

К 300-ЛЕТИЮ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (РАН)

Отделение физических наук РАН в XXI веке:
космос и астрофизика

Л.М. Зелёный, Е.Ю. Кильпио

Основой для данной статьи послужил одноимённый доклад, сделанный академиком Л.М. Зелёным на научной сессии Общего собрания Отделения физических наук РАН "300-летие Академии: успехи и достижения физических наук в XXI веке" в мае 2024 года. Информация, представленная в докладе, была дополнена и расширена, но, несмотря на это, в рамках одной статьи оказалось более чем сложно описать всё, что было сделано за прошедшую четверть века в достаточно непростой области, как астрономия и науки о космосе, перечислить все достижения и всех наших учёных, благодаря которым эти достижения были получены. Однако мы надеемся, что на основе представленной выборки читатели смогут составить общее представление о значимости многих ярких академических исследований, выполнявшихся в России в достаточно непростой для науки период, и оценить масштабы её достижений. Под академическими мы понимаем ниже исследования, ведущиеся в Институтах РАН, ведущих вузах и университетах и других организациях, находящихся под научно-методическим руководством РАН.

Ключевые слова: астрономия, астрофизика, космические исследования

PACS numbers: 07.87.+v, 95.55.-n, 96.20.-n, 96.30.-t

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.05.039794>

Содержание

- 1. Введение. Российская академическая наука в XXI веке: астрономия и космические исследования (1270).**
 - 2. Астрономия и астрофизика (1272).**
 - 2.1. Чтобы помнили: коллеги Отделения физических наук РАН, ушедшие из жизни.
 - 2.2. Наземные средства наблюдения, теоретические исследования и лабораторные эксперименты.
 - 3. Космическая астрофизика (1282).**
 - 3.1. Рентгеновская и гамма-астрономия.
 - 3.2. Ультрафиолетовая Вселенная.
 - 3.3. Радиоастрон и Миллиметр.
 - 4. Многоканальная астрономия (1291).**
 - 4.1. Гравитационные волны.
 - 5. Ближний космос (1294).**
 - 5.1. Исследования солнечно-земных связей и космической погоды.
 - 6. Исследование планет Солнечной системы и Луны (1300).**
 - 6.1. Меркурий.
 - 6.2. Венера.
 - 6.3. Марс.
 - 6.4. Исследования планет и Луны методами ядерной планетологии.
 - 6.5. Российская Лунная программа и научное освоение Луны.
 - 7. Заключение (1306).**
- Список литературы (1307).**

Л.М. Зелёный^(1,а), Е.Ю. Кильпио^(2,3,б)

⁽¹⁾ Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация

⁽²⁾ Отделение физических наук РАН, Ленинский просп. 32а, 119334 Москва, Российская Федерация

⁽³⁾ Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пос. Научный, Бахчисарайский район, 298409 Республика Крым, Российская Федерация

E-mail: ^(а) lzelenyi@cosmos.ru, ^(б) lena@gp.ad.ac.ru

Статья поступила 10 октября 2024 г.

1. Введение.

Российская академическая наука в XXI веке:
астрономия и космические исследования

Астрономия оказывает существенное влияние на жизнь человечества с древних времён. При этом сложность исследования объектов, находящихся от нас на огромных расстояниях, стимулирует постоянный поиск и развитие новых методов наблюдения, средств анализа и пр. В новом тысячелетии бурное развитие технологий обеспечило существенный рост возможностей как в получении новых наблюдательных данных, так и в их анализе. В частности, спутниковые технологии, обеспечив уже в XX в. выход приборов для дистанционных наблюдений астрофизических объектов за пределы земной атмосферы и ионосферы, сделали эти наблюдения поистине всеволновыми. Как мы увидим ниже, отечественные космические проекты программы "Спектр" дали российским учёным новые великолепные возможности для прорывных исследований.

Помимо этого, космические аппараты позволили проводить исследования ключевых процессов в космической плазме, в атмосферах планет и на их поверхности *in situ* — на месте. За прошедшие два с половиной десятилетия измерения, проводившиеся отечественными специалистами на российских и зарубежных космических аппаратах, существенно обогатили наше понимание солнечно-земных связей, физики гелиосферы, физико-химических процессов на Луне, Марсе и Венере.

Кроме того, следует отметить, что если в прошлом веке астрономия с началом космической эры, давшей

возможность вынесения наблюдательных средств за пределы земной атмосферы, стала многоволновой, то сейчас она уже в полной мере является многоканальной. Помимо традиционного канала электромагнитного излучения, в современных исследованиях много важной информации дают нейтринное излучение, космические лучи и, конечно, недавно открытые гравитационные волны.

Современные астрономические исследования опираются на богатое сочетание технологий, систем и процессов, применяемых на Земле и в космосе. Создаются новые более мощные и совершенные инструменты наземного и космического базирования. Например, в рамках Европейской южной обсерватории (ЕЮО) строится телескоп ELT (Extremely Large Telescope) с диаметром зеркала 39 м, первый свет от него планируется получить в 2028 г., в конце 2021 г. был запущен уникальный космический телескоп James Webb, с 2013 г. на орбите работает астрометрический спутник GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics), основной целью которого является составление подробной карты распределения звёзд нашей Галактики, — это лишь часть большого списка.

