством, баланс между промышленностью и сельским хозяйством и т.д. По существу, «Заветные мысли» – духовное завещание Д.И. Менделеева потомкам.

Для широкого круга читателей.



Аминов Р.З., Юрин В.Е., Егоров А.Н.

Комбинирование АЭС с многофункциональными энергетическими установками.

М.: Наука, 2018. — 238 с.

В работе предложен новый взгляд на повышение безопасности АЭС. Разработаны и исследованы многофункциональные системы, включающие такие установки, как дополнительная паровая турбина, тепловые аккумуляторы, водородный комплекс и газотурбинные установки, позволяющие обеспечить надежное электроснабжение собственных нужд АЭС в аварийных ситуациях с обесточиванием. Исследован способ использования остаточного тепловыделения реакторов типа ВВЭР для генерации электроэнергии, необходимой для отвода остаточного тепловыделения в аварийных ситуациях с полным обесточиванием. Разработана система уравнений и построены скелетные таблицы свойств диссоциированного водяного пара, которые позволяют проводить промышленные термодинамические расчеты параметров рабочего тела водородных циклов. Исследованы процессы сжигания водорода в кислородной среде, а также определены ресурсные показатели основного оборудования водородного энергокомплекса, работающего в циклических режимах.

Для научных работников, специалистов, аспирантов, студентов старших курсов теплоэнергетических специальностей.

naukabooks.ru

КОСМИЧЕСКИЕ ОПАСНОСТИ: БЛИЖНИЙ КОСМОС

ШУСТОВ Борис Михайлович,

член-корреспондент РАН,

Институт астрономии Российской академии наук

DOI: 10.7868/50044394821060062

Тема космических опасностей – яркий пример вечной борьбы между знаниями и заблуждениями. В статье приведена очень краткая справка по современному состоянию проблемы – другими словами, тот минимум, который нелишне знать о космических опасностях. Тема чрезвычайно многопланова. Она стала одним из важных направлений современной науки. В Институте астрономии РАН (ИНАСАН) направление изучения космических угроз является традиционным. Специфика института проявляется в том, что основные исследования ведутся по проблематике космического мусора (КМ) и астероидно-кометной опасности (АКО). В этой статье вниманию читателей предлагается ознакомиться с некоторыми интересными результатами недавних исследований, проведенных в ИНАСАН.

ЧТО НУЖНО ЗНАТЬ О КОСМИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЯХ

Людам свойственно проявлять любопытство ко всему, что так или иначе связано с опасностями, которые встречаются в жизни. Это обусловлено не только природным законом выживания, но и присущей *homo sapiens* яркой особенностью – воображением. Теме опасностей неоправданно часто отдают предпочтение средства массовой информации. На интересе к этой теме держится гигантская индустрия детективов и произведений в жанре ужасов и мистики.

С другой стороны, современная наука становится слишком сложной и узкоспециализированной. Люди, пытаясь понять окружающий мир, но не в силах воспринять строгие научные знания, часто заполняют мозг простой и яркой информационной чепухой и заблуждениями. Тема космических опасностей очень привлекательна, и заблуждений здесь особенно много.

Полагаю, что каждый профессиональный астроном и настоящий любитель астрономии должен разбираться в этом вопросе и по мере возможностей выполнять обязанности просветителя. В этой работе приведена минимальная сводка самых общих современных знаний по теме космических опасностей.

Развитие человеческой цивилизации сопровождается углублением понимания и мира, в котором мы живем, и самого человека. При этом выявляются новые, ранее неизвестные опасности (угрозы), к которым можно отнести и космические. Термины «угроза» и «опасность» по сути близки, но не тождественны.

Опасность – это неблагоприятный фактор природного, техногенного или социального происхождения. Опасность имеет потенциальный (возможный) характер. Угроза же – это опасность более конкретная по времени и месту. Например, для космической деятельности существует опасность, связанная с космическим мусором (КМ),

а время от времени появляются определенные угрозы столкновения международной космической станции с конкретными объектами КМ.

Наиболее важными космическими опасностями считаются следующие: КМ, астероидно-кометная опасность (АКО), опасности космической погоды (англ. *space weather hazards*), биологическая угроза, астрофизические опасности, а также космические военные угрозы. Мы не будем обсуждать здесь угрозы военного характера. Это, безусловно, важнейшая тема в наше не слишком спокойное время, однако она требует отдельного рассмотрения. Кратко охарактеризуем другие виды опасности, а затем подробнее остановимся на проблемах КМ и АКО.

1. *Космический мусор (КМ)* – техногенное засорение околоземного космического пространства, представляющее опасность сокращения или даже полного прекращения космической деятельности человечества. Дополнительную, но меньшую по масштабам, опасность представляет и метеорное вещество в околоземном космическом пространстве.

2. *Астероидно-кометная опасность (АКО)* – опасность, обусловленная возможными столкновениями Земли с малыми телами Солнечной системы (астероидами и кометами) с причинением крупного ущерба населению планеты вплоть до уничтожения цивилизации.

3. *Опасности космической погоды* – плохо прогнозируемые изменения активности Солнца, вызывающие резкие изменения в околоземном космическом пространстве и представляющие опасность серьезных потерь, прежде всего в сфере производственной деятельности (в энергетике, связи и др.).

4. *Биологическая угроза* – обусловлена как опасностью занесения на Землю внеземных (или земных, но изменившихся из-за пребывания в космосе)

форм жизни, так и выносом человеком различных организмов в космос с возможным «заражением» нашими формами жизни других тел Солнечной системы.

5. *Астрофизические опасности* – наиболее экзотический, но тем не менее реальный вид космических опасностей. Его связывают с возможностью различных катаклизмов: прохождением Солнечной системы через межзвездные облака (может привести к «смятию» солнечной магнитосферы и усиленной бомбардировке Земли космическими лучами, а также существенно повлиять на химические процессы в верхней атмосфере), вспышками близких сверхновых и т.д.

В принятой МЧС классификации чрезвычайные ситуации, связанные с КМ (и отчасти с биологическим заражением), имеют техногенный характер. Остальные носят природный характер.

На протяжении второй половины XX-го и начала XXI-го столетий человечество испытало серьезные проявления космических опасностей типов 1–3. По актуальности проблема «номер один» – это КМ. Практически ежедневно возникают ситуации неприемлемо высокого риска столкновения с КМ, хотя непосредственно сами столкновения происходят реже.

По масштабам возможных последствий наиболее катастрофической считается опасность типа 2, т. е. АКО, что связано с ее особенностями. Дело в том, что для этой опасности нет верхнего предела масштаба потенциального ущерба. Кроме того, относительная частота в сравнении с астрофизическими опасностями довольно высока. Однако действительно крупные события происходят очень редко. Так, столкновения типа Челябинского события 15 февраля 2013 г. происходят раз в несколько десятков лет, а столкновения, которые могут угрожать цивилизации, –

раз в несколько миллионов лет. Катастрофические проявления активности Солнца дают о себе знать раз в несколько десятков лет. Так, в последний раз крупный катаклизм отмечался в марте 1989 г. Это было Квебекское событие, сильнейшая геомагнитная буря, приведшая к масштабному отключению сетей электропитания в Северной Америке и к ущербу почти на миллиард долларов.

Реальных проявлений биологической опасности пока не наблюдалось, хотя ее вероятность с развитием космической деятельности повышается.

Далее, временная шкала астрофизических опасностей – миллионы и даже многие миллионы лет. Другими словами, с практической точки зрения астрофизическая опасность не представляет интереса, но зато вызывает большой интерес ученых и любителей науки.

Космические опасности вполне реальный и серьезный фактор. Как правило, большинство ненаучных источников преувеличивают уровень рисков, связанных с космическими опасностями. Главный принцип здесь – привлечь внимание, а затем выгодно его монетизировать. Знаменитая фраза Цицерона «*O tempora! O mores!*» (лат. «*О времена! О нравы!*») не теряет актуальности. Однако ответственные люди в правительствах ряда стран реалистично оценивают серьезность проблемы космических угроз (прежде всего типа 1–4). Такие опасности следует изучать, а также искать и развивать методы прогнозирования и парирования угроз, связанных с этими опасностями. Соответствующие программы ведутся в США, Евро-

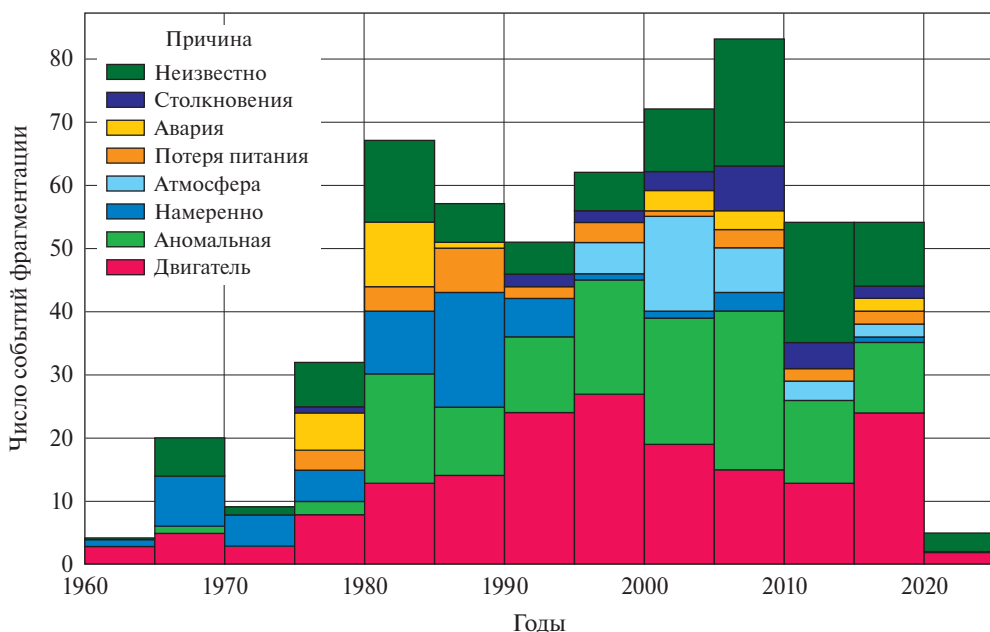


Одно из опасных последствий геомагнитной бури 13 марта 1989 года – выход из строя повышающего трансформатора на атомной электростанции в Нью-Джерси. Источник: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2010/26oct_solarshield

пейском союзе, других странах. В России наибольшее внимание со стороны государства уделяется проблеме КМ, несколько в меньшей степени – проблемам космической погоды и совсем незначительное – проблеме АКО. Для российских ученых эта тематика представляет огромный интерес, хотя с государственной поддержкой эффективность их работы была бы существенно выше. Некоторые интересные результаты недавних исследований, выполненных в ИНАСАН, описаны в конце двух следующих разделов, посвященных проблемам КМ и АКО.

КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР

Под космическим мусором (КМ) обычно подразумевают все неиспользуемые искусственные объекты. В основном это объекты в околоземном космическом пространстве, но в последние годы человечество начинает «мусорить» и в дальнем космосе: и на Луне,



Статистика разрушений (фрагментаций) на орбите по годам (пятилетним периодам). Рисунок адаптирован из отчетных материалов Европейского космического агентства (ESA). Показана динамика числа приведших к разрушению зарегистрированных событий на орбите и указаны причины разрушения. Источник: https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/static/eventCausesPerEY_abs.png

и на других телах Солнечной системы. Основной вклад в этот процесс вносят США, Китай и Россия. К объектам КМ относятся вышедшие из строя спутники, отработанные ступени ракет, а также фрагменты их распада вследствие столкновений и других причин.

Из отчетных материалов Европейского космического агентства (ESA) видно, что разрушения (фрагментация) в результате столкновений происходят в среднем раз в один-три года. Этот результат согласуется с данными Роскосмоса, согласно которым частота фатальных столкновений космических аппаратов с объектами КМ составляет примерно одно событие в полтора года.

Объекты КМ являются опасным фактором воздействия на функционирующие космические аппараты. В таблице приведена общепринятая классифика-

ция объектов КМ по размеру, отмечены возможные последствия столкновений и существующие методы защиты рабочих космических аппаратов. Данные взяты из материалов ESA, актуальных на начало 2021 года.

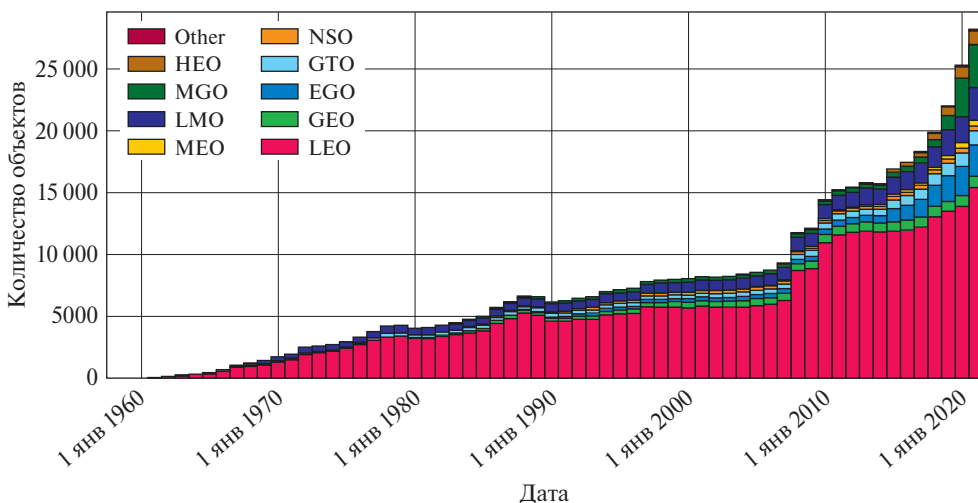
Количество обнаруживаемых объектов КМ постоянно растет. Однако пока мы в состоянии отслеживать только малую долю опасных объектов КМ. Этот факт характеризует наши возможности прогнозировать столкновения.

Согласно отчетным материалам ESA, наибольшее число наблюдаемых объектов находится в зоне низких орбит (на рисунке обозначены LEO), т. е. орбит высотой до 2000 км. На таких орбитах летает большинство искусственных спутников Земли (ИСЗ). Существенное число объектов КМ наблюдается на геостационарной, геосинхронных (GEO),

Таблица

Классификация объектов КМ

Класс объектов КМ по размеру	I 0.1–1 см	II 1–10 см	III > 10 см
Количество объектов на всех высотах	130 миллионов	900 000	34 000
Количество объектов на низких орбитах	20 миллионов	500 000	23 000
Прогнозируется движение (входят в каталог)	нет	малое число	примерно 25 000
Последствия столкновения с космическим аппаратом	возможно серьезное повреждение космического аппарата	серьезное повреждение или уничтожение космического аппарата	гарантированное уничтожение космического аппарата
Существующие методы защиты	применение защитных экранов	маневр уклонения	маневр уклонения



Динамика роста числа отслеживаемых в системе постоянного мониторинга объектов КМ, из отчетных материалов Европейского космического агентства ESA.

Источник: <https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/static/allEvoOrbCnt.png>

а также средневысоких (MGO, LMO) орбитах.

В связи с ожидаемым в ближайшем будущем резким ростом количества запусков коммуникационных «созвездий» спутников (международный термин *satcon* – от англ.: *satellite constellation*) для обеспечения глобаль-

ного Интернета, цифрового ТВ и др. ситуация с нарастанием количества опасных объектов КМ станет еще более серьезной. Такие коммуникационные ИСЗ планируются многими частными компаниями, например, *OneWeb* («созвездие» *OneWeb*), *SpaceX* (*Starlink*), *Amazon* (Проект *Kuiper*), *Samsung*,

Boeing, а также государственными организациями России (*Сфера*) и Китая (*Hongwan*). Процесс уже начался, и в ближайшие годы будут запущены десятки тысяч ИСЗ.

На первый взгляд парадоксально, но техногенный КМ, мешающий космической деятельности, образовался, образуется и будет образовываться в результате именно космической деятельности. Очевидно, что главная опасность КМ – это угроза столкновений с рабочими космическими аппаратами, которые могут приводить к выведению их из строя. Важно отметить, что столкновения в космосе способны не только вывести из строя рабочий космический аппарат, но и привести к резкому увеличению числа новых опасных объектов из-за его фрагментации. Невозможно обнаруживать и вести постоянный мониторинг всех малоразмерных, но все же опасных объектов КМ. Для анализа поведения этого огромного по численности населения КМ применяют модели, описывающие его структуру и динамику. Особенно важным элементом таких моделей является описание процесса «саморазмножения» населения КМ вследствие столкновений. Наиболее обсуждаемый сценарий этого процесса описал в конце прошлого века эксперт NASA Д. Кесслер (D. Kessler). Согласно самому неблагоприятному варианту этого сценария, при превышении некоторой критической концентрации объектов КМ, процесс «саморазмножения» (даже при прекращении дальнейших запусков) начинает нарастать, что грозит полной невозможностью какой бы то ни было космической деятельности. Поскольку мы отслеживаем лишь малую долю опасных объектов КМ, то пока не ясно, когда наступит ситуация, описываемая этим так называемым «синдромом Кесслера». Некоторые специалисты утверждают, что в отдельных,

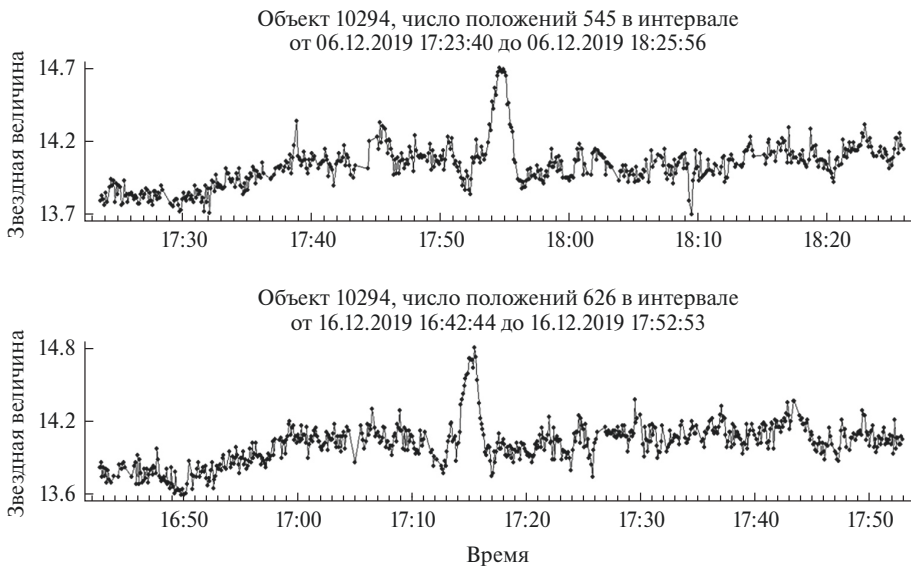
наиболее населенных областях околоземного космического пространства такая критическая ситуация уже наступила.

Проблема КМ пока еще далека от решения. Исследователи находятся на стадии ее интенсивного научного изучения. Можно выделить следующие основные аспекты проблемы:

1. обнаружение и мониторинг объектов КМ,
2. оценка рисков,
3. разработка методов предотвращения засорения и очистки околоземного космического пространства.

В России первая из перечисленных проблем решается в основном средствами Роскосмоса и партнерских организаций. Однако эти серийные средства – фактически служба – не могут тратить время на детальное изучение отдельных, хотя и важных аспектов. Здесь существенное значение приобретает помощь со стороны научных центров.

В связи с бурным ростом интереса к использованию малоразмерных космических аппаратов все большее внимание уделяется сложной и пока нерешенной задаче обнаружения и мониторинга совсем малоразмерных объектов (менее 5 см на низких орбитах и менее 10 см в области геосинхронных орбит). В 2020 году сотрудники ИНАСАН (Н.С. Бахтигараев, П.А. Левкина) показали, что для наблюдений на геосинхронных орбитах таких объектов особенно эффективны крупные астрономические телескопы. В обсерватории, расположенной на пике Терскол, 24 сентября 2020 года при помощи 2-м телескопа Цейсс-2000 впервые был обнаружен и наблюдался в течение двух ночей на геосинхронной орбите фрагмент КМ 20-й звездной величины (размер менее 10 см). В динамической базе космических объектов ИПМ им. М.В. Келдыша объект каталогизирован под номером 71 113. Интересно,



Кривые блеска объекта «Сирио-1» вблизи верхней кульминации, полученные 6 и 12 декабря 2019 года в Терскольской обсерватории в фильтре R

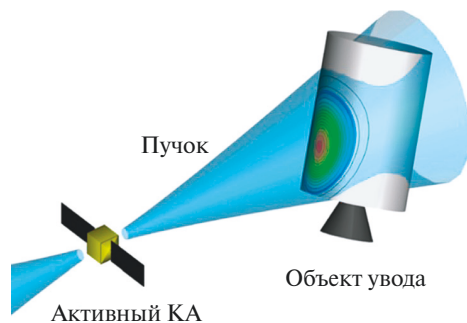
что этот фрагмент КМ имеет большое отношение площади к массе: $3.38 \text{ м}^2/\text{кг}$. Таким образом, были продемонстрированы потенциальные возможности крупных российских телескопов для решения важной проблемы, которая имеет фундаментальное и прикладное научное значение. Пока эти возможности используются недостаточно. Указанный коллектив ученых обнаружил и ранее не отмечавшееся необычное поведение некоторых КА. Например, у итальянского экспериментального спутника связи «Сирио-1», запущенного на геосинхронную орбиту в 1977 году и давно отработавшего свой срок, было обнаружено характерное изменение блеска с периодом, равным 24 часам звездного времени.