Помимо этого, важным компонентом также являются высокопроизводительные вычисления и информационные технологии. В XXI веке возникло направление, связанное с работой с огромными массивами информации (Big Data). Оно, конечно, в целом относится не только к астрономии, но в связи со значительными достижениями в наблюдательных, регистрирующих и вычислительных технологиях количество получаемых астрономических данных увеличивается лавинообразно, и эти данные нужно не только получать, но и эффективно работать с ними, извлекая максимум значимой информации. Кроме того, нельзя не отметить, что раскрытие всего научного потенциала астрономических данных — процесс, который часто происходит в течение многих лет и благодаря совместным усилиям нескольких поколений исследователей. Также проблема больших данных в астрономии относится не только к данным непосредственных наблюдений, но и не в меньшей степени к данным моделирования, получаемым при исследовании астрофизических моделей. Прогресс в развитии вычислительных средств, подчиняющийся экспоненциальному закону Мура, приводит и будет приводить к столь же стремительному росту сложности численных моделей и, соответственно, к усложнению алгоритмов, используемых при анализе результатов моделирования. Вычислительная астрофизика сочетает в себе современные вычислительные методы, новые аппаратные разработки, передовые алгоритмы, оригинальные программные реализации и связанные с ними технологии для открытия новых явлений и составления прогнозов в астрономии. Она включает интеллектуальный анализ данных, искусственный интеллект, численный анализ, разработку алгоритмов и аппаратного обеспечения и т. д.

Получают развитие новые методы так называемой лабораторной астрофизики — создаются установки, позволяющие моделировать процессы, происходящие в космосе в земных условиях. Можно выделить четыре основных направления: плазменная астрофизика, атомная и молекулярная астрофизика, физика и химия твёрдых материалов и конденсированных сред (пыли и льдов), а также ядерная астрофизика и астрофизика элементарных частиц.

В качестве "ложки дёгтя" можно упомянуть, что прогресс накладывает и некоторые ограничения на наблю-

дения — так называемая "проблема тёмного и тихого неба", когда антропогенные помехи вредят качеству наблюдательных данных. Эта проблема достаточно серьёзная и многоплановая — она включает в себя и световое загрязнение, и радиочастотные помехи, и огромные по численности группировки спутников, закрывающих небо для наблюдений. Данная проблема требует пристального внимания и обсуждается во всём мире, в том числе и в ООН. В пресс-релизе, выпущенном по итогам Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза (МАС), прошедшей в августе, ей также отведено значимое место. Мы будем говорить об этом ниже в связи с проблемами Пулковской обсерватории.

Но всё сказанное выше касалось в основном методов и инструментов исследований. Разумеется, в результате появления таких новых инструментов и методов было сделано и делается значительное число новых открытий. Появление представлений о мультивселенных, детектирование гравитационных волн, значительный прогресс в астрохимии и астробиологии, открытие многих тысяч планет вокруг других звёзд (экзопланет) — это лишь некоторые примеры прогресса в астрономии нового тысячелетия.

Нельзя не отметить и то, что за прошедшие четверть века за достижения в области астрономии были присуждены несколько Нобелевских премий. К сожалению, российские учёные в списке лауреатов пока не фигурировали, но, тем не менее, многие важные научные открытия были за эти годы сделаны и в нашей стране.

Такое бурное развитие астрономии и появление новых направлений, в частности, вызвало существенный пересмотр структуры подразделений крупнейшей международной астрономической организации, объединяющей астрономов всего мира, — МАС на Генеральной ассамблее организации в 2015 г. — появились новые подразделения, отражающие современные направления исследований. Серьёзные изменения произошли и в работе COSPAR — Международного комитета по космическим исследованиям — всё больше внимания уделяющего новым проблемам изучения дальнего космоса.

Направления исследований, проводимых в области астрономии в России, отражены в Программе фундаментальных исследований на долгосрочный период, утверждённой Распоряжением Правительства Российской Федерации от 31.12.2020 г. № 3684-р., и в целом соответствуют актуальным научным направлениям мировой астрономии.

Следует также отметить, что в последние годы существенно возросла роль астрокосмических методов в решении насущных практических задач нашей страны, среди которых можно выделить астрономическую поддержку и развитие российского сегмента системы координатно-временного и навигационного обеспечения (система "Квазар-КВО"), а также создание системы прогноза космической погоды, необходимой для безопасного освоения околоземного космического пространства, арктических регионов нашей страны и решения других задач, включая оборонные.

В данной статье далее мы ориентируемся на достижения российской науки, особо отмечая вклад членов Отделения физических наук Российской академии наук (ОФН РАН). Некоторые из достижений, отмеченных в статье, относятся к более раннему периоду, однако они получили признание в виде премий и высоких наград лишь недавно, и мы считаем необходимым упомянуть и их.

2. Астрономия и астрофизика

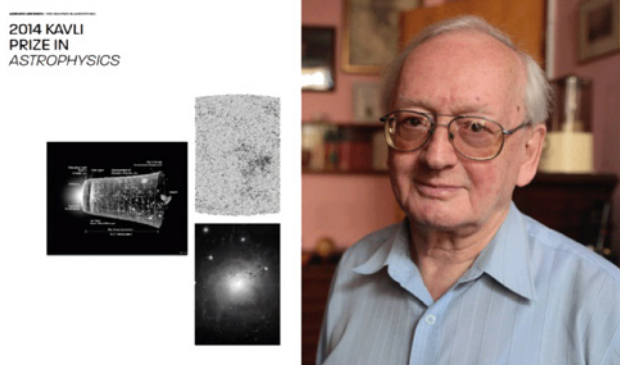
Среди научных направлений, относящихся к деятельности ОФН РАН, астрономия занимает заметное место. Приведем немного статистики. Среди 43 научных организаций ОФН РАН (в настоящее время они имеют статус организаций, в отношении которых РАН осуществляет "отдельные полномочия, предусмотренные постановлениями Правительства Российской Федерации от 5.06.2014 г. № 521 и от 24.12.2018 г. № 1652") есть как чисто астрономические, такие как Специальная астрофизическая обсерватория РАН (САО РАН), так и имеющие в своём составе соответствующие подразделения или научные группы (например, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН — ФИАН или Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН — ФТИ Иоффе). Всего на данный момент астрономические исследования ведутся в 16 организациях ОФН РАН. Достижения учёных, работающих в них, за прошедшие 25 лет были отмечены несколькими Государственными премиями, а также многими медалями и премиями Российской академии наук. Были и международные награды. Подтверждением высокого международного признания можно считать и то, что астрономы — члены нашего Отделения — занимали высокие посты в международных организациях, в частности, академик Н.С. Кардашев и чл.-корр. РАН Б.М. Шустов в разные годы были вице-президентами Международного астрономического союза, академик Л.М. Зелёный много лет являлся членом Бюро COSPAR и по сей день является членом Управляющего Совета ISSI (Международного института космических наук). В настоящее время национальным представителем России в COSPAR является чл.-корр. РАН О.И. Короблёв.