У «Сирио-1» было обнаружено характерное изменение блеска одинаковой амплитуды, одинаковой продолжительности, одинаковой формы с периодом, равным звездным суткам. В сентябре 2020 года такие же характерные изменения блеска повторялись на том

же участке орбиты. Причины такого странного поведения «мертвого» объекта пока не выяснены.

Другой пример относится к разработке методов предотвращения засорения и очистки околоземного космического пространства. Один из методов

Общая схема передачи импульса пучка частиц, излучаемого активным космическим аппаратом на объект увода с орбиты. Для стабилизации активного космического аппарата уравновешивающий импульс задается пучком, испускаемым в противоположном направлении



очистки заключается в изменении орбиты опасного тела путем воздействия на него пучка частиц.

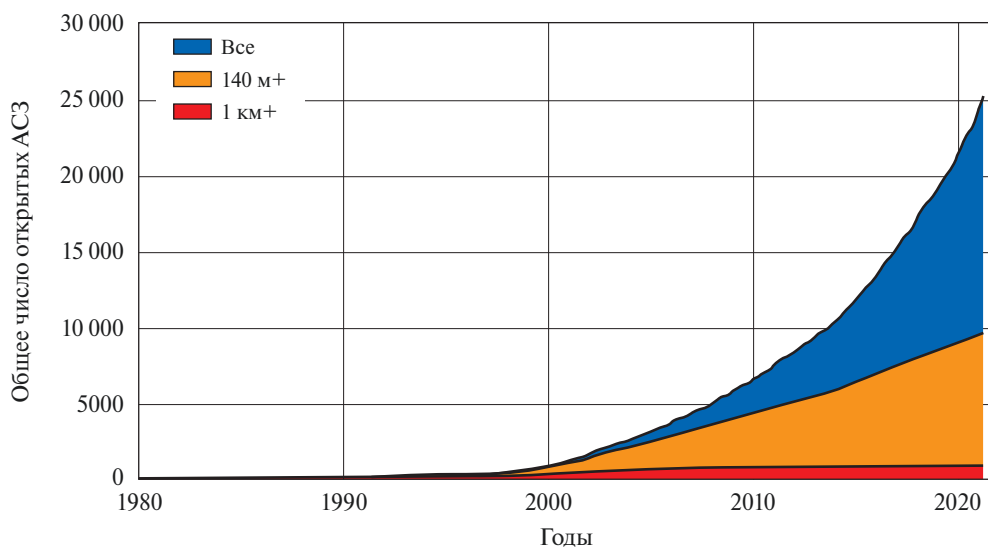
Обычно в научной литературе описание пучкового метода рассматривается в чисто кинетическом варианте. Это означает, что пучок частиц передает объекту увода свой импульс и таким образом меняет орбиту этого тела. Эффективность такого подхода ограничена запасом импульса частиц пучка. Интересный вариант увеличения эффективности был предложен физиками из ИЯФ СО РАН и проработан в ИНАСАН (М.Д. Сизовой и автором статьи). Так, было предложено использовать зависимость потери энергии частицы пучка от глубины проникновения в вещество. Выделение энергии пучка частиц происходит на некоторой глубине, зависящей от материала мишени и типа ионов. Этот эффект получил название «пик Брэгга». Выделение энергии в глубине тела может привести к разрушению и выбросу вышележащих слоев. Это означает, что мишень получит дополнительный импульс в направлении, перпендикулярном облучаемой поверхности.

АСТЕРОИДНО-КОМЕТНАЯ ОПАСНОСТЬ

Напомним читателю некоторые определения. Под объектами, сближающимися с Землей (ОСЗ, англ. *NEO – Near Earth Objects*), понимают астероиды и кометы, у которых расстояние в перигелии менее 1.3 а.е. Для астероидов, сближающихся с Землей, используют аналогичную аббревиатуру АСЗ (англ. *NEA*). В классе ОСЗ выделяют потенциально опасные объекты (ПОО, англ. *PNO – Potentially Hazardous Objects*), а для астероидов аналогично ПОА (англ. *PNA*), под которыми понимают тела, чьи орбиты сближаются с орби-

той Земли до минимального расстояния, не превышающего 0.05 а.е., т. е. 7.5 млн км. Основанием для того, чтобы считать такие тела опасными, является то обстоятельство, что 0.05 а.е. – это характерный масштаб области неопределенности орбиты малого тела (при прогнозировании примерно на сто лет вперед). К этому динамическому определению ПОО добавляют требование, чтобы абсолютная астероидная звездная величина астероида H тела не превосходила 22.0 (см., например, <http://neo.jpl.nasa.gov/neo/groups.html>). Заметим, что H – это некоторая искусственная величина, поскольку определяется как звездная величина астероида, наблюдаемого с расстояния 1 а.е. от Земли и от Солнца, при нулевом фазовом угле (нет эффекта фазы), но в реальной ситуации астероид при таких расстояниях не может наблюдаться при нулевом фазовом угле! Для некоторой (средней для астероидов) величины альбедо 0.15 размер сферического тела, имеющего $H = 22.0$ оценивается примерно в 140 м.

Как и в проблеме КМ здесь можно выделить три основных аспекта: обнаружение опасного тела, оценка риска столкновения и методы предотвращения катастрофического столкновения. До середины 1990-х годов обнаружение опасных тел осуществлялось астрономами либо в рамках ограниченных астрономических программ исследований астероидов и комет, либо случайно. Затем темп обнаружения ОСЗ резко возрос. Это связано с началом специальной программы «Космическая стража» (англ. *Spaceguard Survey*), которая получила финансовую поддержку со стороны Конгресса США. NASA поручалось приложить усилия к тому, чтобы в течение 10 лет открыть не менее 90% крупных (более 1 км) АСЗ. К концу 2009 года задача была выполнена. Это хорошая иллюстрация



Рост числа обнаруженных АСЗ согласно постоянно обновляющейся диаграмме с сайта JPL NASA. Источник: <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>

необходимости и эффективности государственной поддержки при решении таких важных задач.

Прогресс в открытии новых опасных небесных тел принято иллюстрировать хорошо известной и постоянно обновляющейся диаграммой с сайта JPL NASA.

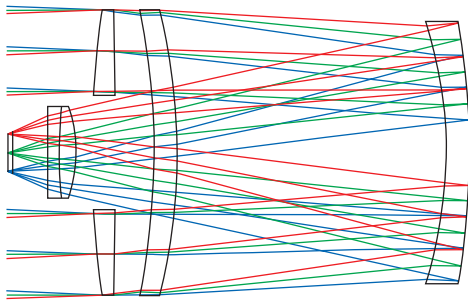
Согласно этой информации, на 11 марта 2021 года насчитывалось 25 299 АСЗ, из них потенциально опасных астероидов – 2173. Комет, сближающихся с Землей, насчитывается 113, но ни одна из них не является потенциально опасной. Из приведенных данных следует, что кометы составляют лишь малую часть опасных небесных тел. Из этих же данных можно сделать еще один важный вывод: доля обнаруженных АСЗ от общего числа АСЗ данного размера (оцениваемому из результатов моделирования населения малых тел Солнечной системы) сильно зависит от размера АСЗ. Так, для тел размером более 1 км она близка к 95%,

для АСЗ размером более 50 м (Тунгусское тело) – примерно 1%. Для объектов меньшего размера, например, Челябинского тела, доля обнаруженных объектов крайне мала.

В настоящее время более 98% открытий опасных небесных тел производится средствами США. Российские ученые и специалисты участвуют в международной кооперации по обнаружению опасных тел. К сожалению, вклад наших наземных средств, например, отдельных обсерваторий и сетей ISON и МАСТЕР (МГУ им. М.В. Ломоносова) пока весьма скромнен и не превышает 0.1% от общего числа открытий АСЗ¹.

Российские исследователи (в надежде на будущую программу Роскосмоса) прорабатывают перспективные средства наблюдений. Например, в 2020 году

¹ См. подробнее о поиске опасных астероидов статью Б.М. Шустова и С.А. Нароенкова «Найти опасный астероид, пока он не нашел нас» в журнале «Земля и Вселенная». 2018. № 4. С. 16–28.



Модифицированная оптическая схема широкоугольного телескопа апертурой 1 м

группа сотрудников ИНАСАН (А.С. Шугаров, В.Е. Шагин, А.С. Буслаева и автор статьи) продолжили работу по определению облика перспективного широкоугольного телескопа с апертурой 1 м и диаметром поля зрения до 5.7° . Телескоп планируется сделать серийным инструментом для развертывания глобальной сети из нескольких телескопов для круглосуточного контроля всего доступного неба (возможно, в рамках сотрудничества стран БРИКС). Оптическая схема телескопа основана на конструкции Зоннефельда и состоит из двухлинзового полноапертурного линзового корректора, внутренний элемент которого работает в двойном пути луча, 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. Все поверхности оптических элементов имеют сферическую форму, и в качестве материала для всех апертурных элементов выбрано недорогое стекло К8. Фокальная плоскость и предфокусный

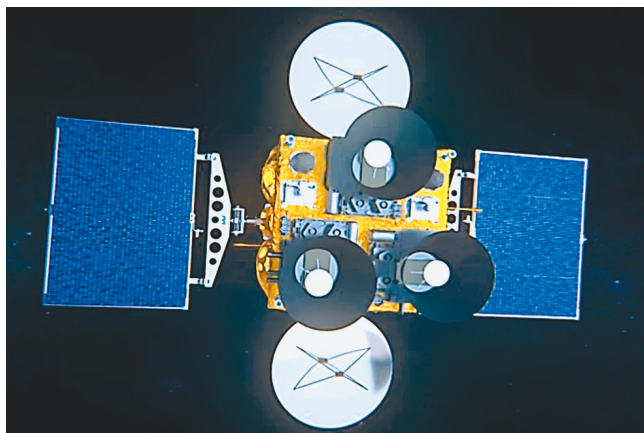
корректор расположены снаружи трубки для целей производства и технического обслуживания.

В ИНАСАН продолжаются работы по разработке перспективного проекта СОДА (Система Обнаружения Дневных Астероидов). Один или два космических аппарата с космическими широкоугольными телескопами апертурой 30 см на борту будут размещены в окрестности точки Лагранжа L1 (системы «Земля–Солнце») на расстоянии около 1.5 млн км от Земли.

Один такой аппарат будет способен каждые несколько минут осматривать конусный барьер вокруг Земли с проницанием до 17-й звездной величины и обеспечивать точность угловых измерений лучше $0.5''$ в режиме сопровождения объекта.

В 2020 году 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.

Вариант космического аппарата СОДА для обнаружения астероидов, приходящих с дневного неба



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Относительно недавно появившаяся в практике научных исследований тематика космических угроз, несомненно, будет расширяться и углубляться. Эта тема относится к разряду «вечных». Как уже понял внимательный читатель, угрозы (опасности) имеют разный масштаб и реализуются на разных временных шкалах. И хотя они неизбежны, не нужно впадать в состояние перманентной тревоги, но следует изучать эти опасности. Для их исследования и, что еще важнее, для выработки средств и методов парирования угроз, необходим синтез знаний из многих наук как естественных, так и гуманитарных.

Если читателей, особенно молодых, заинтересует эта тематика и (а почему бы и нет?) перспектива поработать в этой сложной и увлекательной области науки, предлагаем ознакомиться с некоторыми обзорами, приведенными ниже в рекомендуемом списке литературы.

Рекомендованная литература

1. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Ред. Б.М. Шустов и Л.В. Рыхлова. М.: Физматлит, 2010.
2. Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия / Ред. В.А. Пучков. ВНИИ ГОЧС, 2015.
3. Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы / Ред. Л.М. Зеленый и Б.М. Шустов. ИКИ РАН, 2019.
4. О роли науки в изучении и парировании космических угроз // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 8. С. 777–799.

ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА 1727
naukapublishers.ru

ЭКСКЛЮЗИВНЫЙ ПЕРЕПЛЕТ

Рисунок на коже
Все виды тиснения
Кожанный переплет
Рельефное тиснение
Клише любой сложности
Полноцветная роспись обзоров

А также адресные папки, дипломы, футляры

Берёмся за работы любой сложности!
По всем интересующим вопросам пишите на почту kiseleva@tnauka.ru

реклама

МЕЖЗВЁЗДНАЯ ПЫЛЬ — МЕЖДУ СВЕТОМ И ТЬМОЙ

ВИБЕ Дмитрий Зигфридович,

доктор физико-математических наук

КИРСАНОВА Мария Сергеевна,

кандидат физико-математических наук

Институт астрономии Российской академии наук

DOI: 10.7868/50044394821060074

Космическая пыль – неотъемлемая составляющая межзвездной среды наряду с межзвездным газом и различными полями. Для понимания явлений, происходящих в космосе, астрономам необходимо знать свойства пылинок, так как на любой объект Вселенной мы смотрим через пылевую завесу. Ядра пылинок, которые состоят из соединений углерода и кремния, покрыты ледяными мантиями из замерзшей воды и других молекул. Наблюдательные методы наземной астрономии позволяют определить состав ледяных мантий и тугоплавких ядер силикатных пылинок. Однако добраться до состава ядер углеродных пылинок гораздо сложнее, поскольку их излучение можно наблюдать в ограниченном классе объектов. Такие наблюдения ведутся, в частности, в практически недоступном с Земли среднем и дальнем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн в фотодиссоциационных областях (ФДО). Последние представляют собой области в космосе, которые являются переходными между ионизованным и молекулярным газом.

Таким образом, планирование каждой внеатмосферной ИК-обсерватории идет параллельно с интенсивными теоретическими исследованиями углеродной пыли. В Институте астрономии РАН (ИНАСАН) решаются задачи моделирования ФДО, проводятся иссле-

дования микрофизических процессов эволюции пыли в ФДО, а также ведутся наблюдения ФДО на российских и зарубежных телескопах.

ВВЕДЕНИЕ

За столетия существования науки астрономии были найдены ответы на многие вопросы об устройстве и эволюции Вселенной. Однако важные аспекты существования Вселенной, в том числе и нас с вами, по-прежнему остаются непроясненными. Одним из таких в буквальном смысле слова «темных пятен» является космическая пыль. Важность пыли в том, что ее свойства необходимо знать и учитывать, даже если она сама по себе не представляет интереса в рамках конкретной астрономической специализации. Дело в том, что на большую часть Вселенной мы смотрим через завесу пылинок, которые заполняют пространство не только между звездами, но и между галактиками. Почти во всех исследовательских задачах астрономы вынуждены отделять свойства наблюдаемого объекта от свойств пылинок, попавших на луч зрения. Сложность заключается в том, что эти свойства до сих пор известны с большой неопределенностью. Кроме того, свойства

меняются от направления к направлению и от объекта к объекту.

Разумеется, в астрономии пыль рассматривается не только как помеха в наблюдениях; она интересна и сама по себе. В ИНАСАН на протяжении многих лет ведутся исследования одного из важнейших компонентов космической пыли – частиц, состоящих из различных соединений углерода. Эти частицы вносят существенный вклад в межзвездное ослабление света в ультрафиолетовом УФ-диапазоне и в межзвездное излучение в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Кроме того, частицы из соединений углерода являются одним из основных «резервуаров» этого химического элемента и в целом представляют собой важную составляющую общей эволюции органического вещества во Вселенной.

Пылинки из соединений углерода, излучающие в ИК-диапазоне, часто называют полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ), хотя на самом деле они, скорее всего, обладают более сложной структурой. Дело в том, что в «чистом виде» макромолекулы ПАУ представляют собой плоские образования из бензольных (ароматических) колец. Реальные же космические частицы объединяют в себе не только ароматические, но и алифатические связи, не только атомы углерода и водорода, но и другие атомы, например, атомы кислорода, азота, железа. На данный момент все еще нет единого мнения о том, что именно представляют собой космические углеродные пылинки. Они могут являться изолированными молекулами ПАУ, кластерами ПАУ, а также аморфными пылинками, которые сочетают в себе

ароматические и алифатические связи и, возможно, перенасыщенные углеродом. Эти частицы могут оказаться даже углеродными сферами (фуллеренами) и углеродными трубками.

Как разобраться в многообразии видов космических углеродных пылинок? Так, чтобы узнать состав предмета исследования, который непосредственно находится перед нами, в лабораторных условиях, следует «разобрать его на части» доступным способом. По аналогии, чтобы узнать состав предмета исследования в космосе, нужно найти там та-

кие области, где этот предмет разрушается внешними факторами. Одним из таких мест являются ФДО.

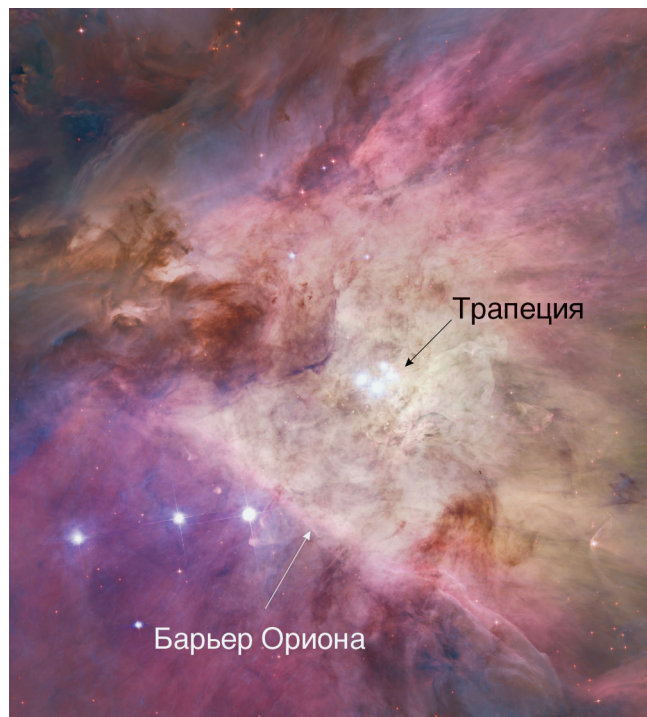
ФОТОДИССОЦИАЦИОННЫЕ ОБЛАСТИ – ЕСТЕСТВЕННЫЕ ЛАБОРАТОРИИ

В пространстве между звездами Галактики существуют газопылевые сгустки – молекулярные облака. Их основной компонент (примерно 72% по массе) – это молекулы самого распространенного элемента во Вселенной водорода H_2 . Однако помимо молекул H_2 в молекулярных облаках в значимом количестве (до сотых долей процента) встречаются и многие другие молекулы. В спокойном состоянии молекулярные облака холодны, их температура составляет десятки, а иногда и единицы кельвинов (К)¹. В таких облаках никакого разрушения пылинок не происходит. Более того, происходит скорее обратный процесс: пылинки растут за

¹ Напомним, что температуре 0 К соответствует температура примерно -273 °С.

счет молекул, примерзающих к их поверхностям. Однако молекулярные облака недолго остаются спокойными. В них начинают формироваться звезды, причем массы некоторых из этих звезд превышают массу нашего Солнца в десятки раз. Такие звезды горячи: их температуры измеряются десятками тысяч К. Последнее означает, что излучение таких звезд в изобилии содержит УФ-фотоны, которые способны не только диссоциировать молекулы водорода («разрывать» их на атомы), но и ионизовать атомы («отрывать» от них электроны), которые образуются в результате диссоциации. Таким образом, вокруг звезды начинает формироваться объект, называемый областью или зоной ионизованного водорода (для краткости такую область обозначают НII).

Фрагмент туманности Ориона, известный как область Гюйгенса, включает в себя одну из самых известных ФДО – Барьер Ориона. Источник: <https://hubblesite.org/content/media/images/2006/01/1826-Image.html>



Энергия фотонов, излучаемых звездой, настолько велика, что ее с избытком хватает не только на ионизацию водорода в этой области, но и на его нагрев. Температура в области НII возрастает до 10 тыс. К, и область начинает расширяться из-за существенной разницы давлений с окружающим холодным молекулярным газом. Переходная область между ионизованным и молекулярным газом и называется фотодиссоциационной областью.