2.1. Чтобы помнили: коллеги Отделения физических наук РАН, ушедшие из жизни

Не имея возможности в рамках одной статьи охватить всю огромную работу и множественные достижения наших соотечественников-астрономов, далее в ходе повествования мы старались по возможности отдать дань памяти тем, кто уже не с нами, предполагая, что действующие астрономы, возможно, ещё внесут дополнительный вклад в науку, помимо уже достигнутого. Конечно, мы упоминаем и тех, чьи достижения отмечены Государственными премиями.

Начнём с теоретиков.

В конце 2023 года ушёл из жизни наш признанный классик — академик Алексей Александрович Старобинский, много лет проработавший в Институте теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН (ИТФ РАН). Хотя наукометрические показатели далеко не всегда отражают реальный масштаб учёного, в данном случае можно упомянуть, что по индексу Хирша он если и не является лидером по ОФН РАН, то очень близок к этому. Но дело, конечно же, в другом. Как сказано в формуле престижной международной премии Кавли, которую А.А. Старобинский 10 лет назад получил вместе с А. Линде и А. Гуттом, без разработанной ими модели быстрого экспоненциального расширения Вселенной — космологической инфляции — общепринятая теория Большого взрыва не была бы полной. Главное наблюдательное предсказание — существование космологических гравитационных волн. Некоторое время назад в космологии забурило

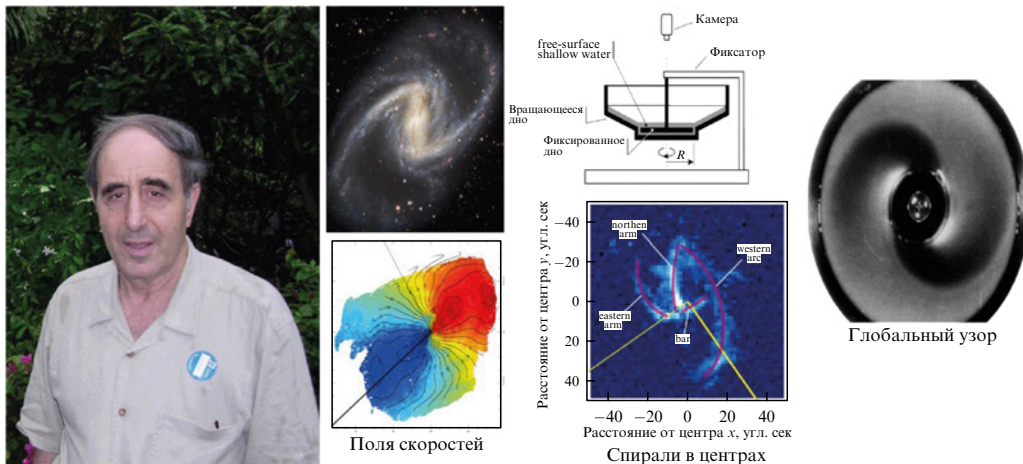


Академик А.А. Старобинский (1948–2023 г.).
Лауреат премии Кавли 2014 г.

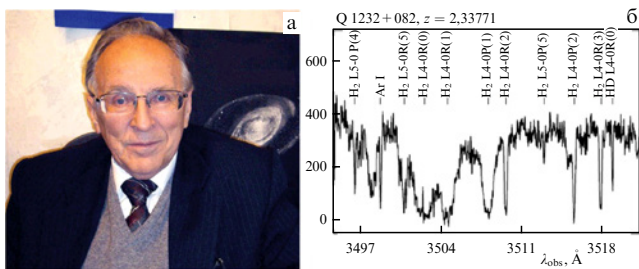
великое возбуждение, когда казалось, что по измерениям особенностей реликтового излучения эти волны уже вроде бы обнаружены — но всё "испортил" учёт рассеяния на пыли, имитировавший эффект, который мог бы быть произведён гравитационными волнами. Алексей Александрович активно работал до последних дней жизни, в частности, он был соавтором статьи, опубликованной в 2023 г. группой из Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) по проекту "Спектр-РГ", посвящённой измерениям рентгеновского излучения газа скоплений галактик на рекордно больших расстояниях от центра скопления [1], о чём мы ещё расскажем в соответствующем разделе.

В 2010 г. нас покинул академик Алексей Максимович Фридман. Среди многих научных увлечений/достижений Алексея Максимовича главным была динамика спиральных галактик. Великий Фейнман тоже не обошёл вниманием эту проблему. А.М. Фридман развил теорию гидродинамической неустойчивости, объясняющей формирование такой спиральной структуры, организовал моделирование таких явлений на установках с мелкой водой (столь непохожие на первый взгляд явления описываются сходными уравнениями). Параллельно с этими экспериментами в САО РАН, совместно с коллегами из Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета (ГАИШ МГУ) были проведены астрономические наблюдения таких структур. А.М. Фридман объяснил, почему в центре галактик двухрукавная спиральная структура сменяется одноруквавной, и вместе с коллегами получил за цикл этих работ Государственную премию 2003 г. ("Предсказание и открытие новых структур в спиральных галактиках". Афанасьеву В.Л., Додонову С.Н., Поляченко В.Л., Фридману А.М., Засову А.В., Сильченко О.К., Снежкину Е.Н., Хоружему О.В.)

Алексей Максимович совместно с академиком Д.А. Варшаловичем (ФТИ Иоффе) и академиком А.М. Черепашуком (ГАИШ МГУ) в 2008 г. стал лауреатом ещё одной Государственной премии, вручённой за ряд открытий в области физики галактик, межгалактической среды и релятивистских объектов. А упомянутый здесь наш замечательный коллега академик Дмитрий Александрович Варшалович (1934–2020 гг.), автор классической монографии "Квантовая теория углового момента" [2], внёс яркие вклады в различные области современной астрофизики, в том числе спектроскопию межзвёздных моле-



Академик А.М. Фридман.



Академик Д.А. Варшалович.

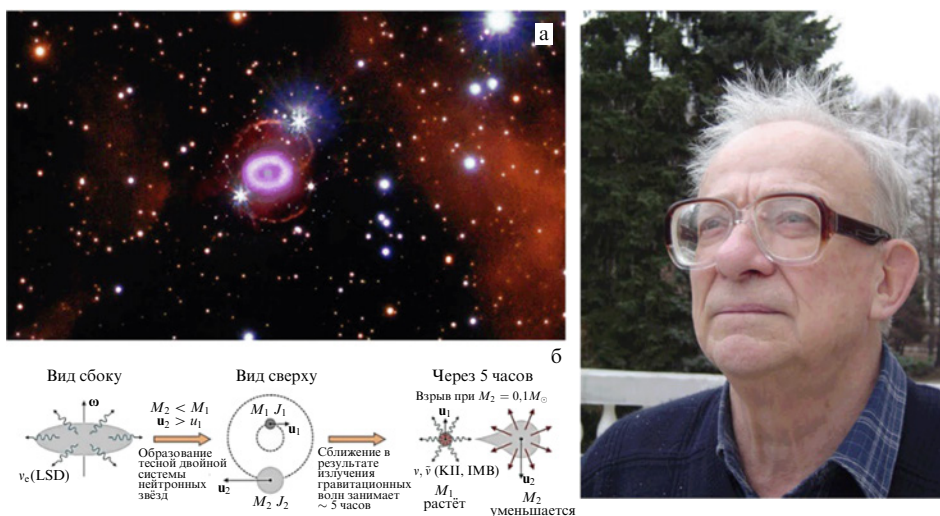
вместно с коллегами из ИКИ РАН Р.А. Сюняевым, Е.М. Чуразовым, С.Ю. Сазоновым активно участвовал в интерпретации спектров аннигиляционного излучения из центра Галактики, измеренного обсерваторией ИНТЕГРАЛ.

Ещё один выдающийся теоретик нашего отделения академик Александр Викторович Гуревич (1930 – 2023 гг.) известен многими яркими работами. До сих пор настольной у космофизиков является его книга с Я. Альпертом и Л. Питаевским о взаимодействии спутников с ионосферной плазмой [3]. В последнее десятилетие Александр Викторович много занимался моделями магнитосфер пульсаров и их радиоизлучением в обыкновенной и необыкновенной модах электромагнитных волн. А.В. Гуревич внёс значительный вклад и в физику молниевых разрядов, о чём ещё будет рассказано ниже.

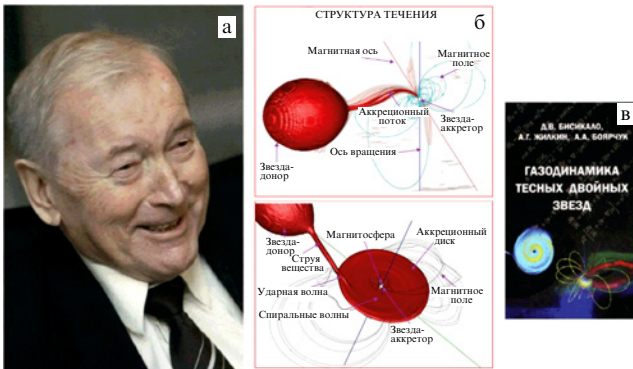
Следует также упомянуть чл.-корр. РАН Владимира Сергеевича Имшенника (1928 – 2023 гг.).

Владимир Сергеевич имеет заслуги в разных областях физики: в теоретической астрофизике и радиационной гидродинамике, физике плазмы и управляемого термоядерного синтеза. В астрофизике он известен исследова-

кул и физики квазаров. В частности, в 2000-х годах Д.А. Варшаловичем и его учениками выполнены работы по теоретическому моделированию возникновения первичных химических элементов на ранних этапах эволюции Вселенной. В 2001 г. ими были открыты молекулярные облака, содержащие наряду с молекулами водорода H₂ молекулы HD, в которых один атом водорода замещён атомом дейтерия. Это открытие позволило оценить химический состав и параметры вещества, образовавшегося на ранних этапах эволюции Вселенной. Со-



В.С. Имшенник. (а) Современное изображение остатка Сверхновой 1987А, полученное путём объединения данных космических телескопов Chandra, Webb и Hubble (X-ray: NASA/CXC/SAO; Optical/Infrared: NASA/ESA/STScI; Infrared: NASA/ESA/CSA/STScI; Image Processing: NASA/CXC/SAO/J. Major). (б) Схема ротационного механизма взрыва сверхновой.



(а) Академик А.А. Боярчук; (б) схематически показаны модели двойных звёзд; (в) обложка коллективной монографии "Газодинамика тесных двойных звёзд" [4].



Академик РАН В.В. Железняков.