Фотонов, способных ионизовать водород, в ФДО нет, так как все они «израсходовались» на ионизацию водорода по пути от звезды к ФДО. Однако в потоке излучения по-прежнему присутствует большое количество фотонов с энергией менее 13.6 эВ. Этой энергии недостаточно для ионизации водорода, но все еще достаточно для ионизации углерода, серы, кремния и для диссоциации H_2 и других молекул, в первую очередь молекул оксида углерода (CO). Вполне возможно, что в ФДО происходит фоторазрушение не только простых соединений, но и более крупных углеродных частиц ПАУ.

Одна из наиболее известных ФДО – Барьер Ориона (*Orion Bar*). Она представляет собой часть большей области ионизованного водорода М42 (туманность Ориона). На снимках в видимом диапазоне Барьер Ориона выглядит как светлая полоса. С юго-востока эта полоса ограничивает самую яркую часть М42, в которой звезды скопления Трапеция освещают поверх-

ность гигантского молекулярного облака Орион А. Именно там располагаются Главный ионизационный фронт и связанная с ним ФДО, которые ориентированы перпендикулярно лучу зрения. Однако вблизи Барьера Ориона поверхность облака изгибается почти на 90° в сторону наблюдателя и становится параллельной лучу зрения. В результате мы смотрим почти вдоль стенки (собственно «барьера») области НII, что позволяет видеть ФДО в разрезе, в деталях наблюдая, как горячий ионизованный газ области НII взаимодействует с холодным молекулярным веществом. Наиболее яркая звезда Трапеции имеет спектральный класс O7. Барьер Ориона находится

от нее на расстоянии меньше парсека, поэтому поток УФ-квантов в ФДО очень высок: он превышает среднее межзвездное УФ-поле в 100 тыс. раз.

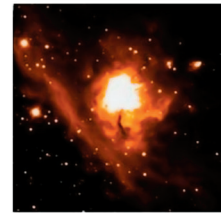
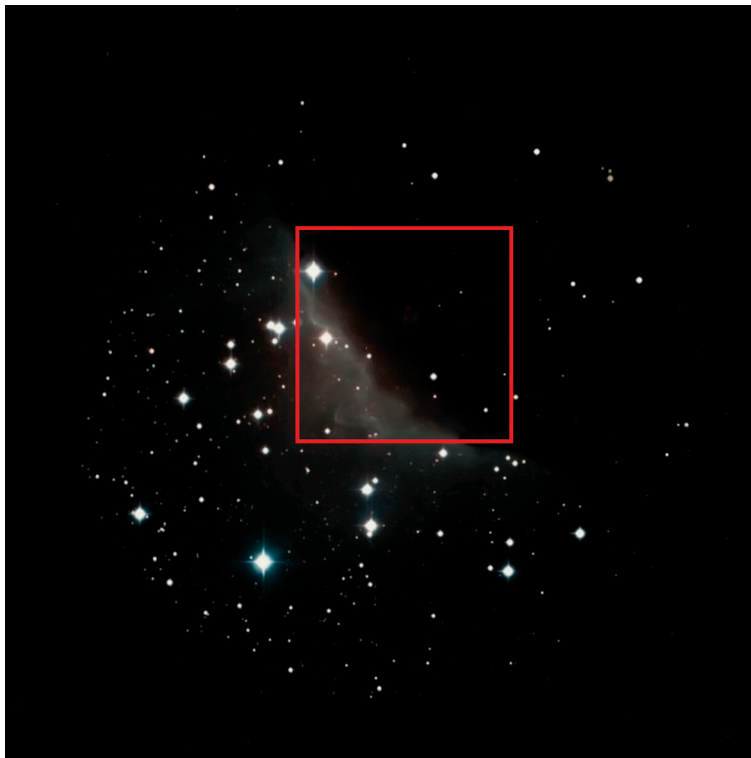
Еще один хорошо известный объект в созвездии Ориона представляет собой ФДО – это туманность Конская Голова, точнее, ее «холка». Ионизирующая звездная система (в данном случае это кратная система σ Ориона) не столь ярка по сравнению с Трапецией и находится дальше от границы области НII, чем Трапеция от Барьера Ориона, поэтому поле излучения здесь не такое сильное. Его интенсивность превышает интенсивность среднего межзвездного поля «всего» в 100 раз. Различия в параметрах делает Конскую Голову и Барьер Ориона удобными объектами для сравнительного анализа поведения вещества в различных физических условиях.



В известной туманности Конская Голова тоже есть ФДО. Она порождается излучением звездной системы σ Ориона. Источник: <https://www.eso.org/public/images/eso0202a/>

Конечно, существуют и другие ФДО, поскольку они возникают практически везде, где происходит взаимодействие УФ-излучения и молекулярного вещества. Например, совместно с коллегами из САО РАН мы исследуем двойную ФДО Sh2-140. Помимо яркой протяженной ФДО, хорошо различимой на оптических снимках, внутри темного молекулярного облака находится компактная ФДО, образованная более молодыми звездами. Однажды они освободятся от окружающего вещества родительского молекулярного облака и станут видимыми в оптическом диапазоне. Пока же компактную ФДО в Sh2-140 можно наблюдать лишь в ИК- и субмиллиметровом диапазонах.

Распространенность ФДО и богатый набор происходящих в них физико-химических процессов приводит к необходимости разрабатывать адекватные



Слева: светлые волокна представляют собой ФДО на области III Sh2-140 в созвездии Цефея. Снимок получен Е.А. Малыгиным и Е.С. Шабловинской на 1-метровом телескопе САО РАН с помощью прибора MAGIC в рамках совместных исследований с ИНАСАН.

Справа: изображение области, выделенной красным прямоугольником, в ближнем ИК-диапазоне. Также видна компактная ФДО в Sh2-140. Снимок получен А.М. Татарниковым на ИК-камере 2.5-метрового телескопа КГО ГАИШ МГУ

по сложности физико-химические модели, которые должны объяснять наблюдаемые свойства ФДО и в идеале показывать перспективные направления для постановки будущих наблюдательных задач.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЗАПЫЛЕННЫХ ФДО

В ИНАСАН моделирование взаимодействия молодых звезд с родительскими молекулярными облаками имеет долгую историю, восходя к работам, посвященным «звездам-коконам»

(Б.М. Шустов с соавторами). В настоящее время мы продолжаем исследования в этом направлении, уделяя особое внимание динамической картине эволюции пыли в окрестностях массивных звезд.

Есть несколько причин полагать, что области НП и ФДО на их границах необходимо рассматривать в движении. «Стандартная» картина ФДО, в частности, разработанная еще в 1980-е годы Александром Тиленсом и Дэвидом Холленбахом, предполагает для них следующее устройство. С «внешней» стороны ФДО ограничена молекулярным облаком, с внутренней – областью НП.

Протяженность ФДО измеряют не в «линейных» единицах (сантиметрах, парсеках и пр.), а в единицах ослабления света A_V (измеряется в звездных величинах, m). Это удобно, поскольку структура ФДО определяется не геометрической толщиной области, а распределением вещества в ней и тем, как это вещество поглощает излучение ионизирующих звезд.

В системе единиц, связанной с ослаблением света, в стационарном случае переход от ионизованного водорода к атомарному происходит на интервале A_V от 0^m до 0.1^m . Затем на A_V порядка 2^m расположен следующий важный переход – от атомарного водорода к молекулярному. Температура газа в этой области спадает примерно до 1 тыс. К (от 10 тыс. К в области III). Наконец, там, где величина ослабления света достигает примерно 4^m , в молекулярную форму переходит углерод C. До этого предела основной формой углерода является ион C^+ . Потенциал ионизации углерода несколько ниже, чем у водорода, поэтому даже внутри довольно глубоких слоев ФДО углерод остается ионизованным. Однако на A_V порядка 4^m сильно снижается не только количество фотонов, способных ионизовать атом углерода, но и количество фотонов, способных диссоциировать молекулу оксида углерода CO. После этого предела газ становится преимущественно молекулярным в отношении всех наиболее распространенных элементов. Когда ослабление света превышает 10^m , внешнее УФ-излучение в среде практически отсутствует; здесь ФДО заканчивается и начинается холодное молекулярное облако.

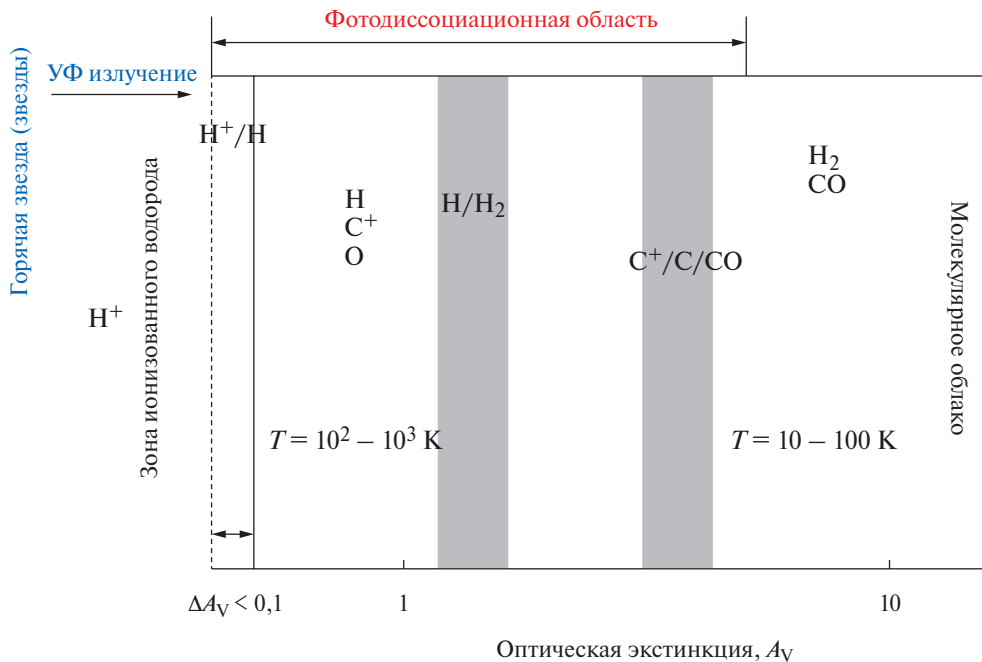
Такая структура предположительно формируется в стационарных условиях.

Стационарность предполагает, что после «включения» источника УФ-излучения, т. е. звезды или группы звезд, описанные переходы формируются очень быстро, а затем в процессе расширения области III просто смещаются как целое от источника УФ-излучения вглубь молекулярного облака. Иными словами, движением газа внутри ФДО можно пренебречь.

Стационарная картина как будто бы согласовывалась с наблюдениями, однако только до того времени, когда строение Барьера Ориона было исследовано при помощи интерферометра ALMA. Точнее, этот телескоп позволил с высоким угловым разрешением исследовать распределение в Барьере Ориона молекулы оксида углерода и химически связанного с ней иона $НСO^+$. Сопоставление карт распределения этих молекул с полученными ранее наблюдениями ИК-излучения молекулы H_2 показало, что переходы $H \rightarrow H_2$ (или фронт диссоциации H_2) и $C^+ \rightarrow C \rightarrow CO$ (или фронт диссоциации CO) отстоят друг от друга совсем не так далеко, как предсказывает стационарная модель. В случае Барьера Ориона угловое расстояние между этими переходами, предсказываемое стационарной моделью, составляет примерно $10''$ (5 тыс. а.е.). Новые наблюдения показали, что на самом деле в пределах разрешения ALMA положения фронтов диссоциации H_2 и CO совпадают, т. е. расстояние между ними не превышает $1''$.

Возникло очевидное противоречие между теорией и наблюдениями, и одним из путей к его разрешению является отказ от предположения о стационарности. Другими словами, следует вспомнить о том, что газ в ФДО движется, и в движущемся газе располо-

Стационарная картина как будто бы согласовывалась с наблюдениями, однако только до того времени, когда строение Барьера Ориона было исследовано при помощи интерферометра ALMA.



Структура стационарной переходной области между областью HII и молекулярным облаком, включающая в себя ФДО, согласно Тиленсу и Холленбаху (1985)

жение фронтов диссоциации различных молекул может быть не таким, как в неподвижном газе. Однако моделирование движущегося газа представляет собой гораздо более сложную задачу.

В ИНАСАН с 2000-х годов разрабатывается модель расширяющейся области HII, которая носит название *MARION*. Следует отметить, что важность рассмотрения этих объектов в движении сейчас общепринята, и динамические модели областей HII существуют во множестве. Однако их создатели, как правило, стремятся в максимально возможной полноте воспроизвести трехмерные движения вещества, что (в силу вечного недостатка компьютерных мощностей) вынуждает сокращать многообразие рассматриваемых физических и химических факторов, другими словами, упрощать учет теплового баланса, ограничиваться небольшим набором химических реакций и пр. Мы

решили пойти по другому пути, ограничившись рассмотрением одномерных движений, но максимально наполнив модель физическими и химическими процессами, позволяющими детально рассматривать тепловую и молекулярную эволюцию вещества.

В природе есть объекты, которые можно считать одномерными в некотором приближении. Одним из таких объектов и является относительно плоский Барьер Ориона. Применив к нему модель *MARION*, мы обнаружили, что если рассматривать ФДО не в стационарном приближении, а в движении, то фронты диссоциации H_2 и CO приближаются друг к другу, почти сливаясь. Это находится в полном согласии с наблюдениями. Более того, поскольку в модель *MARION* включены не только физические, но и химические процессы, мы можем вычислять содержания молекул CO и HCO^+ , наблюдавшихся на

ALMA, а также предсказывать яркости соответствующих спектральных линий. И здесь мы тоже получили хорошее согласие с наблюдениями. Отметим, что выметание пыли из области Барьера Ориона под действием давления излучения приводит к интересному эффекту – пониженному содержанию пыли в ФДО при «нормальном» содержании в ней молекул.

ИНФРАКРАСНЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ ТУМАННОСТИ – МЕЖЗВЕЗДНЫЕ ПУЗЫРИ

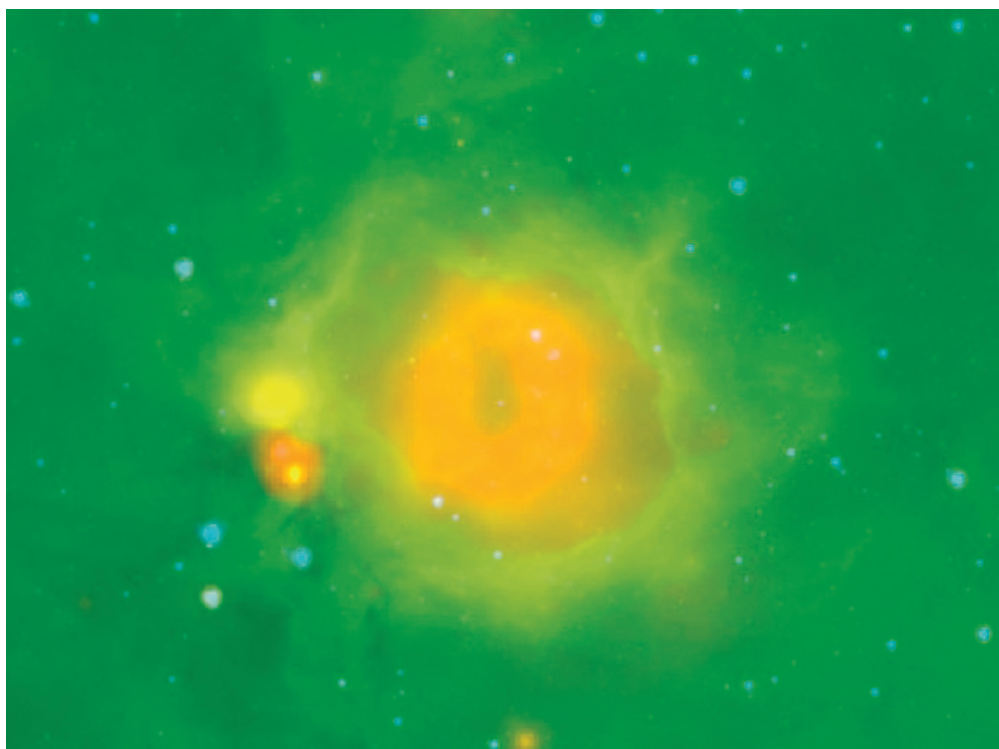
Вторая группа объектов, в которых важны связанные с пылью динамические эффекты, может скрываться среди так называемых инфракрасных кольцевых туманностей (ИККТ). Эти туманности, как следует из их названия, наблюдаются в ИК-диапазоне и по внешнему виду в проекции на небо напоминают целые кольца или их фрагменты. Кольцевые туманности исследуются уже давно, но новый всплеск интереса к ним связан с наблюдениями на Космическом телескопе им. Спитцера. Наблюдения в ближнем и среднем ИК-диапазонах, выполненные на этом инструменте, показали, что ИККТ, во-первых, широко распространены. Так, количество известных таких объектов в нашей Галактике измеряется тысячами. Во-вторых, ИККТ в большинстве случаев ассоциированы с областями HII.

С одной стороны, последнее ожидаемо. Расширение области HII сопровождается образованием оболочки, в которой, собственно, и находится ФДО. В зависимости от относительного расположения ионизирующей звезды и молекулярного облака проекция оболочки на небесную сферу может выглядеть либо как окружность, либо как фрагмент окружности. Общая плотность вещества в оболочке превышает и плот-

ность в молекулярном облаке, и плотность в области HII. Таким образом, оболочка видна как область повышенной яркости на картах излучения во многих диапазонах, в том числе и в ИК.

С другой стороны, детальная структура карт излучения в ИК-диапазоне оказывается не столь тривиальной. Прежде чем обсуждать эту структуру, дадим пояснения об источниках ИК-излучения. В ближнем ИК-диапазоне (с длиной волны несколько микрон) основным источником излучения являются ПАУ (или родственные им частицы, о которых говорилось выше). Они поглощают УФ-фотоны, энергия которых перераспределяется по различным молекулярным связям, а затем переизлучается в виде ИК-эмиссионных полос. В среднем ИК-диапазоне (длины волн порядка десятков микрон) источником излучения считаются очень мелкие пылинки размерами около десятка нанометров. Для таких мелких частиц даже один поглощенный УФ-фотон представляет значительную дозу энергии, нагревая их до высокой температуры, иногда превышающую 100 К. В дальнем ИК-диапазоне (сотни микрон) светятся крупные пылевые частицы размерами порядка 0.1 мкм. Они настолько велики, что в областях HII даже вблизи звезды высокоэнергичные УФ-фотоны не могут нагреть их выше сотни К. В оболочке их температура и вовсе опускается ниже 50 К.

Исходя из описанных выше закономерностей, самым ярким должно быть излучение ПАУ и горячих мелких пылинок в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Это излучение должно генерироваться вблизи ионизирующей звезды, формируя центральный пик там, где наиболее интенсивно УФ излучение (энергия которого «перекачивается» в ИК-излучение пылевых частиц). А вот из ФДО в оболочке области HII преимущественно должны светить холодные



Одна из наиболее правильных инфракрасных кольцевых туманностей – M 49. Изображение построено по данным наблюдений на Космическом телескопе им. Спитцера. Зеленым цветом показано излучение в ближнем ИК-диапазоне (длина волны 8 мкм), красным – излучение в среднем ИК-диапазоне (длина волны 24 мкм)

крупные пылинки – в дальнем ИК-диапазоне. На самом же деле ситуация совсем другая. Оболочка светится во всех ИК-диапазонах (это и есть ИККТ), а вот из внутренней области кольцевой туманности, т. е. из области НП, излучения в ближнем ИК-диапазоне вовсе нет. Собственно, именно поэтому такие объекты и выглядят как кольца. Излучение в среднем ИК-диапазоне внутри области НП наблюдается, но и в нем отсутствует центральный пик. Источник излучения больше напоминает еще одно кольцо (или его фрагмент) меньшего размера.

Здесь важно понимать, что расширение области ионизованного водорода и продвижение ФДО в молекуляр-

ное облако – это движение газа, а ИК-излучение связано с пылью. Описанные выше *ожидаемые* закономерности в распределении ИК-излучения основаны на предположении о том, что пыль перемешана с газом и повторяет его распределение. В целом в межзвездной среде это предположение выполняется хорошо, но в окрестностях горячих массивных звезд оно может нарушаться.

Одна из возможных причин – давление излучения. Поглощая свет звезды, пылинки, подобно солнечным парусам, ускоряются в противоположном направлении, причем пылинки разных размеров и разного химического состава летят прочь от звезды с разными

скоростями. В результате их распределение не просто отличается от распределения газа, но является еще и разным для разных пылинок. А поскольку пылинки разных размеров излучают на разных длинах волн, можно ожидать, что различия в пространственном распределении отразятся и на внешнем виде карт излучения в разных диапазонах ИК-участка спектра.

Модель *MARION*, позволяющая детально рассматривать движение сквозь плазму частиц различных размеров и химического состава, прекрасно подходит для решения задачи о пылинках в областях НII. Мы попытались с ее помощью объяснить структуру ИККТ и выяснили, что внутреннее кольцо излучения в среднем ИК-диапазоне действительно может возникать из-за того, что мелкие пылинки, генерирующие это излучение, выдуваются из ближайших окрестностей звезды давлением ее УФ-фотонов. Но вот с излучением в ближнем ИК-диапазоне это объяснение не проходит, так как на ПАУ свет звезды «давит» значительно слабее.

Значит, нужно вспомнить о второй возможной причине расхождения между распределениями пыли и газа. Мы говорили о ней несколько раньше – это разрушение пылинок. Действительно, пылинки могут дробиться при столкновениях друг с другом, а также разрушаться в газе (плазме) высокой температуры и (или) в интенсивном поле УФ-излучения, теряя как отдельные атомы, так и целые молекулы (или радикалы). Но достаточно ли «суровы» условия в областях НII, чтобы обеспечить полное уничтожение частиц ПАУ, объяснив тем самым отсутствие излучения в ближнем ИК-диапазоне из центральных областей этих объектов?

На этот вопрос позволяет ответить модель эволюции космических пылинок *Shiva*, также разработанная в ИНАСАН. В ней разрушение пылевых

частиц рассматривается на микрофизическом уровне, т. е. на уровне отдельных пылинок. Такая детализация очень важна: то, что мы обобщенно называем разрушением пылинки, представляет собой сложный комплекс физических процессов, скорость протекания которых зависит не только от общего химического состава частицы, но и от ее структуры. Например, частицы ПАУ в чистом виде оказываются устойчивыми к фоторазрушению, однако в ФДО, где относительно высоко содержание атомарного водорода, они могут прикреплять к себе «лишние» атомы H, переходя в *сверхгидрогенизированное* состояние. «Алчность» в присоединении водорода приводит к нарушению симметрии молекулы и к потере стабильности. В результате в ФДО темп разрушения ПАУ может оказаться более высоким, чем в области НII, несмотря на меньшую интенсивность УФ-излучения. На устойчивость и неустойчивость пылинок влияет также наличие в их структуре связей различных типов и (или) примесных атомов.

К сожалению, моделируя разрушение углеродных частиц и изменение их структуры, мы постоянно сталкиваемся с отсутствием лабораторных данных об их физико-химических свойствах. Мы надеемся, что в ближайшем будущем развивающееся сотрудничество с химиками-экспериментаторами позволит по крайней мере частично заполнить пробелы в необходимой информации.

*Авторы благодарят
за поддержку РФФ,
грант № 21-12-00373.*

Рекомендованная литература

1. Бочкарев Н.Г. Основы физики межзвездной среды. Изд. стереотип. URSS. 2020. 352 с.
2. Лозинская Т.А. Взрывы звезд и звездный ветер в галактиках. Изд. стереотип. URSS. 2016. 216 с.

АРХЕОЛОГИЯ МЛЕЧНОГО ПУТИ

СИТНОВА Татьяна Михайловна,

кандидат физико-математических наук

Отдел нестационарных звезд и звездной спектроскопии

Институт астрономии Российской академии наук

DOI: 10.7868/50044394821060086

Еженедельно появляется около десятка новых статей по исследованию химического состава и параметров движения старейших звезд Млечного Пути и ближайших карликовых галактик, открываются новые звездные потоки. Такое количество новых работ вызвано появлением большого количества данных о координатах, скоростях, блеске и химическом составе звезд по наблюдениям с космического спутника Gaia и наземным спектральным обзорам. В этой статье собраны наиболее наглядные результаты, которые помогут представить динамические и химические процессы, происходящие в нашей галактике, а также восстановить их хронологию. Как далеко в прошлое позволяют заглянуть современные астрономические наблюдения? Сколько «весит» самая массивная звезда? Что такое Фимбултуль? Из каких подсистем состоит наша Галактика? Как производятся различные химические элементы? Какой раньше была наша Галактика, и что ждет ее в будущем? Ответы на эти вопросы можно найти в статье.

ВВЕДЕНИЕ

Около полувека назад возникла область астрономии, которую называют галактической археологией. Она изучает старейшие звезды, образовавшиеся в ранней Вселенной. Благодаря накоплению большого количества данных об их химическом составе, координатах и скоростях стала возможной детальная реконструкция событий, происходивших в Галактике. Под словом Галактика, написанным с прописной буквы, мы, как обычно, подразумеваем нашу звездную систему, которую также называют «Млечный Путь».

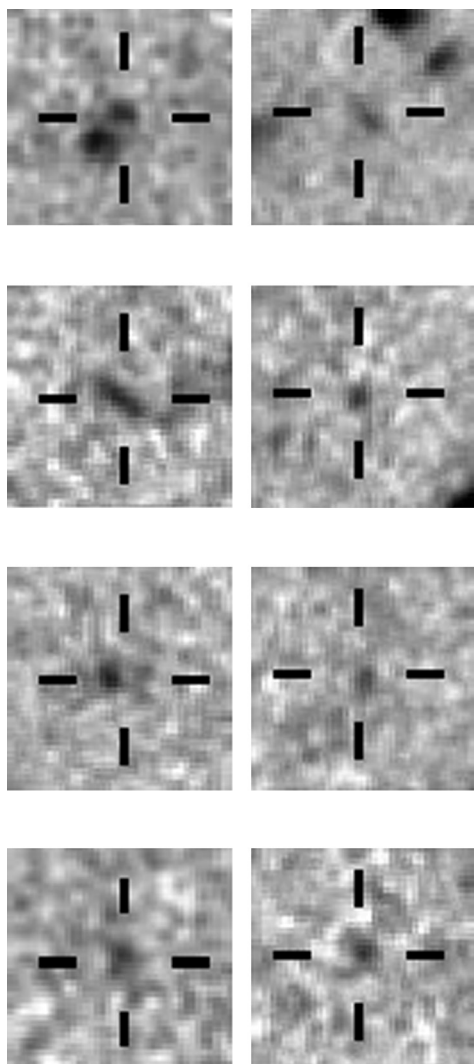
В этой статье речь пойдет об истории Галактики, о том, как она устроена и эволюционирует. Эта история неразрывно связана с происхождением химических элементов и с эволюцией их количества в Галактике.

В Отделе нестационарных звезд и звездной спектроскопии Института

астрономии Российской академии наук (ИНАСАН) проводятся работы по определению химического состава и других параметров звезд.

ДВА СПОСОБА ЗАГЛЯНУТЬ В ПРОШЛОЕ

Чтобы понять, как эволюционируют галактики, нужно сравнить их свойства в разные моменты времени. Мы наблюдаем далекие галактики на ранних этапах эволюции, а близкие – почти в реальном времени. Чем дальше в прошлое мы хотим заглянуть, тем более далекие, и значит, тусклые галактики нужно наблюдать. На космическом телескопе Хаббла получены изображения множества галактик. Самые далекие из них мы видим в момент, когда прошло 700 млн лет после Большого взрыва. То есть удалось заглянуть больше чем на 13 млрд лет назад! К сожалению, эти галактики



нельзя исследовать детально, поскольку невозможно их разрешить на отдельные звезды.

Есть другой способ заглянуть в прошлое, для которого не нужно наблюдать далекие объекты. В нашей Галактике и ее близких спутниках для наблюдений доступны сотни старейших звезд, родившихся спустя миллиард лет после Большого взрыва и сохранившихся почти неизменными до настоящего времени. Такие звезды – главный источник информации о ранних этапах

Снимки самых далеких галактик, полученные космическим телескопом Хаббла. Положение галактик отмечено штрихами. Изображения объектов соответствуют моменту, когда прошло около 700 млн лет после Большого взрыва. Источник: Bouwens Rychard J. et al.; *z - 7 Galaxy Candidates from NICMOS Observations Over the HDF-South and the CDF-South and HDF-North Goods Fields; The Astrophysical Journal*, 2010. Vol. 725. Is. 2. P. 1587–1599

галактической эволюции, их часто сравнивают с окаменелостями. Именно поэтому область астрономии, изучающую старейшие звезды, называют галактической археологией.

КРУГОВОРОТ ГАЗА В ГАЛАКТИКЕ

В течение первых трех минут после Большого взрыва были синтезированы самые легкие химические элементы: водород, гелий, немного лития, бериллия и бора. Остальные возникли позднее и сейчас рождаются в ядерных реакциях в ходе эволюции звезд. У астрономов принято называть эти элементы «тяжелыми элементами» или «металлами».

Главный параметр, определяющий свойства звезды и ее эволюцию, – масса. У изученных звезд массы заключены в широком диапазоне: от 0.08 до нескольких сотен масс Солнца. Снизу эта величина ограничена пределом Кумара. Звезда с массой меньше этого предела не может сжаться настолько сильно, чтобы температура в ее ядре достигла уровня, необходимого для термоядерного превращения водорода в гелий. Субзвездные объекты с массой меньше предела Кумара называют коричневыми (или бурыми) карликами. В их недрах недолго протекают термоядерные реакции с дейтерием, литием и другими редкими легкими элементами,

но тепла они дают мало и на эволюцию почти не влияют.

Со стороны больших масс тоже есть ограничение, которое называют эддингтоновским пределом: он определяется балансом между гравитацией и давлением излучения. Численное значение этого предела зависит от прозрачности газа, из которого состоит звезда. Чем ниже содержание тяжелых элементов, тем прозрачнее газ, а значит, звезда может быть более массивной. Например, для звезд первого поколения, которые состояли только из водорода и гелия, расчеты предсказывают максимальные массы до 1 тыс. масс Солнца. В нашу эпоху самая массивная известная звезда – это R136a1 с массой 265 ± 50 солнечных масс. Она находится в близкой карликовой галактике Большое Магелланово Облако, где содержание тяжелых элементов втрое ниже солнечного. Чем больше масса звезды, тем выше температура в ее ядре, и тем быстрее она эволюционирует. Время жизни звезды с массой 10 масс Солнца составляет десятки миллионов лет, в то время как звезды с массой меньше солнечной медленнее расходуют свое топливо и живут больше 10 млрд лет. Массивные звезды в ходе своей эволюции производят тяжелые элементы и в конце жизни обогащают ими окружающую среду посредством звездного ветра, взрыва или выброса вещества при слиянии со своими компаньонами, если они входят в двойную систему. Из газа, обогащенного тяжелыми элементами, рождается следующее поколение звезд. Так происходит круговорот вещества из газа в звезды и обратно.

Одиночные звезды малой массы не участвуют в этом круговороте, поскольку заканчивают свою эволюцию как белые карлики, внутри которых «законсервированы» синтезированные в них элементы. У таких звезд другая, не ме-

нее важная, миссия. Эти звезды – настоящие капсулы времени с посланиями о химическом составе среды в разные эпохи. Их атмосферы состоят из газа, состав которого соответствует составу межзвездной среды на момент рождения этих звезд. Изучая их, мы можем понять, какие химические элементы и в каком количестве образуются в результате различных процессов, а также проследить, как менялась скорость производства элементов в разных частях Галактики.

КАК ИСКАТЬ САМЫЕ СТАРЫЕ ЗВЕЗДЫ?

В Галактике сотни миллиардов звезд. Звезды начали рождаться 13 млрд лет назад и образуются до сих пор. Поэтому старейшие звезды составляют ничтожную долю от полного числа звезд в Галактике.

Задача о поиске старых звезд сложна и с теоретической, и с наблюдательной стороны. Во-первых, определение возраста звезд основано на наших представлениях о звездной эволюции. Предполагая примерную массу звезды и ее химический состав, нужно рассчитать весь ее наблюдаемый эволюционный путь, то есть изменение со временем температуры поверхности и светимости. Затем нужно сопоставить наблюдаемые параметры с эволюционным путем и оценить возраст. Звезда проводит большую часть своей жизни на стадии главной последовательности, когда в ядре водород превращается в гелий. Поэтому для звезд на стадии главной последовательности возраст определяется неточно, и небольшая неопределенность в температуре или светимости приводит к значительным ошибкам в возрасте, порядка миллиарда лет. Расчеты эволюции звезд, особенно с дефицитом металлов, тоже не-

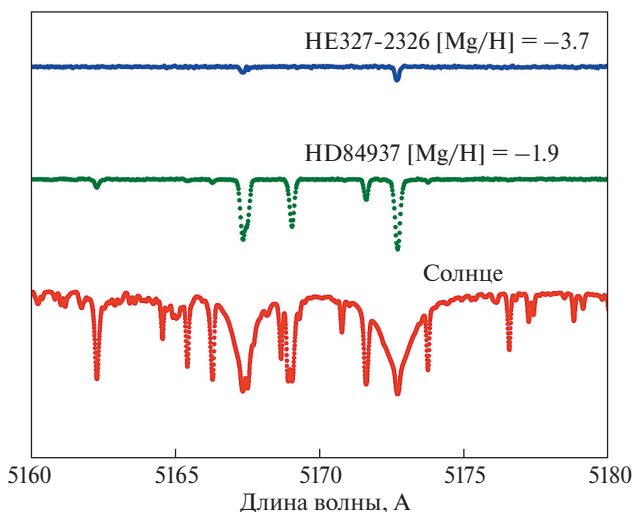
совершенны и имеют неопределенности, связанные с константами ядерных реакций, перемешиванием вещества, учетом вращения звезды и с другими факторами.

Старые звезды образовались в эпоху, когда в галактической среде было мало тяжелых элементов. Поэтому низкая металличность считается главным признаком почтенного возраста звезды. В качестве шкалы времени часто используют содержание железа (или другого элемента), измеренного относительно солнечного. Железо используют потому, что в спектрах звезд наблюдается много линий железа, по которым почти всегда можно определить его содержание. Однако уже найдена звезда, где железа так мало, что ни одной его спектральной линии обнаружить не удалось!

Обозначение $[M/H]$ означает разность логарифмов содержания металлов в звезде и на Солнце. Количество известных звезд с содержанием металлов в тысячу раз меньшим, чем у Солнца ($[M/H] = -3$) исчисляется сотнями, а с $[M/H] < -4$ – десятками. Это очень редкие объекты.

Спектры звезд с разной металличностью различаются.

Чем больше металличность, тем больше энергии поглощается в атмосфере звезды на частотах спектральных линий, соответствующих разным химическим элементам. Чтобы получить спектральные наблюдения высокого качества, необходимы современные телескопы, зеркала которых имеют диаметр 6–10 м, а свет нужно накапливать около 20 часов в случае особо тусклых объектов. Спектральные наблюдения гораздо более затратны по времени,



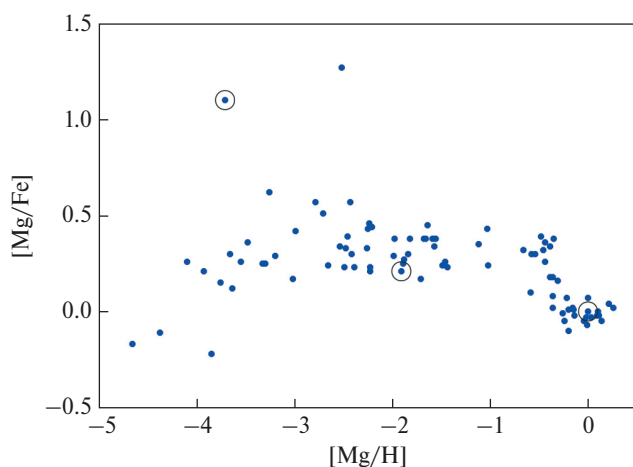
Спектры звезд с разным содержанием тяжелых элементов

поскольку требуют измерения потоков света в узких интервалах длин волн.

При фотометрических наблюдениях свет накапливается в более широком интервале, поэтому требуется меньше времени по сравнению со спектральными наблюдениями. В результате фотометрических обзоров, способных охватить большие площади небесной сферы, находят звезды с низкой металличностью. Затем для них получают спектры высокого разрешения и по линиям поглощения, соответствующим различным химическим элементам, определяют содержание этих элементов в звезде.

ЭВОЛЮЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГАЛАКТИКЕ

Проследим, например, за эволюцией содержания магния в Галактике. На Солнце на одну частицу магния (это может быть как нейтральный атом, так и ион, важно именно количество ядер) приходится 30 тыс. ядер водоро-



Эволюция содержания магния в Галактике. Звезды, спектры которых показаны на предыдущем рисунке, обведены кружками

да. Концентрация железа чуть меньше: на одно ядро железа приходится 35 тыс. ядер водорода или же 1.17 ядер магния. В старой звезде с дефицитом металлов HD84937 на одно ядро магния приходится полтора миллиона ядер водорода, а на одно ядро железа приходится 2.33 ядер магния, а не 1.17, как у Солнца. Это значит, что со временем в Галактике происходит изменение элементных отношений: давным-давно магний производился более эффективно относительно железа по сравнению с теми темпами производства, которые были на момент рождения Солнца.

Если взять большую выборку звезд с разной металличностью и проследить за изменением содержания магния относительно железа, то получится следующая картина. У старых звезд одинаковое отношение количества ядер магния к железу. Оно связано с производством этих элементов в массивных (более 8 масс Солнца) короткоживущих звездах. Железо может синтезироваться в звездах меньших масс, которые дольше эволюционируют. Именно

из-за появления дополнительных источников железа имеется падение элементного отношения $[Mg/Fe]$ в момент, соответствующий $[Mg/H] = -0.5$.

Интересно, что у старых звезд с самой низкой металличностью наблюдается разброс в элементных отношениях. Это говорит о разнообразии взрывов массивных звезд. Начальная масса, скорость вращения звезды, наличие у нее магнитного поля и дру-

гие параметры определяют ход эволюции и количество произведенных тяжелых элементов. Когда взрывается много массивных звезд, и произведенные ими элементы смешиваются, то следующее поколение звезд образуется из однородного по составу газа и имеет близкие элементные отношения. Маломассивные звезды с нестандартными элементными отношениями рождаются, когда произошло всего несколько или даже один взрыв и газ не успел перемешаться. Благодаря таким звездам мы можем восстановить свойства первых звезд, которые быстро проэволюционировали и не сохранились до нашего времени.

Старейшие звезды неоднородно распределены по Галактике. Например, на ее периферии большинство звезд старые. В разных частях Галактики звезды отличаются друг от друга возрастом, химическим составом, скоростью движения и положением в пространстве.

АНАТОМИЯ ГАЛАКТИКИ

Наша Галактика состоит из нескольких подсистем. Прежде всего, это диск, звездное население которого, в свою очередь, подразделяется на толстый и тонкий диски. Разделение дисков

было обнаружено методом подсчета количества звезд вдоль оси, перпендикулярной галактической плоскости. Диски различаются по толщине примерно в 10 раз, их характерная толщина составляет 300 пк и 3 кпк соответственно. Они также различаются и по размеру: тонкий диск больше, он простирается не меньше чем на 20 кпк от центра Галактики, тогда как количество звезд в толстом диске быстро уменьшается на расстоянии более 10 кпк от центра.

Наибольший объем Галактики занимает сферическое гало, радиус которого около 200 кпк. Однако звезд в нем мало, всего несколько процентов от того, что содержится в диске. В гало также находятся шаровые звездные скопления и карликовые галактики-спутники Млечного Пути.

Карликовые галактики подразделяются на несколько типов. Самые крупные из них – Магеллановы Облака (Большое и Малое), их классифицируют как галактики неправильного типа, которые раньше были спиральными, но изменили форму из-за приливного взаимодействия. Большую часть близких галактик составляют менее массивные классические карликовые галактики и галактики с ультранизкой поверхностной яркостью. Согласно представлениям об иерархической структуре формирования галактик, самые мелкие галактики этого типа или подобные им системы послужили изначальным строительным материалом, «кирпичиками», из которых сформировались более крупные галактики. У некоторых крупных карликовых галактик есть свои собственные шаровые скопления.