ниями физических процессов в звёздах, их внутреннего строения и гидродинамической эволюции, включая процессы гравитационного коллапса и взрыва сверхновой: радиационную и нейтринную гидродинамику.

Сложно переоценить вклад в развитие отечественной астрономии и космических исследований конца прошлого – начала нынешнего тысячелетия академика Александра Алексеевича Боярчука (1931 – 2015 гг.). Александр Алексеевич имеет впечатляющий список научных заслуг. Широко известен, в частности, своими классическими работами по взаимодействующим двойным звёздам разных типов. Он первым предложил общепринятую сейчас модель симбиотической звезды, тесно связавшую общие принципы звёздной эволюции с наблюдениями широкого класса нестационарных звёзд, обосновал общепринятую в настоящее время концепцию феномена ещё одного типа звёзд с необычными спектральными характеристиками — Ве-звёзд (горячие звёзды спектрального класса В, отличающиеся наличием в спектрах эмиссионных линий). К его поздним достижениям, конечно, следует отнести то, что он связал астрофизические наблюдения с созданной им в Институте астрономии РАН (ИНАСАН) школой трёхмерного газодинамического моделирования. Соответствующие циклы работ отмечены премией А.А. Белопольского. А.А. Боярчук был крупным организатором науки и много лет играл руководящие роли в нашем Отделении. Высоким международным признанием можно считать то, что в 1990-х гг. он был президентом Международного астрономического союза. Конечно же, нельзя не отметить и большую роль А.А. Боярчука в развитии внеатмосферной астрономии в нашей стране, в частности, в ультрафиолетовом диапазоне, но об этом ещё будет упомянуто в соответствующей части статьи.

Необходимо сказать несколько слов об академике Владимире Васильевиче Железнякове (1931 – 2022 гг.), более 30 лет являвшемся членом нашего Отделения. Владимир Васильевич — подлинный классик, посвятивший свою работу детальному изучению механизмов радиоизлучения Солнца, планет, различных астрофизических объектов. У многих поколений космофизиков настольной книгой была его книга "Радиоизлучение Солнца и планет" [5]. В.В. Железняков детально изучил проявления так называемого двойного плазменного резонанса (совпадение частоты верхнего гибридного резонанса с одной из гармоник электронной гирочастоты), связан-

ные с резким увеличением инкремента электростатических плазменных волн. Модель Железнякова объясняет появление характерной полосатой "зебра-структуры" в динамических спектрах спорадического радиоизлучения. Владимир Васильевич продолжал активно работать вплоть до последних месяцев своей жизни — в конце 2022 г. вышла его статья о теории происхождения квазигармонических всплесков на пульсаре в Крабовидной туманности [6].

2.2. Наземные средства наблюдения, теоретические исследования и лабораторные эксперименты

2.2.1. Оптическая астрономия.

Приходится признать, что российская наблюдательная база в астрономии в целом по сравнению с ведущими мировыми центрами существенно более скромна. Отчасти это связано с тем, что астроклиматические условия в нашей стране далеки от идеальных и не могут сравниться, например, с Чили или Канарскими островами, отчасти — с недостатком желаемого финансирования (впрочем, о финансировании то же самое скажут вам и учёные на благословенных Канарских или Гавайских островах). На протяжении многих лет астрономами нашей страны предпринимались попытки вступить в Европейскую южную обсерваторию (ЕЮО), однако, поскольку вступление требовало значительных средств, вопрос периодически "подвисал". В настоящее время вопрос, как всем понятно, закрылся сам собой. Это ещё раз подчёркивает важность поддержки и развития собственной астрономической инфраструктуры наземного и космического базирования. Успешно реализуемые космические обсерватории (особенно серии "Спектр") частично помогают исправить ситуацию с доступом российских астрономов к уникальным данным, но и развитие собственной наземной базы — не только в учебных, но и научных целях — по-прежнему необходимо.

Самые крупные инструменты (оптические и радиотелескопы) относятся к институтам и обсерваториям РАН (САО РАН, Крымская астрофизическая обсерватория — КраО РАН, ИНАСАН, Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН — ИСЗФ СО РАН, Институт прикладной астрономии РАН — ИПА РАН и др.), самым крупным вузовским телескопом является 2,5 метровый телескоп ГАИШ МГУ, недавно введённый в строй и ставший третьим по величине оптическим телескопом нашей страны. Но в целом, за редким исключением, наши инструменты были созданы достаточно давно.

Флагманом отечественной наземной астрономии и в новом тысячелетии по праву считается САО РАН в по-



Телескопы БТА и РАТАН-600.



(а) Академик РАН Ю.Н. Парийский. (б) Ю.Н. Парийский с академиком-секретарём Отделения Л.А. Аршимовичем на стройплощадке радиотелескопа РАТАН-600, 1969 г.

селке Нижний Архыз, где расположены крупнейшие инструменты нашей страны — шестиметровый оптический телескоп БТА и 600-метровый кольцевой радиотелескоп РАТАН-600 (РАдиоТелескоп Академии Наук). И БТА, и РАТАН-600 были построены ещё в 1970-х гг., но всё ещё имеют большое значение и успешно работают на благо астрономов всей нашей страны.

Говоря о вкладе членов нашего Отделения, необходимо отметить, что создание РАТАН-600 и формирование блестящей школы радиоастрономов во многом является заслугой академика Юрия Николаевича Парийского (1932–2021). Ю.Н. Парийский внёс большой вклад и в создание радиоинтерферометрической сети "Квazar-KBO", о которой ещё будет рассказано далее. РАТАН-600 и сейчас является крупнейшим действующим телескопом России, выполняющим массовые измерения галактических и внегалактических радиоисточников на частотах 1,2, 2,3, 4,7, 8,2, 11,2 и 22,3 ГГц.