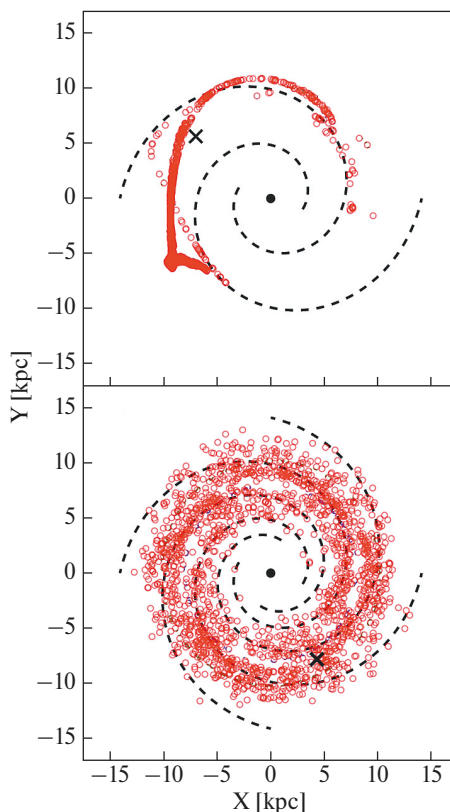
«ВСЕ ТЕЧЕТ, ВСЕ МЕНЯЕТСЯ», ИЛИ КАК ДВИЖУТСЯ ЗВЕЗДЫ В ГАЛАКТИКЕ

Звезды в диске обращаются вокруг центра Галактики. Например, Солнце

находится в тонком диске на расстоянии 8 кпк от центра и совершает один оборот вокруг него примерно за 220 млн лет. Тонкий диск получил такое название, поскольку его звезды движутся почти в плоскости Галактики, иначе говоря, имеют небольшие углы наклона орбит. У звезд толстого диска углы наклона орбит больше, и они могут отдаляться от плоскости на несколько кпк. Звезды в диске не только движутся по стационарным орбитам, но и могут мигрировать вдоль радиуса. В гало звезды имеют большие углы наклона орбит, могут обращаться в плоскости, перпендикулярной диску Галактики, или даже в направлении, противоположном вращению диска.

В тонком диске звезды рождаются в облаках газа группами в виде рассеянных звездных скоплений. Поэтому звезды одного скопления имеют одинаковый химический состав и возраст. Впоследствии скопления разрушаются, и звезды рассеиваются по диску. Если найти в тонком диске звезды с одинаковым химическим составом и возрастом, то, вероятно, ранее они принадлежали одному и тому же скоплению. Это позволяет проследить, как менялись их орбиты, и насколько они удалились друг от друга за время своей жизни. Проще всего эту задачу решить для молодых звезд, вышедших из недавно разрушившихся скоплений и не успевших существенно друг от друга отдалиться.

Такую задачу пробовали решать и для скопления, в котором родилось Солнце. Со времени своего рождения Солнце и его «братья» совершили около 20 оборотов вокруг центра Галактики. Орбиты звезд в галактической плоскости постоянно изменяются под действием возмущений со стороны спиральных рукавов, других звездных скоплений, облаков газа и прочих факторов. Небольшие начальные расхож-



Рассеяние звездного скопления. Показаны результаты расчета современного положения звезд (красные кружки) в галактической плоскости, родившихся 4.5 млрд лет назад в том же скоплении, что и Солнце. Расчеты проведены для двух предположений: если в Галактике два спиральных рукава (верхний рисунок) или четыре (нижний рисунок). Положения рукавов показано штриховыми линиями. Начальное положение скопления отмечено крестиком. Источник: *Martinez-Barbosa, C.A. et al. The evolution of the Sun's birth cluster and the search for the solar siblings // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016. Vol. 457. Is. 1. P. 1062–1075*

дения в орбитах значительно увеличиваются со временем, и задача о нахождении «братьев» Солнца становится чрезвычайно сложной спустя 20 галактических лет.

На рисунке представлены результаты расчета координат «братьев» Солнца в галактической плоскости спустя 4.5 млрд лет после разрушения скопления. Положение звезд в плоскости Галактики сильно зависят от принятых свойств диска и спиральных рукавов.

Большой промежуток времени и несовершенство наших представлений о галактическом поле тяжести не позволяет решить задачу о поиске «братьев» только на основе данных об их движении. Что действительно может быть полезным в решении этой задачи – это точный химический состав и возраст звезд, поскольку именно эти параметры необходимы для доказательства общего происхождения звезд. Подобный метод определения принадлежности звезды к тому или иному скоплению или различным подсистемам Галактики называется химической маркировкой и широко применяется для решения разных задач.

Одним из наиболее вероятных кандидатов в «братья» считается звезда HD162826. Она находится близко, на расстоянии примерно 30 пк от Солнца, ее светимость и химический состав близки к солнечным. Таких «братьев» у Солнца должно быть порядка тысячи. Примерно половина звезд имеет планеты или даже планетные системы. Было бы интересно исследовать наличие планет, их размер, тип, химический состав, близость к родительской звезде и другие параметры у «братьев» Солнца. Это задача для будущих исследований, которые смогут быть проведены благодаря более совершенным наблюдательным данным и более точному и детальному пониманию движения звезд в Галактике.

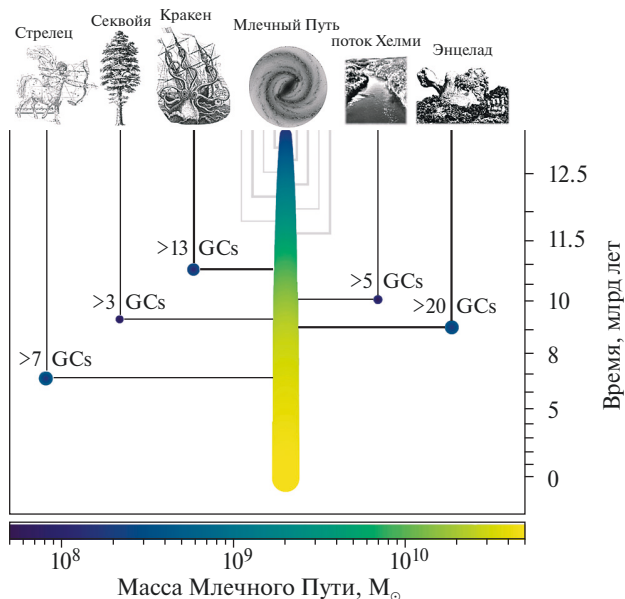
Вокруг тонкого диска с его спиральным узором, облаками газа и рождающимися в рассеянных скоплениях звездами находится толстый диск, в котором преобладают старые звезды, чей

возраст составляет не менее 10 млрд лет. Интересно, что звезды дисков не перекрываются по возрастам, более того, была остановка в звездообразовании между окончанием формирования толстого и началом формирования тонкого дисков. Эта остановка случилась примерно 8 млрд лет назад и длилась около миллиарда лет. Существуют разные точки зрения на то, как именно образовались диски, и что было причиной остановки звездообразования. Возможно, что тут не обошлось без возмущения со стороны крупной карликовой галактики, которая была захвачена и поглощена нашей Галактикой в ту эпоху. Подобное событие могло препятствовать оседанию газа и формированию из него звезд.

Поглощение карликовых галактик, их разрушение и захват их звезд – довольно частое событие в истории Галактики. Мы видим всевозможные стадии этого процесса, начиная от карликовых галактик, которые еще не успели приблизиться и деформироваться под действием притяжения со стороны Млечного Пути, заканчивая звездными потоками, которые уже почти полностью «размазаны» по своим орбитам. Некоторые из таких потоков простираются на десятки градусов на небесной сфере и позволяют проследить значительную часть траектории разрушенной карликовой галактики (или шарового скопления). Это напоминает, как если бы мы взяли кусок мела и рисовали им траекторию движения галактики, пока не остался бы совсем маленький огрызок. В некоторых случаях такие «огрызки» были действительно обнаружены в гало. Например, шаровое скопление ω Cen считают ядром разрушенной карликовой галактики. Оно находится достаточно близко, на расстоянии 5 кпк, в южном полушарии его можно увидеть невооруженным

глазом. Из-за очевидной размытости ω Cen ясно, что это не звезда, а протяженный объект, состоящий из множества звезд, свет от которых сливается и виден как более яркая область неба, подобно тому, как виден Млечный Путь или галактика M31 (туманность Андромеды). Это самое массивное шаровое скопление в Галактике, оно содержит примерно 10 млн звезд, что примерно в десять раз больше, чем в других шаровых скоплениях. Эти звезды старые, возрастом около 12 млрд лет. Они сформировались в течение короткого времени, но не одновременно, поскольку по химическому составу звезды ω Cen разделяются на несколько групп разной металличности. Большая масса скопления, наличие нескольких поколений звезд, а также движение по орбите в обратном направлении относительно вращения диска Галактики позволяет предположить, что ω Cen – ядро разрушившейся карликовой галактики.

Благодаря запуску в 2013 году космического телескопа Gaia появились данные о координатах, расстояниях и скоростях миллиарда звезд. По этим наблюдениям было найдено множество звездных потоков. Обнаруженный в 2019 году звездный поток Фимбултуль, названный в честь одной из рек в скандинавской мифологии, расположен близко к скоплению ω Cen и имеет близкую скорость. Результаты вычисления орбит скопления и звезд потока показали, что относительно недавно, примерно полмиллиарда лет назад, это шаровое скопление было оторвано от общего потока, а само разрушение продолжалось на протяжении 5 млрд лет. Впоследствии по наблюдениям спектров звезд потока у них были найдены особенности химического состава подобные тем, что наблюдаются у звезд скопления, и это подтвердило их общее происхождение.



История слияния карликовых галактик и Млечного Пути, восстановленная по наблюдениям пяти звездных потоков (подписаны сверху) и их шаровых скоплений. Для каждой галактики указано количество ее шаровых скоплений (GC). По вертикальной оси отложено время, которое отсчитывается в обратном направлении, где настоящему моменту соответствует 0, а слиянию карликовой галактики Кракен и Млечного Пути – примерно 11 млрд лет. Источник: Kruijssen J. M. et al. Kraken reveals itself – the merger history of the Milky Way reconstructed with the E-MOSAICS simulations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020. Vol. 498. Is. 2. P. 2472–2491

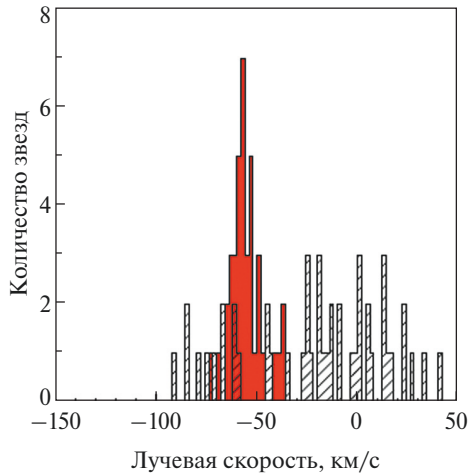
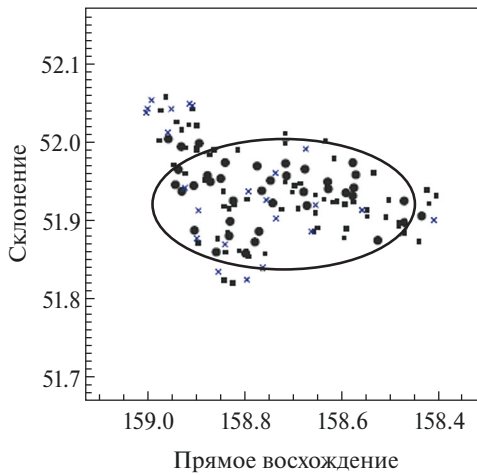
На основе данных о движении и химическом составе шаровых скоплений и недавно обнаруженных звездных потоков удалось найти соответствие между некоторыми (около 50) скоплениями и пятью потоками. Это позволило восстановить свойства разрушенных карликовых галактик и время, когда произошло их разрушение. Эти галактики были наиболее массивными из тех, что поглотила наша Галактика за последние 11 млрд лет. Отчасти это объясняется эффектом селекции, поскольку из массивных карликовых галактик полу-

чаются крупные звездные потоки, и к тому же в них содержится больше шаровых скоплений по сравнению с мелкими галактиками. Реконструкция истории поглощения карликовых галактик представлена в виде «дерева» – схемы, демонстрирующей, когда и какие карликовые галактики были поглощены Млечным Путем.

По современным оценкам, в гало примерно половина звезд поля (то есть не связанных гравитационно с карликовыми галактиками или шаровыми скоплениями) раньше принадлежала разрушенным карликовым галактикам. Известно также, что большинство эпизодов захвата крупных карликовых галактик произошло до того, как сформировался тонкий диск, 8 млрд лет назад, иначе он бы не сохранился в том виде, какой имеет сейчас.

ПРЕСЛЕДОВАНИЕ, ИЛИ КАК ОТСЛЕДИТЬ ХВОСТ

Поиск звездных потоков – это захватывающее и трудное дело, которое можно сравнить с детективным расследованием. Как обнаружить группу сообщников, которые движутся в огромной толпе? Некоторые звездные потоки простираются по небесной сфере на десятки градусов. Для сравнения напомним, что угловой диаметр Луны (или Солнца) составляет полградуса. Для решения этой задачи мало знать коор-



Звезды карликовой галактики Большая Медведица I и звезды поля в координатной плоскости, а также их распределение по скоростям, то есть количество звезд, имеющих скорости в заданном интервале. Показано отделение звезд поля от звезд, находящихся в одной системе (карликовая галактика или скопление). Слева: координаты звезд в направлении карликовой галактики Большая Медведица I, принадлежащие карликовой галактике показаны кружками. Справа: распределение по скоростям для этих же звезд, распределение для звезд карликовой галактики показано красным цветом. Источник: Simon, Joshua D., Geha, Marla. *The Kinematics of the Ultra-faint Milky Way Satellites: Solving the Missing Satellite Problem* // *The Astrophysical Journal*. Vol. 670. Is. 1. P. 313–331. 2007

динаты звезд, нужны еще их скорости и расстояния до них.

Если навести телескоп в направлении звездного потока или одной из карликовых галактик, то в поле зрения попадет множество лишних звезд – звезд поля, которые проецируются на картинную плоскость, но не связаны с интересующим нас объектом. Такие звезды будут находиться на разном расстоянии от нас и будут иметь разные скорости.

Только по координатам на небесной сфере невозможно отделить звезды поля, зато взглянув на распределение по скоростям, становится ясно, какие звезды связаны между собой и движутся в одном направлении. Звезды поля имеют разные скорости, и для них распределение по скоростям имеет плоскую форму. В распределении звезд по скоростям виден максимум, соответствующий скоростям движения звезд

галактики Большая Медведица I, что позволяет отличить их от звезд поля.

В карликовых галактиках или звездных потоках звезды имеют одинаковый возраст около 12 млрд лет. Для более надежного отождествления членов группы и отсеивания звезд поля можно также построить диаграмму зависимости цвета от звездной величины, на которой звезды одного возраста займут положения, соответствующие их массе и эволюционной стадии, а звезды с другими возрастами будут выбиваться из общей картины.

Подсистемы Галактики находятся в движении и посредством гравитации оказывают влияние не только на траекторию и форму друг друга, но и на процесс звездообразования. Чтобы рождались звезды, необходим газ. Он оседает к плоскости Галактики, охлаждается, уплотняется, затем из этого облака газа

рождаются звезды. Если же есть факторы, мешающие оседанию газа или его охлаждению, то процесс звездообразования прекращается. Количество тяжелых элементов, производимых в системе, зависит от количества звезд, а значит, и количества газа. Получается, чтобы восстановить историю формирования Галактики и понять законы, по которым она эволюционирует, необходимо учитывать связь между тремя определяющими факторами: производством тяжелых элементов в звездах, историей звездообразования и динамической эволюцией.

«ИСКОПАЕМЫЕ» ГАЛАКТИКИ

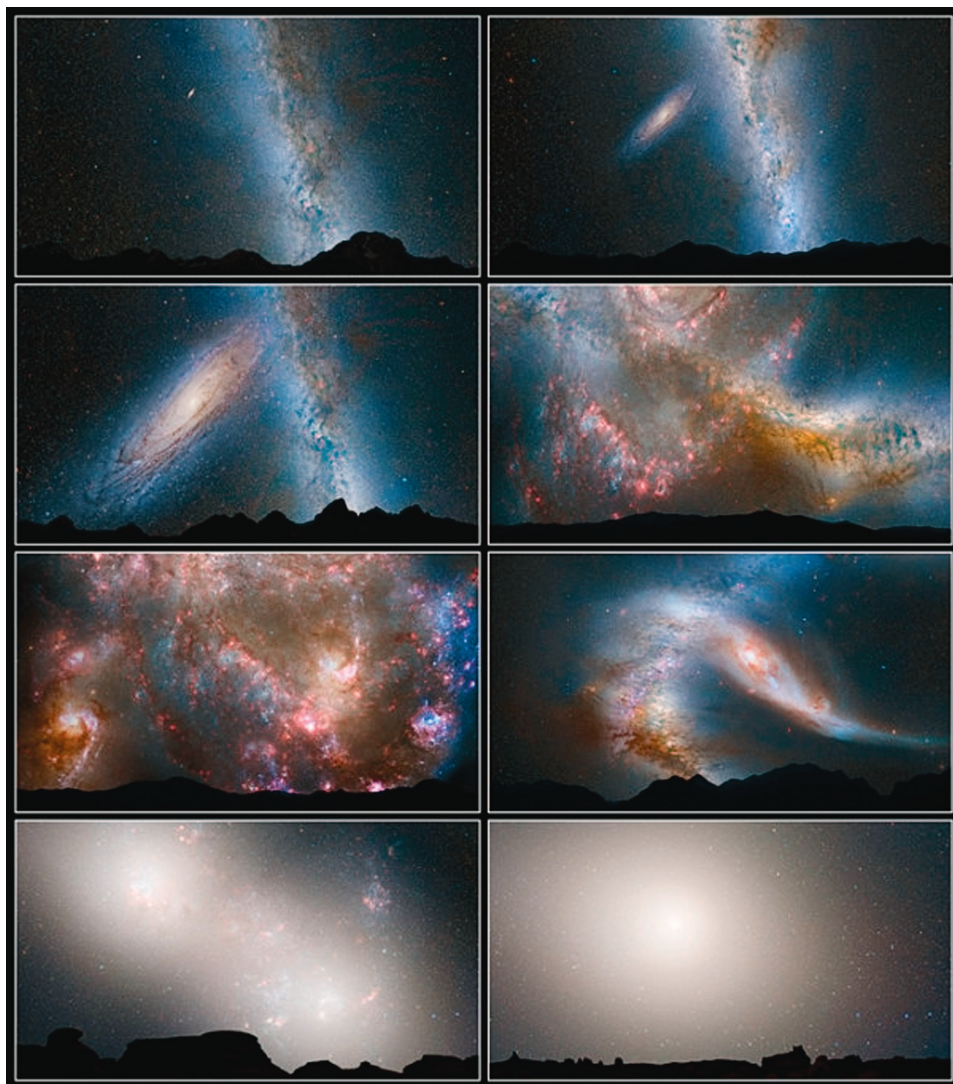
В химический состав Млечного Пути внесли вклад миллиарды звезд, которые завершили эволюционный путь. Чтобы разобраться в деталях процесса химической эволюции и понять, в результате каких явлений какие тяжелые элементы образуются, следует подыскать менее массивные и более простые с точки зрения звездообразования системы. На роль таких систем лучше всего подходят самые маломассивные карликовые галактики, которые содержат на порядки меньше звезд, чем Млечный Путь, иногда всего около тысячи. Звезды рождались в них в течение короткого времени, порой менее миллиарда лет. Затем эти галактики потеряли газ под действием внутренних факторов, например, взрывов сверхновых или же под влиянием проходивших поблизости более массивных галактик. После потери газа следующее поколение звезд не могло сформироваться, и на этом химическая эволюция в маломассивных карликовых галактиках закончилась. В некоторых из них это случилось так быстро, что мы видим только результаты производства тяжелых элементов в самых массивных

звездах. Исследуя такие системы, мы словно путешествуем по «глубинкам» Млечного Пути, где время как будто бы замерло, и ничего нового не происходило миллиарды лет.

По некоторым оценкам, в самых маленьких галактиках было всего два поколения звезд, и около десятка первых массивных звезд обогатили газ тяжелыми элементами, из которого родились звезды второго поколения, которые мы наблюдаем. В таких случаях мы видим, что у звезд одной галактики химический состав различается, и разные звезды образовались из перемешанного газа, обогащенного разными взрывами массивных звезд. Подобная ситуация наблюдается у старейших звезд гало Млечного Пути. Вероятно, это совпадение не случайно и объясняется рождением первых звезд Млечного Пути в небольших сгустках газа, так называемых минигало, а также захватом звезд из карликовых галактик.

Мы начали рассказ с того, как заглянуть в прошлое. Теперь пришло время рассказать о том, что ждет Галактику в будущем. Млечный Путь находится в Местной группе галактик – области, где галактики гравитационно связаны между собой и приближаются друг к другу. По соседству есть массивная спиральная галактика М31 (туманность Андромеды), которая во многом похожа на Млечный Путь. У Андромеды тоже обнаружены десятки карликовых галактик-спутников, а также звездные потоки от уже разрушенных систем.

Млечный Путь и Андромеда движутся навстречу друг другу. Первое сближение состоится через 4 млрд лет. Галактики пройдут на расстоянии порядка 100 кпк, что вызовет искажение формы под действием приливных сил. После нескольких (3–4) пролетов вблизи друг друга они сольются в единую галактику. Это случится через 7–10 млрд лет.



Картина звездного неба, какой она могла бы выглядеть в процессе слияния Млечного Пути и галактики М31. Слева направо и сверху вниз изображения соответствуют нынешней эпохе и далее спустя 2; 3.75; 3.85; 3.9; 4; 5.1; 7 млрд лет. Источник: NASA/ ESA/ Z. Levay and R. van der Marel, STScI/ T. Hallas/ A. Mellinger

Однако необязательно так долго ждать, чтобы полюбоваться видом галактики Млечномеда. По имеющимся данным о скоростях и координатах звезд построены изображения, которые демонстрируют картину звездного неба, наблюдаемую на разных стадиях слияния Млечного Пути и Андромеды.

Автор благодарит В.Г. Сурдина и Т.В. Кешелаву за ценные советы и полезные замечания.

Рекомендованная литература

1. «Галактики» под редакцией В.Г. Сурдина, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019.

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

ШЕМАТОВИЧ Валерий Иванович,

доктор физико-математических наук

БИСИКАЛО Дмитрий Валерьевич,

член-корреспондент РАН, профессор

Институт астрономии Российской академии наук

DOI: 10.7868/50044394821060098

Моделирование процессов проникновения плазмы солнечного ветра в верхние слои атмосфер планет Солнечной системы проводится нашей группой на протяжении последних 20 лет. Разработанные модели электронных и протонных полярных сияний использовались для исследования полярных сияний и интерпретации наблюдений в верхних слоях атмосферы Земли (проект NASA IMAGE), Венеры (проект ESA Venus Express) и Марса (проекты ESA Mars Express и NASA MAVEN). Эти же модели применялись для интерпретации наблюдений полярных сияний на планетах-гигантах Юпитере и Сатурне, полученных при помощи космического телескопа Хаббла. В настоящее время, используя доступные данные наблюдений и измерений космических аппаратов ESA Mars Express и NASA MAVEN, наши математические модели процессов выпадения частиц плазмы применяются для исследования различных типов недавно открытых – дискретных, диффузных и протонных – полярных сияний на Марсе. Кроме того, исследуется влияние процессов выпадения частиц на верхние и средние слои атмосферы Марса в рамках научной программы космического проекта Роскосмоса и ESA ЭкзоМарс.

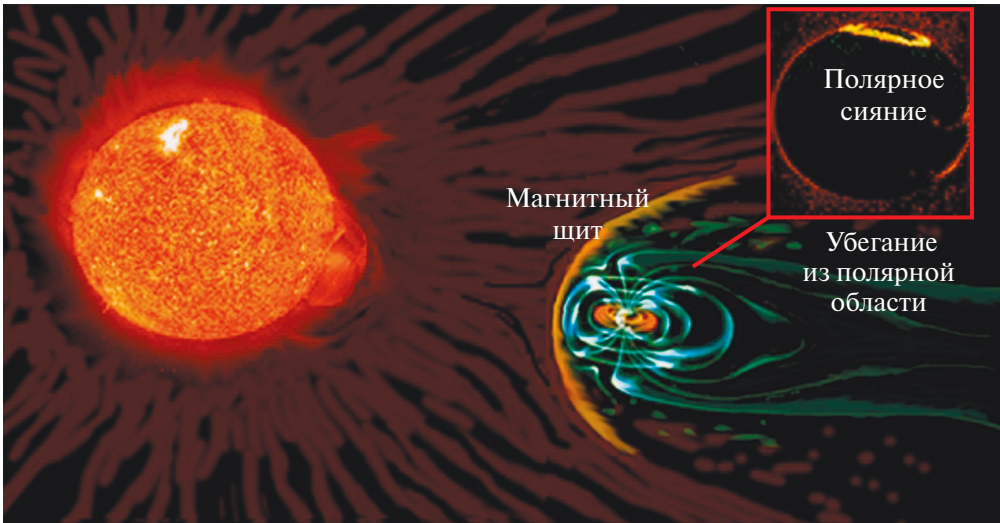
ВВЕДЕНИЕ

Полярное сияние – это свечение (люминесценция) верхних слоев атмосфер планет, обладающих магнитосферой, вследствие их взаимодействия с заряженными частицами солнечного ветра и/или планетной магнитосферы. Быстро меняющиеся свечения, происходящие в верхних слоях атмосфер планет Солнечной системы, обычно возникают вблизи магнитных полюсов планет и их естественных спутников. Вспышки таких свечений длятся от нескольких минут до одного или двух часов.

Плазма солнечного ветра состоит в основном из электронов и протонов

с высокими кинетическими энергиями. Исследования их воздействия на верхние слои атмосферы планет земного типа чрезвычайно важны, так как эти частицы являются энергетическими агентами для атмосферы. Таким образом, уточнение их характеристик, а также соответствующего отклика атмосферы позволит существенно продвинуться в изучении солнечно-планетных связей и космической погоды.

Фундаментальная задача исследования полярных сияний в атмосферах планет земной группы тесно связана с вопросами образования и эволюции планетных атмосфер. Для анализа химического состава и пространственной структуры исследуемой атмосферы,



Высыпание частиц с высокими энергиями является следствием воздействия солнечного ветра на планетную атмосферу и сопровождается авроральными явлениями: полярными сияниями и потоками убегающих из атмосферы энергетических нейтральных атомов (ЭНА) с энергиями выше 10–100 эВ

а также потоков энергии и частиц, воздействующих на атмосферу, широко используются наблюдения полярных сияний. Полярные сияния были открыты на всех планетах с относительно плотными атмосферами, а также на некоторых лунах планет. Планетные полярные сияния являются дискретными событиями в случае планет с собственным магнитным полем или диффузными в случае отсутствия магнитного поля.

Появление полярных сияний обусловлено взаимодействием электронов и протонов солнечного ветра с атомами атмосферных газов.

Заряженные частицы солнечного ветра движутся вдоль силовых линий магнитного поля небесного тела и проникают в атмосферу там, где эти линии направлены вниз, т. е. вблизи магнитных полюсов. Эти частицы вызывают возбуждение колебательных и электронных уровней атомов и молекул атмосферных газов, что приводит к их

свечениям в атмосфере на высоких широтах. Полярные сияния на Земле и планетах-гигантах имеют структуру, которая отражает местоположение и механизмы ускорения плазмы, накопленной в магнитосфере. Источниками высыпавшихся частиц с высокими энергиями являются: (а) для Земли – ионосфера и солнечный ветер; (б) для Юпитера – атмосфера Ио; (в) для Сатурна – ледяные спутники и кольца. Что касается Марса и Венеры, планет без глобального магнитного поля, то их полярные сияния слабы и спорадичны, что является следствием прямого воздействия солнечного ветра на атмосферы этих планет.

На Земле зоны полярных сияний находятся на геомагнитных широтах, отстоящих от магнитных полюсов на 15° – 25° . На нашей планете, как и на некоторых других, магнитные полюса не совпадают с географическими. При усилении солнечной активности, а значит и потока солнечного ветра, интен-



Яркое и динамично развивающееся полярное сияние в северной полярной области Земли.
Источник: NASA/Terry Zaperach

сивность полярных сияний возрастает. Как уже было отмечено, кроме Земли, полярные сияния наблюдаются на некоторых планетах Солнечной системы и их лунах.

Наверняка те, кто хоть раз в жизни видел своими глазами северное (или южное) полярное сияние, скажут, что это просто фантастическое зрелище. Чудо природы планетного масштаба, грандиозное явление, которое человек может наблюдать на Земле невооруженным глазом. Свечение атмосферы на высотах в сотни и на удалении в тысячи километров настолько разноцветно и динамично, что производит неизгладимое впечатление.

Моделирование процессов высыпания частиц плазмы солнечного ветра в верхние слои атмосфер планет

Солнечной системы проводятся нашей группой в Институте астрономии РАН (ИНАСАН) на протяжении последних 20 лет. Разработанные математические модели электронных и протонных полярных сияний использовались для исследования полярных сияний и интерпретации наблюдений в верхних слоях атмосферы Земли (проект *NASA IMAGE*), Марса (проекты *ESA Mars Express* и *NASA MAVEN*), а также для интерпретации наблюдений полярных сияний на планетах-гигантах Юпитере и Сатурне, полученных при помощи космического телескопа Хаббла. В проводимых в ИНАСАН исследованиях осуществляется так называемое кинетическое моделирование, при котором описание процессов высыпания заряженных частиц с высокими кине-

тическими энергиями дается на молекулярном уровне. Моделируется высыпание частиц в верхние слои атмосфер Венеры, Земли и Марса и проводится сравнение результатов моделирования с локальными измерениями. Эти исследования позволяют как уточнить параметры высыпающихся частиц, так и исследовать отклики верхних слоев атмосфер планет на процесс высыпания. Последнее представляется особенно важным. Основное внимание в наших исследованиях уделяется изучению свечений полярных сияний в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне длин волн. Это обусловлено как наличием наблюдений, так и значимостью протекающих в исследуемых областях процессов высыпания для нагрева и изменения общей структуры верхних слоев атмосфер планет земной группы.

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ ЗЕМЛИ

Полярная атмосфера Земли является именно той областью, где наиболее интенсивно проявляются солнечно-земные связи и в особенности воздействие экстремальных солнечных событий. Одним из важнейших проявлений данного воздействия являются УФ-свечения атмосферы, которые происходят в результате проникновением в атмосферу электронов, протонов и атомов водорода с высокими кинетическими энергиями. Землю можно рассматривать как большой магнит, южный полюс которого располагается вблизи северного географического полюса, а северный – вблизи южного. Силовые геомагнитные линии Земли немного сжаты со стороны Солнца вследствие давления солнечного ветра и оттянуты в противоположном направлении, образуя у Земли магнитосферный «хвост».

Поток солнечного ветра на сверхзвуковой скорости (400–700 км/с, что почти на порядок больше скорости звука в околоземной плазме) набегает на магнитосферу планеты, в результате чего образуется так называемая головная ударная волна, которая является магнитным препятствием, отклоняющим заряженные частицы солнечного ветра по траекториям вокруг планеты. Некоторая часть солнечной плазмы беспрепятственно проникает в полярную ионосферу через полярные каспы – воронкообразные области, расширяющиеся от Земли до магнитопаузы, которые возникают в результате взаимодействия солнечного ветра и магнитного поля Земли. Через каспы частицы солнечного ветра проникают (высыпаются) в верхние слои атмосферы планеты в двух областях в высоких широтах. Эти области представляют собой два овала (в северном и южном полушариях), удаленные от геомагнитных полюсов ночью приблизительно на 20°, а днем – на 10°. Протяженность этих овальных областей по широте составляет всего несколько сотен километров. При интенсивной магнитной буре овал сильно смещается по направлению к экватору. Если в периоды спокойного Солнца интенсивность полярных сияний относительно невелика, то в условиях повышенной солнечной активности ситуация существенно изменяется. Выбросы корональной массы (плазмы из солнечной короны) многократно увеличивают интенсивность солнечного ветра. Воздействие возмущенного солнечного ветра сопровождается образованием магнитосферных возмущений, когда в геомагнитном «хвосте» (на ночной стороне Земли) происходит пересоединение силовых линий межпланетного магнитного поля и геомагнитного поля Земли. В результате плазма солнечного ветра и магнитосферная плазма проникают вдоль

линий геомагнитного поля в верхние слои земной атмосферы в полярных областях, вызывая, в частности, полярные сияния.

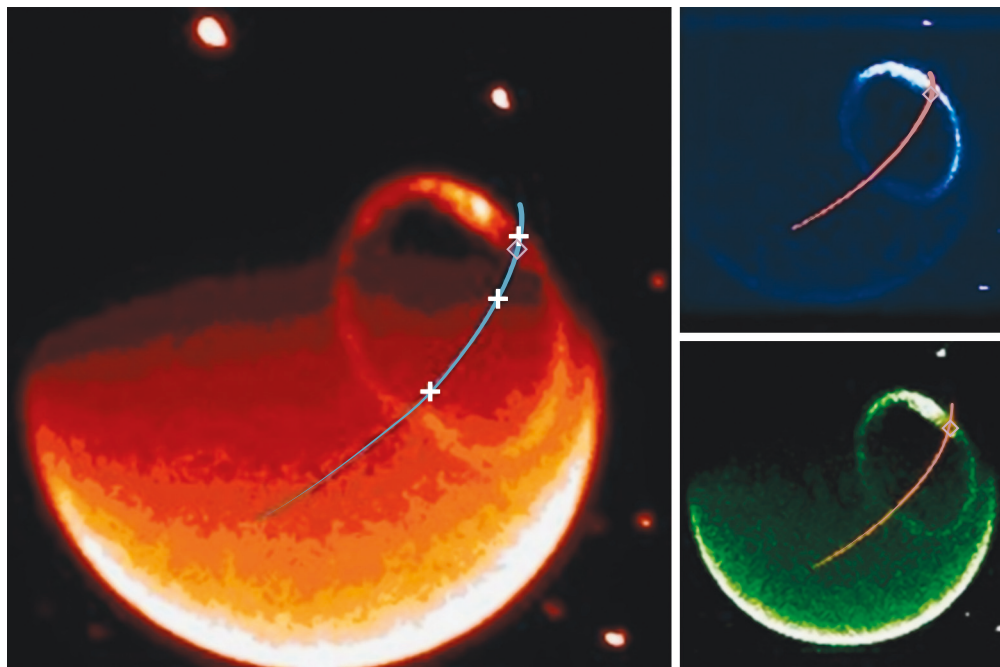
Поскольку солнечный ветер и выбросы корональной массы Солнца – это по большей части электроны и протоны, соответственно, различают два типа полярных сияний: электронные и протонные.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Электронные полярные сияния вызываются потоками электронов и преобладают на Земле. Это так называемые дискретные полярные сияния: привычные зеленые или фиолето-

во-малиновые дуги, лучистые полосы, ленты, занавесы и прочие образования, имеющие достаточно четко выраженную структуру. Электроны солнечной плазмы проникают в верхние слои атмосферы Земли на высоты от 400 до 100 км. В этой области под действием электронов плазмы происходит ионизация нейтральных атмосферных газов (кислорода и азота). Также происходит возбуждение атомов и молекул, что обуславливает цвет полярных сияний. Например, за зеленый цвет отвечает кислород (его наиболее сильная линия), а за фиолетовый, синий или красный – азот. У каждого полярного сияния своя неповторимая палитра цветов, зависящая от постоянно меняющегося химического состава атмосферы. Потоки электронов вызы-

Полярные сияния в верхних слоях атмосферы Земли, вызванные выпадением электронов (левая панель – свечение молекулярного азота в полосе LBH; правая верхняя панель – свечение атомарного кислорода в линии 135.6 нм) и протонов (правая нижняя панель – свечение атомарного водорода в линии Ly α) по наблюдениям УФ-камер на борту КА IMAGE 24 июня 2000 года в 06:22:20 UT. Источник: статья Фрея (Frey) и др. в журнале Space Sci. Rev., 2003



вают в полярном верхнем слое атмосферы Земли сияния, регистрируемые не только в видимом диапазоне, но и в УФ-диапазоне излучения.

Наиболее яркой линией в дальнем УФ-диапазоне в электронных полярных сияниях является свечение атомарного кислорода в линии 130.4 нм. Однако такое свечение сильно рассеяно в атмосфере и, соответственно, трудно получить распределение интенсивности источника, зарождающегося в результате высыпания частиц с высокими кинетическими энергиями. Свечение в кислородной линии 135.6 нм рассеивается атмосферой в меньшей степени и, следовательно, представляет собой отличную эмиссионную характеристику для визуализации полярных сияний. Таким образом, важным требованием для измерений является обнаружение и спектральное разделение свечения в линиях 135.6 нм и 130.4 нм. Свечения системы молекулярного азота Лаймана–Берджа – Хопфилда (*LBH*) и нескольких линий атомарного азота занимают остальную часть дальнего УФ-диапазона, и эти свечения возбуждаются преимущественно посредством электронного удара на молекулы N_2 .

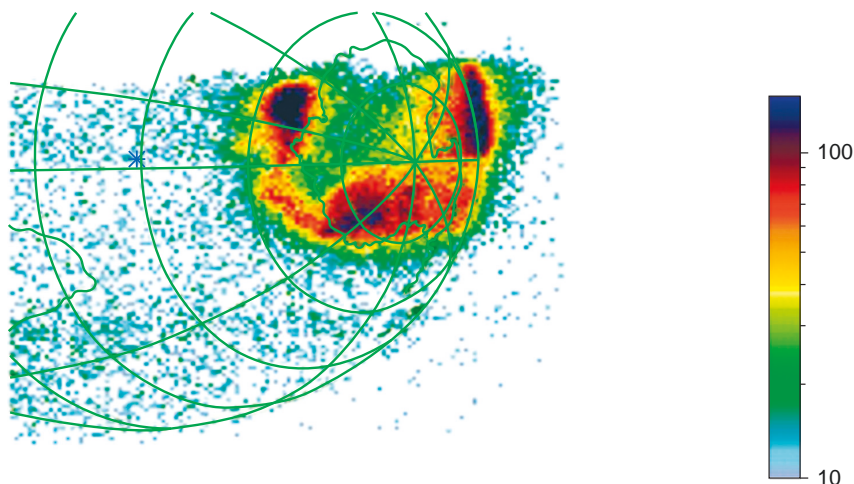
ПРОТОННЫЕ ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Иногда в верхних слоях атмосферы Земли наблюдаются полярные сияния, вызываемые высыпанием в атмосферу протонов из солнечного ветра. Такое высыпание сопровождается сильным свечением атомарного водорода в линии $Ly\alpha$ в дальнем УФ-диапазоне. В этом свечении вблизи 121.6 нм имеются две составляющие. Первая – это очень сильная $Ly\alpha$ -компонента точно по центру линии на 121.5667 нм от холодной геокороны. Вторая – это более слабое свечение с доплеровским сдви-

гом от атомов водорода, которые образуются при перезарядке высыпавшихся в полярный верхний слой атмосферы протонов с атомами и молекулами окружающей атмосферы. Процесс перезарядки заключается в том, что протон захватывает свободный электрон, в результате чего образуется нейтральный атом водорода. Действительно, существует высокая вероятность того, что протоны при перезарядке в атмосфере переходят в атомы водорода в возбужденном состоянии, причем многие из них переходят в основное состояние посредством излучения $Ly\alpha$ фотона. В результате излучение будет характеризоваться доплеровским сдвигом в сторону большей длины волны, потому что высыпавшийся поток H^+/H исходно удаляется от космического аппарата (КА) с измерительными инструментами.

Протоны, попадая в полярный верхний слой атмосферы Земли, сталкиваются с молекулами и атомами атмосферных газов, возбуждая и ионизуя их, а также при захвате свободного электрона образуют нейтральные атомы водорода. Этот атом водорода может испускать фотоны в видимом и дальнем УФ-диапазонах.

УФ-камеры на борту КА *IMAGE* были нацелены на наблюдения области полярных сияний в трех различных спектральных диапазонах, что позволило спектрально разделить протонную и электронную составляющие полярных сияний и провести картирование областей высыпания высокоэнергичных протонов. Скорость счета канала $Ly\alpha$ спектрометра *Spectral Imager* на длине волны 128.0 нм (*SI12*) зависит от профиля линии $Ly\alpha$, отражающего, в свою очередь, энергетический спектр протонов и их распределение по так называемому питч-углу, т. е. наклону скорости протона относительно линии геомагнитного поля. Была исследова-



Протонное полярное сияние вокруг северного магнитного полюса Земли, измеренное при помощи КА IMAGE в дальнем УФ-диапазоне при помощи спектрометра SI12. Виден шаблон или узор (англ.: pattern) высыпания протонов в полярной области атмосферы. Свечения в линии Ly α в области полудня (самая левая часть полярного овала), которая, как известно, связана со следом магнитосферного каспа, являются экстремально яркими. Источник: статья Жерара (Gerard) и др. в журнале *J. Geophys. Res.*, 2001

на зависимость скорости регистрации спектрометра SI12 от средней энергии протонов и геометрии наблюдений с использованием данных прямых измерений потоков высыпающихся протонов на КА FAST и полученных одновременно на КА IMAGE изображений северных полярных областей в дальнем УФ-диапазоне.

Отметим, что измеренные спектры высыпающихся протонов использовались как входные параметры в разработанной нашей группой математической модели протонного и электронного высыпания, что позволило оценить ожидаемый сигнал спектрометра SI12 вдоль орбиты спутника. В итоге, было получено хорошее согласие с результатами наблюдений на КА IMAGE, что подтвердило предсказанную ранее возможность дистанционного разделения

(работа Джерарда (Gerard) и др. в журнале *Ann. Geophysicae*, 2005) протонной и электронной составляющих полярных сияний при помощи УФ-камер КА IMAGE.