Шестиметровый телескоп БТА — самый большой оптический телескоп нашей страны, в настоящее время уже не входит в число десяти самых крупных инструментов мира, но всё же является крупнейшим в мире телескопом, на котором выполняются наблюдения методом 3D спектроскопии с интерферометрами Фабри–Перо высокого разрешения. Кроме того, уникальность БТА связана с его расположением — он является крупнейшим телескопом в Евразии и самым северным из крупных телескопов мира.

САО РАН непрерывно работает над развитием своей инструментальной базы, разрабатывая новое оборудование и совершенствуя методы наблюдений. Обновляется парк светоприёмной аппаратуры — за последние годы в САО РАН были созданы широкоформатные системы регистрации оптического излучения. Всё это позволяет и в настоящее время получать высококачественные наблюдательные данные.

Следует особо отметить создание системы широкоугольных роботизированных малых полуметровых теле-

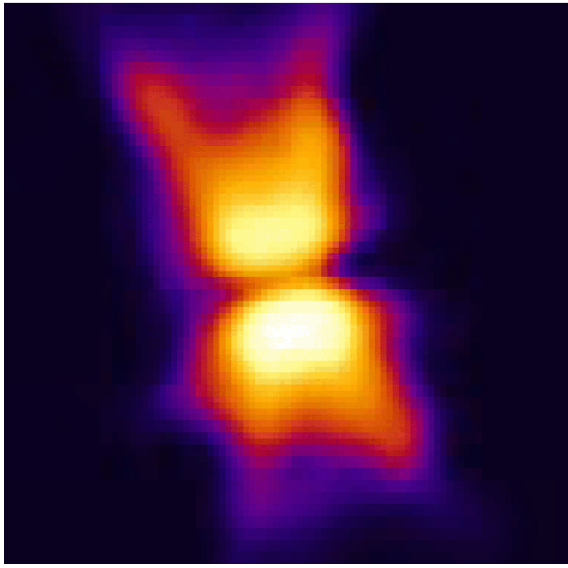


Общий вид комплекса малых 0,5-м телескопов САО РАН.

скопов. Наконец и российские наблюдатели подключились к, пожалуй, одному из самых интересных астрономических исследований — поиску экзопланет, об этом мы ещё немного расскажем далее.

Если говорить о фундаментальных научных достижениях САО РАН за последнюю четверть века, полученных с помощью инструментов обсерватории, то здесь, вне всякого сомнения, нельзя не отметить яркие результаты, полученные группой д.ф.-м.н. И.Д. Караченцева [7]. В результате многолетних наблюдений сотен галактик в Местном объёме (local volume — LV) радиусом 11 Мпк, выполненных в оптическом диапазоне на телескопах БТА, космическом телескопе им. Хаббла и радиотелескопах разных обсерваторий, получены значения средней плотности барионного вещества и тёмной материи. В Местном объёме отношение массы газа к массе звёздного вещества примерно равно 0,5. Запасов газа хватит ещё на 10 млрд лет, т.е. на Хаббловское время. Средняя плотность вещества здесь $3,7 \times 10^8 M_{\odot} \text{ Мпк}^{-3}$. Плотность же тёмной материи (dark matter — DM) $1,5 \times 10^{10} M_{\odot} \text{ Мпк}^{-3}$, что почти в четыре раза меньше, чем в принятых космологических моделях по реликтовому излучению. Авторы предполагают, что разница между плотностями может объясняться существованием двух разных типов тёмной материи: однородной, как океан, и сконцентрированной вокруг отдельных аттракторов. Работы членов коллектива входили в 1% статей, наиболее цитируемых в данной предметной области, и были удостоены премии Web of Science Awards в соответствующей номинации в 2017 г.

Активно развивались исследования с использованием методов спекл-интерферометрии (основанных на анализе зернистой структуры изображения космического объекта (см., например, [8, 9])). Группой под руководст-



Восстановленное методом спекл-интерферометрии в инфракрасном К-диапазоне (2,2 мкм) изображение протопланетарной туманности "Красный прямоугольник". Получено на шестиметровом телескопе БТА с пространственным разрешением 0,06 угл. с. Видны тёмный газопылевой диск в экваториальной плоскости, преимущественно состоящий из зёрен кремния, и освещённые центральной звездой конусы истечения газа [8].

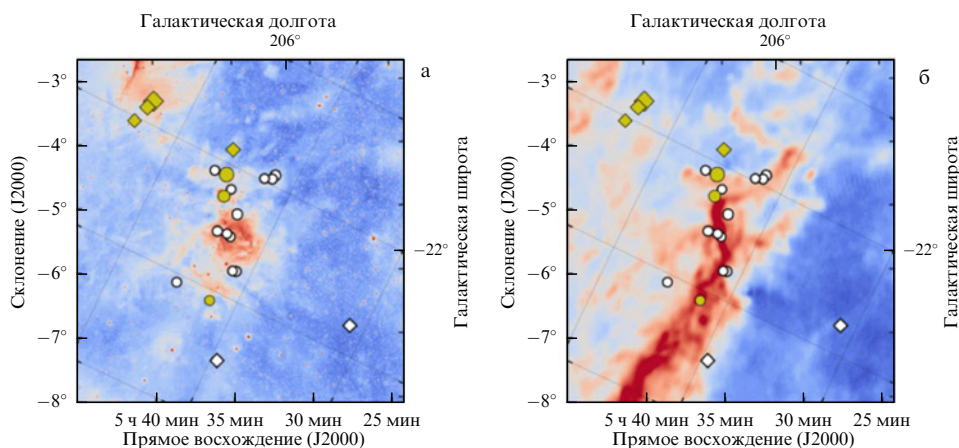
вом академика РАН Ю.Ю. Балеги, являющегося одним из разработчиков метода, с применением спекл-интерферометрии на БТА открыто более 200 новых кратных систем с периодами орбит от сотен дней до сотен лет. Из наблюдений орбитального движения удалось уточнить эмпирическую зависимость масса – светимость для двойных звёзд с маломассивными компонентами — от 0,1 до 0,5 масс Солнца. Благодаря высокому угловому разрешению метода, до 0,02 угловой секунды, были получены изображения оболочек звёзд на последних стадиях эволюции и вычислены модели их строения.