В наших исследованиях впервые удалось учесть стохастическую природу рассеяния на малые углы протонов и атомов водорода с высокими кинетическими энергиями, что позволило корректно рассчитать формирование крыльев и сдвига пика в водородных эмиссионных линиях. Наши предсказания нашли свое подтверждение в наблюдениях свечения водорода в линии Бальмер- β на полярной станции Покер Флат на Аляске. Была установлена антикорреляция между средней энергией протонов и сдвигом пика, и впервые показано, что величины относительных уширений синего и красного

крыльев эмиссионных линий водорода являются лучшими индикаторами энергии высыпавшихся протонов по сравнению с ранее используемым значением сдвига пика линии в исследованиях полярных сияний.

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ НА МАРСЕ

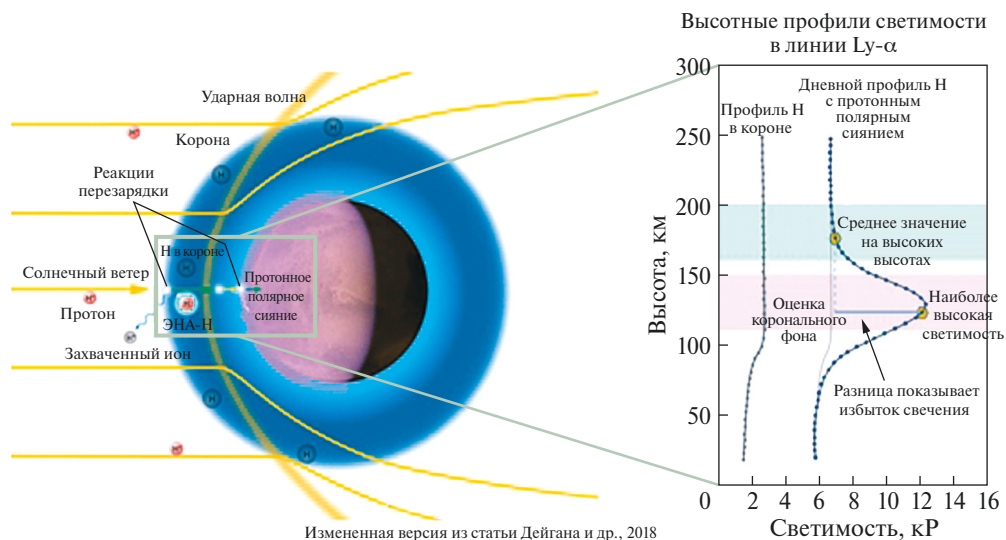
Планета Марс представляет собой интересный промежуточный случай между небесными телами, которые обладают собственным магнитным полем, и немагнитными телами. Это обусловлено тем, что некоторые области планеты сохранили остаточный магнетизм, который присутствовал в планетной коре около 4 млрд лет назад, в то время как в остальных областях планеты собственное магнитное поле практически отсутствует. Именно поэтому на Марсе были открыты как дискретные, так и диффузные авроральные сияния. Наблюдения с помощью инструмента *SPICAM* (*Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Mars*) на борту КА *Mars Express* и УФ-спектрографа (*IUVS*) на борту КА *MAVEN* (*Mars Atmosphere and Volatile Evolution Mission*) позволили определить три типа полярных сияний на Марсе, два из которых существенно отличаются от сопоставимых типов на Земле и других планетах.

Два типа УФ-сияния возбуждаются энергичными электронами и наблюдаются на ночной стороне Марса. Первый тип – дискретное полярное сияние. Оно локализовано и контролируется структурой остаточного магнитного поля в южном полушарии. Второй тип – диффузное полярное сияние. Оно распространяется на большую часть планеты. Диффузные сияния наблюдались несколько раз при помощи спектрографа *IUVS* в спектральной

области от 110 до 340 нм. Пик свечений расположен на высоте около 65 км, что значительно ниже высоты пика свечений (около 140 км) для дискретного полярного сияния. Обнаружение диффузного сияния сопровождалось повышенной солнечной активностью в дальнем УФ-диапазоне и присутствием потоков электронов с энергиями до 200 кэВ, высыпавшихся в верхние слои атмосферы Марса. Диффузные сияния возникают при высыпании энергетических электронов, но, в отличие от дискретных сияний, они покрывают большую часть планеты до тех пор, пока на Солнце происходят выбросы энергии, в то время как дискретные сияния ограничены в пространстве и времени.

Наконец, в наблюдениях при помощи спектрографа *IUVS* на дневной стороне Марса был открыт третий тип – протонные сияния. Они представляют собой избыток свечения водорода в линии *Ly α* в верхних слоях атмосферы Марса, который соотносится с повышенным уровнем солнечного ветра.

Эти наблюдения развеивают распространенное заблуждение о том, что полярное сияние возникает только вблизи краев планетарных магнитных полей. Хотя это верно для полярных сияний на Земле и дискретных сияний на Марсе, это не так в случае диффузных и протонных сияний на Марсе. В этом смысле Марс служит лучшим образцом для изучения авроральных процессов на планетах без глобального магнитного поля в нашей Солнечной системе и за ее пределами. В отличие от предыдущих наблюдений полярных сияний на Марсе, протонные сияния наблюдаются исключительно на дневной стороне и характеризуются повышенной яркостью излучения водорода



Пример высотных профилей свечения в линии H Ly α для коронального H (темносерая линия) и для протонного полярного сияния (голубая линия) на правой панели. Источники: статья Дейгана (Deighan) и др. в журнале *Nature Astronomy*, 2018; статья Хьюжес (Hughes) и др. в журнале *J. Geophys. Res.*, 2019. На левой панели – схема воздействия потока протонов невозмущенного солнечного ветра на дневную атмосферу Марса

в линии Ly α в диапазоне высот 120–150 км при наблюдениях в лимбе. В пике свечение на 50% ярче, чем оптически толстый фон дневного свечения, и, как правило, протонные сияния длятся несколько часов или меньше. Эти события сильно коррелируют с активностью солнечного ветра и популяцией проникающих в верхние слои атмосферы протонов солнечного ветра, ранее идентифицированных анализатором ионов солнечного ветра (SWIA) на КА MAVEN.

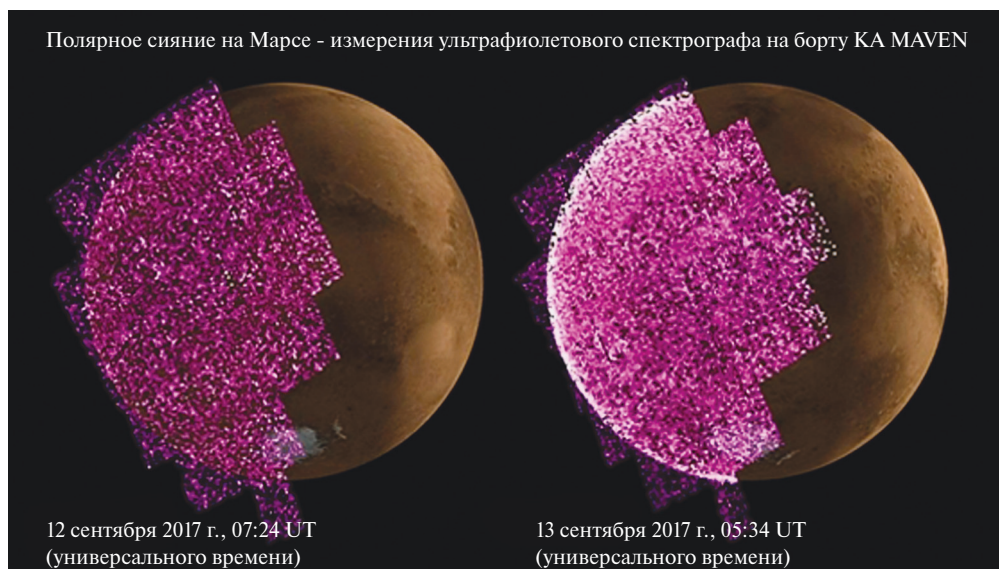
Протонные полярные сияния, зафиксированные, например, во время солнечной бури 12–13 сентября 2017 года КА MAVEN, являются глобальными, так как могут охватывать практически всю планету.

Марс окружен обширной короной из нейтрального водорода. Протоны солнечного ветра, прошедшие процесс перезарядки в короне, уже в виде

нейтральных атомов проникают сквозь границу индуцированной магнитосферы. Последняя задерживает только заряженные частицы. Далее, образовавшиеся нейтральные атомы водорода с высокими энергиями взаимодействуют с атомами и молекулами атмосферных газов в более низких слоях атмосферы (на высотах 110–140 км), порождая УФ-свечение атомарного водорода в линии Ly α .

Отметим, что при помощи математической модели воздействия потока протонов невозмущенного солнечного ветра на дневную атмосферу Марса (в соответствии с представленной на рисунке схемой) нашей группой впервые было проведено исследование процесса ослабления спектра протонов солнечного ветра в каскадном процессе перезарядки в протяженной водородной короне Марса. В результате удалось строго оценить эффектив-

Полярное сияние на Марсе - измерения ультрафиолетового спектрографа на борту КА MAVEN



12 сентября 2017 г., 07:24 UT
(универсального времени)

13 сентября 2017 г., 05:34 UT
(универсального времени)

Наблюдения КА MAVEN свечения атмосферы в УФ диапазоне излучения наложены на снимок Марса на ночной стороне до (слева) и во время (справа) солнечной вспышки в сентябре 2017 года. Источник: NASA/GSFC/Университет Колорадо

ность перезарядки в зависимости от содержания H в короне, а также рассчитать потоки энергии и энергетические спектры атомов водорода, проникающих в дневной верхний слой атмосферы через границу индуцированной магнитосферы. Важно отметить, что на основе этих расчетных характеристик были оценены основные параметры авроральных протонных явлений, наблюдаемых в верхних слоях атмосферы Марса при помощи спектрографа *IUVIS* на борту КА *MAVEN*.

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ НА ПЛАНЕТАХ-ГИГАНТАХ

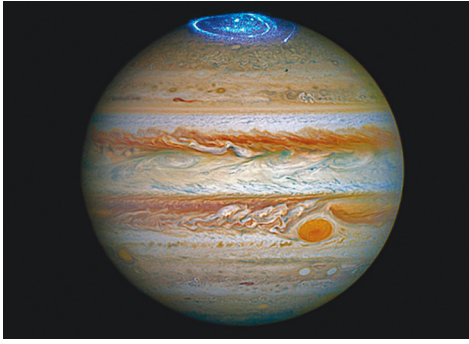
Четыре планеты-гиганта Солнечной системы обладают мощными атмосферами и сильными магнитными полями. Полярные сияния в УФ-диапазоне для богатых водородом атмосфер планет-гигантов наблюдались косми-

ческим телескопом Хаббла, а также спектрографами на борту КА «Кассини», который посетил систему Сатурна в 2004–2017 годах, и КА «Юнона» (*Juno*), работающего в настоящее время в системе Юпитера.

СИСТЕМА ЮПИТЕРА

На самой большой планете Солнечной системы наблюдаются самые мощные полярные сияния, которые, в отличие от полярных сияний на Земле, носят постоянный характер.

Также удивительной особенностью полярных сияний на Юпитере является то, что они возникают не только из-за воздействия плазмы солнечного ветра, но и из-за потоков плазмы, которые выбрасываются галилеевыми лунами планеты: Ио, Ганимедом, Европой и Каллисто (на этих лунах также наблюдаются полярные сияния). Особенно



Северное полярное сияние на Юпитере. Комбинированный снимок сияния и планеты, полученный при помощи космического телескопа Хаббла в видимом и УФ-диапазонах. Источник: NASA, ESA, и J. Nichols (Университет Лейчестера)

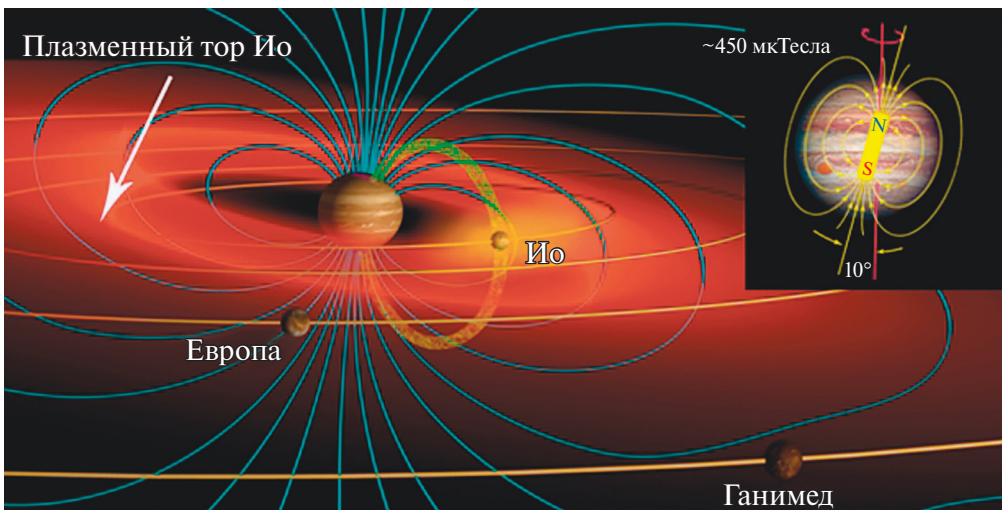
сильно сказывается присутствие Ио, поскольку она вулканически активна и у нее есть своя ионосфера.

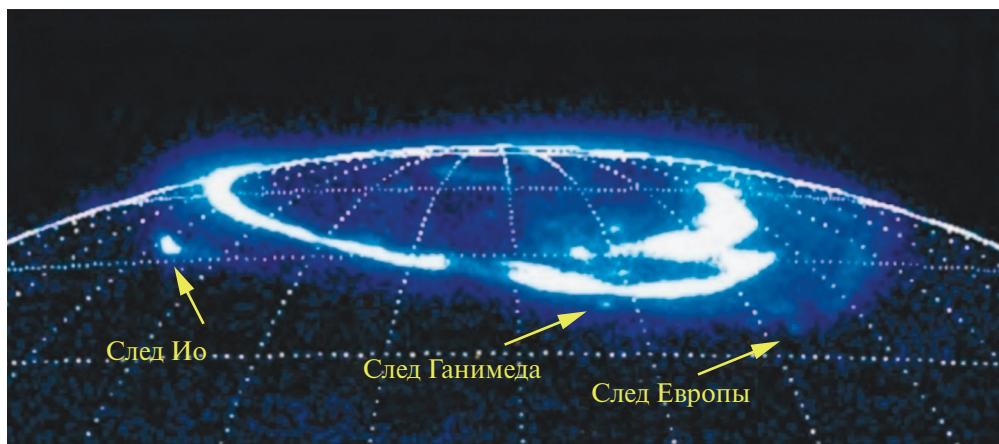
Маленькая луна Ио играет важную роль в формировании магнитного поля гиганта Юпитера, так как ее вулканы выбрасывают в атмосферу массу ионизованных и нейтральных атомов серы,

кислорода, хлора, натрия и калия, молекулярного диоксида серы, а также пыли хлорида натрия. Все это вещество захватывается магнитосферой Юпитера из тонкой атмосферы Ио со скоростью около 10^6 г/с. При этом в зависимости от степени ионизации это вещество образует или разреженное нейтральное облако вокруг луны, или плазменный тор, окружающий весь Юпитер.

Ионизованный газ из ионосферы Ио, который планета захватывает своим сильным магнитным полем, направляется вдоль силовых линий магнитного поля к ее полюсам. Получается как бы трубка, соединяющая Ио и приполярные области Юпитера, по которой заряженные частицы захватываются в области полюсов Юпитера. В результате в атмосфере Юпитера образуется «след» Ио – авроральное пятно, которое следует за вращением луны с некоторым отставанием. Подобным же образом, но в гораздо меньшей степени влияют на полярные сияния на Юпитере и две другие крупные луны – Европа и Ганимед. Их горячие авроральные

Схема магнитосферы Юпитера и воздействия Ио: плазменный тор (красного цвета), нейтральное облако (желтого цвета), потоковая трубка (зеленого цвета) и линии магнитного поля (голубого цвета). Источник: Википедия





Авроральные или горячие пятна (в УФ-диапазоне) Ио, Ганимеда и Европы – следы магнитных силовых линий, соединяющих ионосферы галилеевых лун с ионосферой Юпитера. Яркие пятна внутри основных колец, появляющиеся время от времени, связаны с взаимодействием магнитосферы и солнечного ветра. Источник: NASA & J. Clarke et al., *J. Geophys. Res.*, 2002

следы образуются за счет многократно ионизованных атомов кислорода, серы и, возможно, углерода, которые активно обмениваются зарядами.

Информация об энергии высыпавшихся электронов в полярной атмосфере Юпитера может быть получена в настоящее время лишь средствами дистанционного зондирования. Так, например, недавно было выполнено картирование (работа Жерара (Gerard) и др. в журнале *Ann. Geophysicae*, 2015) энергии электронов в полярных сияниях Юпитера с использованием спектральных наблюдений телескопа Хаббла, проведенных 8 января 2014 года.

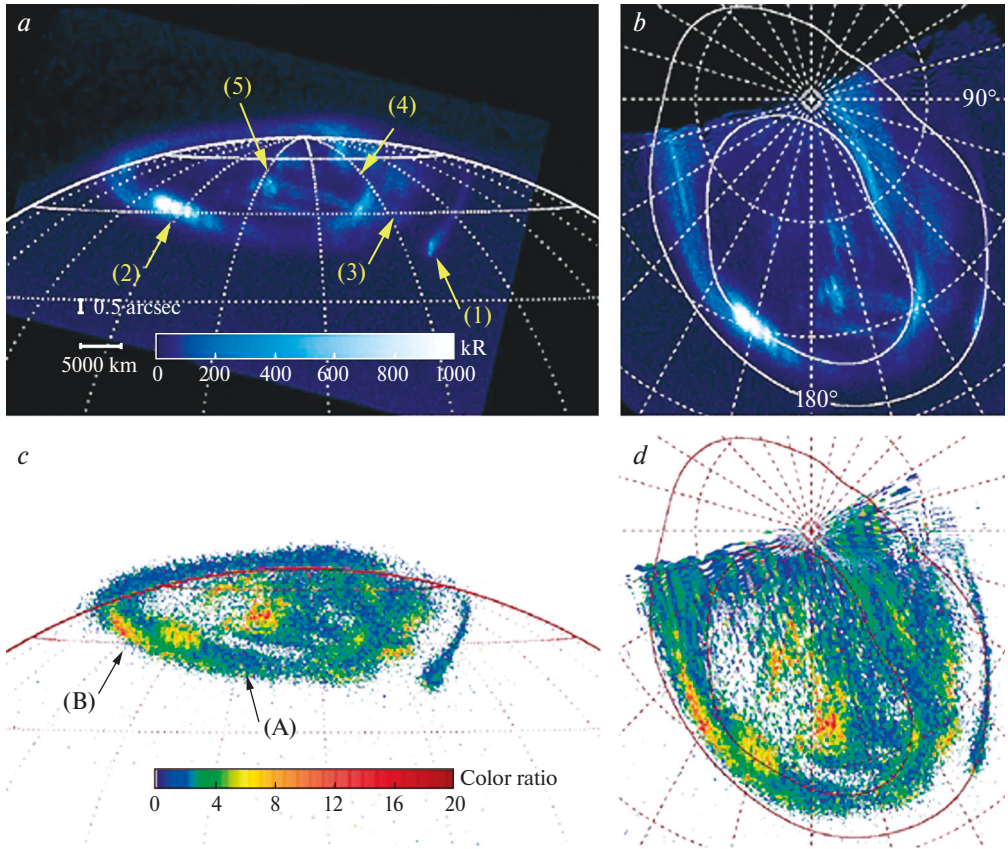
Это позволило оценить характерную энергию электронов, высыпавшихся в верхние слои атмосферы Юпитера.

СИСТЕМА САТУРНА

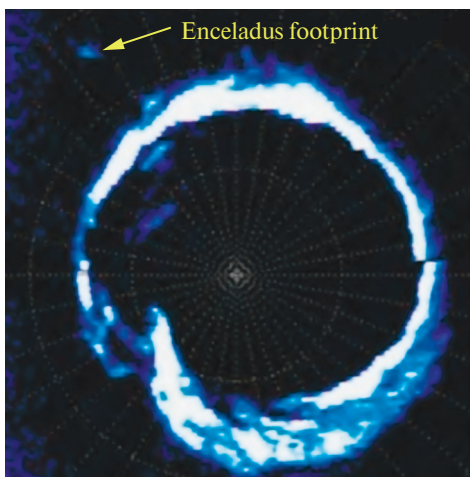
В системе Сатурна важную роль играет луна Энцелад, на южном полюсе которой в наблюдениях КА «Кассини» были открыты гейзеры, активно вы-

брасывающие шлейфы водяного пара с частицами льда в окружающее луно пространство. Эти шлейфы достигают в высоту нескольких сотен километров и становятся частью кольца E, в котором вращается Энцелад. Часть этого водяного пара ионизируется и со скоростью около 10^5 г/с пополняет магнитосферу Сатурна различными водородными и кислородными ионами и радикалами. Аналогично системе Юпитера, наблюдается захват плазмы из ионосферы Энцелада магнитосферой Сатурна, который приводит к возникновению следа Энцелада в полярном сиянии на Сатурне.

Полярные сияния на Сатурне гораздо сильнее, чем на Юпитере, зависят от интенсивности солнечного ветра, так как поступающей от внутренних ледяных лун Сатурна плазмы недостаточно для возбуждения полярных сияний. Полярные сияния на Сатурне, как и на Земле, образуют замкнутые или неполные кольца вокруг магнитных полюсов. Наблюдения телескопа Хаббла и приборов на борту КА «Кассини» показывают

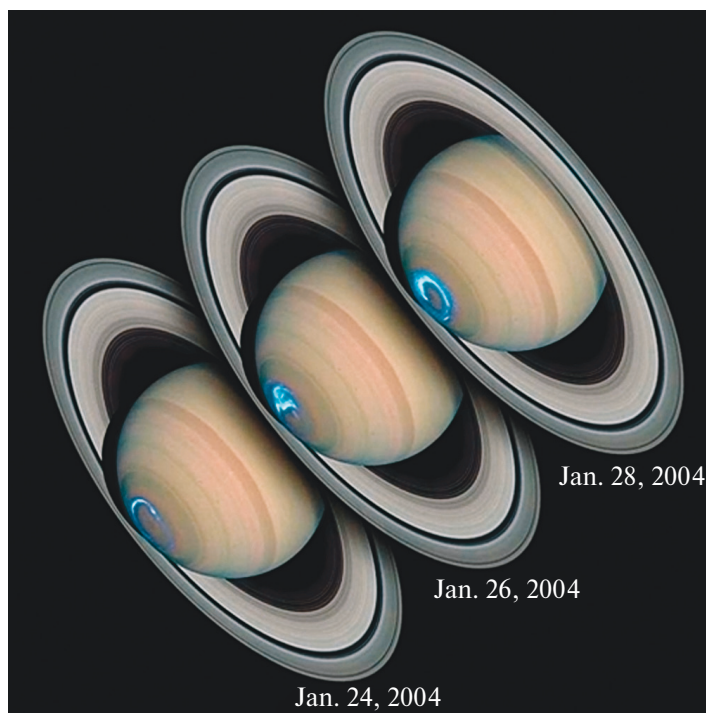


Реконструкция северного полярного овала на основе изображения, полученного 8 января 2014 года при помощи спектрографа STIS/HST. На панелях с) и d) показаны цветовые отношения, выявленные из УФ-свечений полярного сияния на Юпитере. Источник: NASA & Gerard et al., *J. Geophys. Res.*, 2015



Авроральный овал и горячее пятно (в УФ-диапазоне) Энцелада – след магнитных силовых линий, соединяющих ионосферу луны с ионосферой Сатурна. Источник: NASA & Pryor et al., *J. Geophys. Res.*, 2011

Структура сияний на южном полюсе Сатурна по результатам совместных наблюдений КТХ и камер на борту КА «Кассини». Источник: NASA, ESA, Дж. Кларк (J. Clarke) (Бостонский Университет), и З. Ливей (Z. Leavy) (STScI)



высокую изменчивость структуры полярных сияний: от устойчивых ярких колец до сверхбыстрых вспышек света, проносящихся через полюс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полярные сияния – это впечатляющее проявление связи между нашей намагниченной планетой и намагниченной плазмой, которая постоянно истекает от Солнца. Изучение этой связи является ключом к пониманию «космической погоды» как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения. Этот вопрос становится все более важным по мере того, как человечество начинает переходить к постоянному присутствию в космосе. Более того, визуализируя при помощи космических и наземных астрономических инструментов полярные сияния планет нашей Солнечной системы и планет вокруг других звезд, мы получаем новые

возможности уточнить наши представления о физических процессах, которые связывают планеты с плазменной средой их родительских звезд. Таким образом, для изучения физики планет Солнечной системы и планет других звезд, успешно применяются разработанные нашей группой в ИНАСАН математические модели. Так, эти модели используются для интерпретации локальных измерений и наблюдений полярных сияний в верхних слоях атмосфер планет земной группы, а также полярных сияний на планетах-гигантах Юпитере и Сатурне, которые наблюдаются космическим телескопом Хаббла.

Рекомендованная литература

1. Акасофу С. Полярные сияния. Успехи физических наук, 1966. Т. 89, вып. 4.
2. Омхольт А. Полярные сияния. М.: Мир, 1974. 248 с.
3. Мизун Ю.Г. Полярные сияния. М.: Наука, 1983.

Указатель статей и заметок, опубликованных в журнале «Земля и Вселенная» в 2021 году

БИСИКАЛО Д.В., ШЕМАТОВИЧ В.И., КАЙГОРОДОВ П.В., ЖИЛКИН А.Г. Оболочки горячих юпитеров – ключ к пониманию физики и эволюции экзопланет	6
БОГАЧЕВ С.А., УЛЬЯНОВ А.С., КИРИЧЕНКО А.С., ЛОБОДА И.П., РЕВА А.А. Солнце под микроскопом – природа вспышек, микро- и нановспышки	4
ВИБЕ Д.З., КИРСАНОВА М.С. Межзвездная пыль — между светом и тьмой	6
ВИБЕ Д.З., СТОЛЯРОВ А.В. Успехи и перспективы лабораторной астрохимии	2
ДЕСИНОВ Л.В. Природные катастрофы на Кавказе: вид с МКС	5
ЗОРИНА В.В. Объемный рельеф на плоских изображениях: исследуем сели и лавины по космическим снимкам	5
ИЛЛАРИОНОВ Е.А., САДЫКОВ В.М. Как машинное обучение помогает изучать Солнце	4
ИПАТОВ А.В., ВЕДЕШИН Л.А. Перспективы использования радиотелескопов на Земле, в космосе и на Луне	3
КАЦОВА М.М., СОКОЛОВ Д.Д. Солнечная и звездная активность в ожидании сюрпризов	3
КОЦЮРБЕНКО О.Р. Есть ли жизнь на... Венере?	3
ЛЕДЕНЦОВ Л.С., СОМОВ Б.В. Магнитное пересоединение и День взятия Бастилии	4
ЛУПЯН Е.А., ПРОШИН А.А., БУРЦЕВ М.А. Центр коллективного пользования «ИКИ-мониторинг»: новые возможности использования технологий спутни- кового мониторинга Земли	5
МАЛКОВ О.Ю., КОВАЛЕВА Д.А., ПОЛЯЧЕНКО Е.В., ХОПЕРСКОВ С.А. Звездные системы во Вселенной	6
МЕДВЕДЕВ А.А., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., ТЕЛЬНОВА Н.О., КУДИКОВ А.В., КУРАМАГОМЕДОВ Б.М. Западный Прикаспий под пристальным наблюдением	5
ПАНАСЮК М.И. Быстрые и очень энергичные. Транзиентные энергичные явления в атмосфере и в ближнем космосе	1

ПОСТНОВ К.А., ЧЕРЕПАЩУК А.М. Черные дыры, сингулярности и центр Галактики	1
СИЗОВА М.Д., ВЕРЕЩАГИН С.В., ТУТУКОВ А.В. Звездные скопления: в космическое будущее с Gaia	2
СИТНОВА Т.М. Археология Млечного Пути	6
СЫСОЕВ А.А., ИУДИН Д.И. Феноменология атмосферного электричества	1, 2
ЦВЕТКОВ А.С. Достижения современной астрометрии	3
ШЕМАТОВИЧ В.И. БИСИКАЛО Д.В. Полярные сияния в Солнечной системе	6
ШУСТОВ Б.М. Космические опасности: ближний космос	6

Гипотезы, дискуссии, предложения

РОДКИН М.В. Солнечная активность и социальные катаклизмы: текущий момент	4
--	---

Космонавтика XXI века

ЛИСОВ И.А. Подарок от «Лунной принцессы»	1
ЛИСОВ И.А. «Тяньгун» начинается	4
РЫЖКОВ Е.А. Японские страх и ужас: Martian Moons eXploration	2

Обсерватории, институты

ГОРДА С.Ю., СОБОЛЕВ А.М., КУЗНЕЦОВ Э.Д. Коуровка – обсерватория и астероид	3
КОЗЛОВА О.В. Крымская астрофизическая обсерватория: на перекрестке эпох и времен	2
КОЛОТИЛОВ Е.А., ТАТАРНИКОВА А.А. Крымская астрономическая станция им. Э.А. Дибая ГАИШ МГУ – история и перспективы	5
КУДРЯВЦЕВ Д.О., РОМАНИК И.И., СЕМЕНКО Е.А. САО РАН глазами астрономов	1
ШАТСКИЙ Н.И., ТАТАРНИКОВ А.М., КОРНИЛОВ В.Г., ПОТАНИН С.А., ЧЕРЕПАЩУК А.М., БЕЛИНСКИЙ А.А., ПОСТНОВ К.А. Новый астрономический центр ГАИШ МГУ: Кавказская горная обсерватория	4

In memoriam

Рафаил Львович Аптекарь (27.09.1936–29.12.2020)	1
---	---

ИНАСАН - 85 лет

ДЛУЖНЕВСКАЯ О.Б., ВИБЕ Д.З., ШУСТОВ Б.М., БИСИКАЛО Д.В. Познавая тайны Вселенной (к 85-летию Института астрономии РАН)	6
--	---

САЧКОВ М.Е., НАРОЕНКОВ С.А., БАРАБАНОВ С.И., НИКОЛЕНКО И.В.
Обсерватории и научные инструменты Института астрономии РАН 6

САЧКОВ М.Е., ШУСТОВ Б.М., СИЧЕВСКИЙ С.Г. Космические исследования
в Институте астрономии РАН 6

Люди науки

ГУБАРЕВ В.С. Три Звезды Героя: знания и страсти. Несколько страниц
из жизни великого ученого нашей Родины М.В. Келдыша 1, 2

САГДЕЕВ Р.З., ЗЕЛЕНЬИЙ Л.М., ПОПЕЛЬ С.И. Академик В.Е. Фортов
и международный проект «Вега» 3

ЕРЕМЕЕВА А.И. Ян Хендрик Оорт 4

История науки

СЕЛИВАНОВА О.В. Пионеры ракетной техники. Документы личных фондов
К.Э. Циолковского в Архиве РАН 1

СЕЛИВАНОВА О.В. Пионеры ракетной техники. Документы личного фонда
Ф.А. Цандера в Архиве РАН 3

СЕЛИВАНОВА О.В. Пионеры ракетной техники. Документы личных фондов
Н.А. Рынина и С.П. Королёва в Архиве РАН 4

История космонавтики

ВЕДЕШИН Л.А., ГЕРАСЮТИН С.А. Развитие отечествен-
ной метеорологической системы (к 60-летию начала разработки
метеорологических спутников в СССР) 5

ПОНОМАРЁВА В.Л. Судьба Гагаринского отряда: к 60-летию первого отряда
космонавтов 2

Майкл Коллинз 4

По выставкам и музеям

КАСАТКИНА С.В., САЧКОВ М.Е. Музей Ф.А. Бредихина в Заволжске.
К 190-летию со дня рождения великого астронома 3

Литературный космос

САЖИНА О.С. «Человеку нужен Человек»
(к 100-летию со дня рождения Станислава Лема) 5

СИНЕЛЬНИКОВ М.И. Пройдя по зеленой Земле... 4

EARTH & UNIVERSE

6 (342), 2021
November–December

TABLE OF CONTENT:

Editorial	3
Olga B. DLUZHNEVSKAYA, Dmitry Z. WIEBE, Boris M. SHUSTOV, Dmitry V. BISIKALO Unraveling the Secrets of the Universe. To the 85 th Anniversary of the Institute of Astronomy	4
Mikhail E. SACHKOV, Sergey A. NAROENKOV, Sergey I. BARABANOV, Igor V. NIKOLENKO Observatories and Scientific Instruments of the Institute of Astronomy	19
Mikhail E. SACHKOV, Boris M. SHUSTOV, Sergey G. SICHEVSKIY Space Research in the Institute of Astronomy	30
Oleg Yu. MALKOV, Dana A. KOVALYOVA, Evgeny V. POLYACHENKO, Sergey A. KHOPERSKOV Stellar Systems in the Universe	39
Dmitry V. BISIKALO, Valery I. SHEMATOVICH, Pavel V. KAYGORODOV, Andrey G. ZHILKIN The Envelopes of Hot Jupiters As a Key to the Understanding of Physics and Evolution of Extrasolar Planets	49
Boris M. SHUSTOV Space Hazards in the Near Space	59
Dmitry Z. WIEBE, Maria S. KIRSANOVA Interstellar Dust Between Light and Darkness	70
Tatyana M. SITNOVA The Milky Way Archaeology	80
Valery I. SHEMATOVICH, Dmitry V. BISIKALO Auroras in Solar System	92
Earth & Universe Index 2021	106
Table of Content and Selected Abstracts	109

EARTH & UNIVERSE

6 (342), 2021

November–December

Stellar Systems in the Universe

Oleg Yu. MALKOV, Dana A. KOVALYOVA, Evgeny V. POLYACHENKO,
Sergey A. KHOPERSKOV

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394821060049

We review the modern problems arising in the study of various stellar systems, from binary stars to galaxy clusters. We attempted to draw the reader's attention to still unsolved problems and enigmas of this modern field of astronomy.

The Envelopes of Hot Jupiters As a Key to the Understanding of Physics and Evolution of Extrasolar Planets

Dmitry V. BISIKALO, Valery I. SHEMATOVICH, Pavel V. KAYGORODOV,
Andrey G. ZHILKIN

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394821060050

The idea of distant stars possessing planets dates back to the epoch of Giordano Bruno, but we managed to prove it only recently. Prior to the discovery of first extrasolar planets we believed that other planetary systems should be similar to our own Solar System with several gas giant planets in outer orbits and a number of smaller rocky planets rotating close to the host star. However, one of first discovered planets unexpectedly appeared to be half the mass of Jupiter and orbiting its host star at a distance of about one seventh of the distance between Mercury and the Sun. By now there have been a large number of such planets discovered, all of them are now known as "hot Jupiters".

Space Hazards in the Near Space

Boris M. SHUSTOV

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394821060062

The topic of space hazards is a striking example of an eternal struggle between knowledge and fallacies. We present a very brief review of the modern state of the problem, i.e. the minimum, which would be useful to be aware of when talking about space hazards. This multi-faceted topic has become one of the major areas of the modern science. This topic is traditional for the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences. The special feature is that most of the research run by the Institute is devoted to space debris and the dangers posed by asteroids and comets. We present some recent interesting results obtained through these studies.

Interstellar Dust Between Light and Darkness

Dmitry Z. WIEBE, Maria S. KIRSANOVA

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394821060074

Space dust is an integral element of interstellar medium, along with interstellar duct and various fields. To understand the space phenomena, the astronomers need to know the properties of dust particles, since we observe any object in the Universe through this dusty curtain. The nuclei of dust particles, consisting of carbon and silicon compounds, are covered with icy mantles made of frozen water and other molecules. One can determine the composition of the mantles and high-melting silicon nuclei using observational methods of Earth-bound astronomy. But it is much harder to study the composition of carbon nuclei, since one can observe their emissions only for a limited class of objects. These can be observed in photodissociation regions in mid- and far-IR range, which is mostly inaccessible from the Earth. The photodissociation regions (PDRs) are regions in space, transitional between ionized hydrogen and molecular gas. Planning of every extraterrestrial infrared observatory goes along with intense theoretical studies of carbon space dust. The modeling of PDRs, studies of microphysics in the dust evolution in PDRs, observations of PDRs with Russian and foreign telescopes are run in the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences.

The Milky Way Archaeology

Tatyana M. SITNOVA

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394821060086

Every day about tens of new papers emerge, which cover the chemical composition and motion parameters of the oldest stars in the Milky Way and the nearest dwarf galaxies; new stellar streams are discovered. These wealth of new papers are drawn by new data about coordinates, velocities, brightness and chemical composition of stars from the observations via *Gaia* spacecraft and Earth-bound spectral surveys. We present the most illustrative results, which help to imagine dynamical and chemical processes in our Galaxy and re-establish its chronology. To what extent can we go into past with the help of modern astronomy? How much does the most massive star “weigh”? What is Fimbulthul? Which subsystems does our Galaxy consist of? How are various chemical elements produced? What was our Galaxy like earlier and what will become of it in the future? The answers to these questions can be found in the paper.

Auroras in Solar System

Valery I. SHEMATOVICH, Dmitry V. BISIKALO

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394821060098

For last twenty years our group has been modelling the processes of solar wind plasma penetrating the outer layers of planetary atmospheres in the Solar system. The models of electron and proton auroras were used to study the northern lights and explanation of observations in the upper layers of the Earth's (NASA's IMAGE project), Venusian (ESA's *Venus Express* mission) and Martian (ESA's *Mars Express* and NASA's MAVEN missions) atmospheres. The same models were implemented to interpret the observations of auroras at giant planets Jupiter and Saturn, made by Hubble space telescope. Now, our mathematical models of plasma particles precipitation are used to study various types of newly discovered auroras on Mars – discrete, diffuse, and proton, using available data of *Mars Express* and MAVEN spacecraft. We also study the effect of particle precipitation on the upper and middle layers of Martian atmosphere in *ExoMars* space project (ESA/Roscosmos).

Индекс 70336

Земля и Вселенная, 6/2021

Приглашенный редактор: О.Ю. Малков

Заведующая редакцией А.Ю. Обод

Редакторы С.А. Герасютин, Д.А. Кононов, О.С. Сажина

Корректор С.О. Розанова

Верстка макета Н.В. Мелкова

Просим обращаться

по вопросам публикации материалов:

(495)276-77-35 (доб. 42-31), e-mail: zevs@naukaran.com

по вопросам сотрудничества:

(495)276-77-35 (доб. 43-01 или 43-02),

e-mail: journals@naukaran.com

Журнал зарегистрирован Государственным комитетом

Совета министров СССР по печати 28 июня 1991 г.

Свидетельство о регистрации № 2119

www.naukabooks.ru/zhurnali/katalog/zemlja-i-vselennaja/

Все права защищены.

Перепечатка материалов возможна только с разрешения редакции.

Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.

Все иллюстрации в статьях предоставлены авторами.

Ответственность за точность и содержание рекламных материалов несут рекламодатели

12+

Сдано в набор 26.10.2021 г. Подписано к печати 25.12.2021 г.

Дата выхода в свет 30.12.2021 г. Формат 70 × 100¹/₁₆

Цифровая печать Усл.печ.л. 9.75 Уч.-изд.л. 10.0 Бум.л. 3.75

Тираж 1000 экз. Зак. 651 Цена свободная

Учредители: РАН, ФГУП «Издательство «Наука»

Редакция и издатель: ФГУП «Издательство «Наука»

Адрес: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 90

Отпечатано в типографии ФГУП «Издательство «Наука»

Адрес: 121099 Москва, Шубинский пер., 6

АкадемКнига

Букинистический отдел осуществляет покупку и продажу научной литературы, книг по искусству, антикварных изданий, старинных открыток, гравюр и фотографий

Для оценки крупных библиотек выезжаем на дом

Принимаем заказы

Формируем библиотеки

Адрес: 101000, Москва, Б. Спасоглинишевский пер., 8, стр. 4

E-mail: bukinist@naukaran.com

Справки по телефону:

8 (495) 624-7219





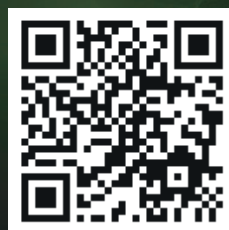
НОВИНКИ И АКЦИИ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ



[instagram.com/naukapublishers](https://www.instagram.com/naukapublishers)



[facebook.com/naukapublishers](https://www.facebook.com/naukapublishers)



vk.com/naukapublishers

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "НАУКА"

ПО 50 РУБ.

акция проводится в сети магазинов "Академкнига"
и в интернет-магазине naukabooks.ru



ЕЩЕ БОЛЬШЕ КНИГ И БОЛЬШЕ СКИДОК

ДО 80%

акция проводится в сети магазинов "Академкнига"
и в интернет-магазине naukabooks.ru

условия акций на сайте naukabooks.ru