Много было сделано в области исследования магнитных звёзд. В частности, недавно на телескопе БТА был завершён спектрополяриметрический обзор химически пекулярных звёзд, отождествлённых в ассоциации Орион OB1. Обнаружено снижение с возрастом доли химически пеку-

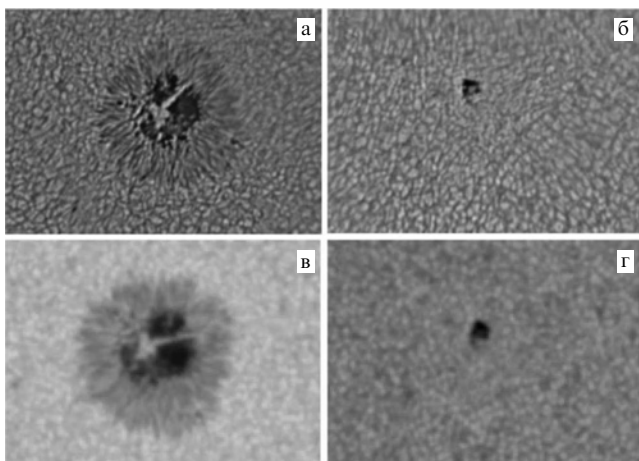
лярных звёзд в целом и доли магнитных химически пекулярных звёзд в частности по отношению к нормальным звёздам того же класса, но без выраженных химических аномалий. У объектов моложе 1 млн лет магнитное поле не выявляется, далее происходит перестройка структуры звезды и магнитное поле становится видимым, достигая максимума на временах порядка 2–3 млн лет, после чего падает в 3 раза на временах порядка 10 млн лет. Полученный результат является прямым и статистически достоверным подтверждением реликтового происхождения магнитных полей звёзд ранних спектральных классов [10].

Для КрАО РАН рассматриваемый период, совершенно очевидно, был непростым, но крымские астрономы успешно преодолевают все трудности и в следующем году обсерватория отметит своё 80-летие. Здесь расположен второй по величине телескоп нашей страны — зеркальный телескоп им. Шайна (ЗТШ) с диаметром зеркала 2,6 м и целый ряд других инструментов, все они были созданы достаточно давно, но крымские астрономы также уделяют большое внимание их поддержке и развитию. В частности, недавно было создано новое приёмное оборудование и система управления Башенного солнечного телескопа обсерватории (БСТ-1) и в 2021 г. был получен первый свет. Проведённое обновление этого инструмента, построенного более 50 лет назад, позволило вывести его на современный мировой уровень наблюдений Солнца. Теперь телескоп позволяет регистрировать детали на поверхности Солнца (пятна, поры, грануляцию, факелы) с пространственным разрешением лучше 1 угл. с со скоростью 50 кадров в секунду. Такие возможности регистрации позволяют применять математические методы для существенного повышения пространственного разрешения (лучше 0,3 угл. с, или 200 км на поверхности Солнца) и временного разрешения порядка 5 с. Получаемые изображения пятен, пор и грануляции незначительно уступают по качеству лучшим наземным зарубежным инструментам и существенно превосходят общедоступные наблюдения с космической обсерватории SDO (см. рисунок на следующей странице) [11]. В 2023 г. был введён в строй новый спектрополяриметр, что ещё больше расширяет возможности телескопа [12].

В обсерватории работали и работают высококлассные специалисты в области астрономического приборо-



Распределение химически пекулярных звёзд в области туманности Ориона. Жёлтым отмечены звёзды с магнитным полем. Кругами показаны звёзды, входящие в состав населения туманности. (а) Вид участка неба в видимом диапазоне в псевдоцветовой палитре. (б) Та же область неба на частотах 353, 545 и 857 ГГц в данных миссии Planck.



Наблюдения в белом свете пятна (а) 06.11.2021 г. и поры (б) 23.10.2021 г. на БСТ-1 КраО РАН и инструменте HMI космической обсерватории SDO (в, г). Пространственное разрешение SDO/HMI — 1 угл. с.



(а) Член-корреспондент РАН Н.В. Стешенко. (б) Н.В. Стешенко во время рабочего совещания по проекту "Спектр-УФ" 2003 г.

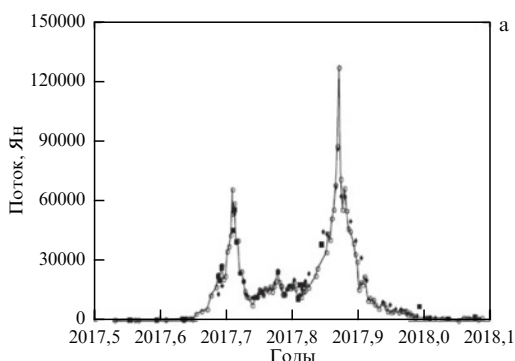
строения — можно упомянуть, например, члена нашего отделения, члена-корреспондента РАН Н.В. Стешенко (1927–2018), более 60 лет проработавшего в обсерватории.

Николай Владимирович, помимо важных научных достижений в области физики Солнца, был крупным специалистом по астрономическому приборостроению и оптике. Под его научным руководством ещё в XX веке был создан орбитальный солнечный телескоп, успешно работавший на борту станции "Салют-4", создана оптика высокого качества для космического телескопа диа-

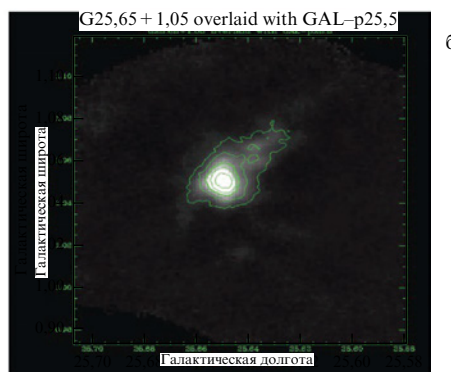
метром 0,8 м, работавшего на борту спутника "Астрон". Николай Владимирович принимал участие и в разработке космического проекта "Спектр-УФ", о котором ещё будет идти речь далее в статье.

На площадке КраО в Симеизе работает радиотелескоп РТ-22, который, хотя и является достаточно возрастным инструментом, не утратил своей уникальности, так как даёт возможность проводить наблюдения в диапазоне длин волн до 1 мм и остаётся в мировой пятёрке наиболее эффективных инструментов, позволяющих выполнять наблюдения в миллиметровом диапазоне длин волн. РТ-22 (международная станция "Симеиз") входит в международную сеть радиотелескопов, объединяющую более 50 антенн, расположенных в различных точках земного шара. За годы работы РТ-22 был получен целый ряд первоклассных научных результатов — от исследований Солнца, активных ядер галактик до изучения движения континентов и поиска "космического мусора". Например, несколько лет назад открыт самый мощный галактический киломазер G25.65+1.05. В объекте зарегистрирована самая мощная за всю историю наблюдений двойная вспышка, во время которой плотность потока радиоизлучения увеличилась более чем в 1300 раз. Впервые в мире получена детальная форма изменения спектральной плотности потока излучения источника в зависимости от времени. Проведены наземные РСДБ-эксперименты по наблюдению вспышки киломазера G25.65+1.05 на интерферометре РСДБ-комплекса "Квазар-КВО" и РСДБ станции Симеиз, подтвердившие наличие компактных глобул. Разработана модель первичного энерговыделения [13, 14].

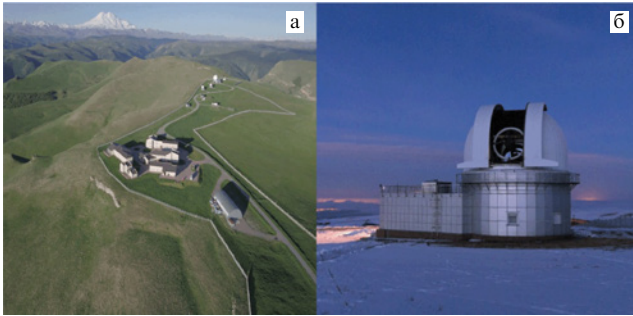
Важным событием стало создание Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова (МГУ) нового научно-образовательного центра вблизи Кисловодска — Кавказской горной обсерватории МГУ (КГО ГАИШ МГУ). Работы по созданию обсерватории начались в 2006 г. В декабре 2014 г. состоялось официальное открытие обсерватории, а в 2021 г. — официальная приёмка и ввод в эксплуатацию 2,5-м телескопа (наблюдения в тестовом режиме проводились с конца 2015 г.). Новый телескоп стал третьим по размеру главного зеркала в нашей стране. Телескоп оснащён широким спектром новой приёмной аппаратуры, также продолжают работы по созданию новых регистрирующих устройств. Всего за несколько лет работы удалось получить ряд ярких астрономических результатов, опубликованных более чем в сотне статей. В качестве примера



(а) Кривая плотности потока излучения во время вспышки;



(б) изображение на длине волн 870 мкм большой болометрической камеры "АРЕХ".



(а) Вид на Кавказскую горную обсерваторию ГАИШ МГУ;
(б) 2,5-метровый телескоп обсерватории.



Звёздные годы теории аккреции.
Н.И. Шакура и Р.А. Сюняев в 1979 и 2017 гг.

можно привести результаты многолетних исследований знаменитого экзотического объекта SS433 — микроквазара в созвездии Орла [15]. Астрономы ГАИШ, в том числе члены нашего отделения, подробно исследовали данный объект — и, кажется, разгадали некоторые его загадки. Это массивная двойная система с очень мощным энерговыделением, сверхкритическим аккреционным диском и чёрной дырой с массой ~ 8 масс Солнца. Открыто удлинение орбитального периода и наличие эксцентриситета орбиты, открыт ультрамассивный быстровращающийся белый карлик.

Говоря об аккреции, нельзя не упомянуть Государственную премию 2016 г., лауреатами которой стали д.ф.-м.н. Н.И. Шакура (ГАИШ МГУ) и академик Р.А. Сюняев (ИКИ РАН) за свою классическую работу — "создание теории дисковой аккреции вещества на чёрные дыры" [16], хотя и выполненную ещё много лет назад, но до сих пор возглавляющую список самых цитируемых работ российских учёных (более 12 тыс. цитирований) и ставшую основой для огромного количества последующих теоретических работ. Данная работа впервые ввела в научный обиход понятие "дисковая аккреция". На рисунке приведены фото лауреатов и в молодом, и в зрелом возрасте, объясняющих у доски свою модель. Оба лауреата активно работают и сейчас.

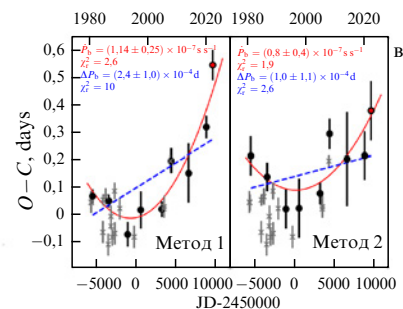
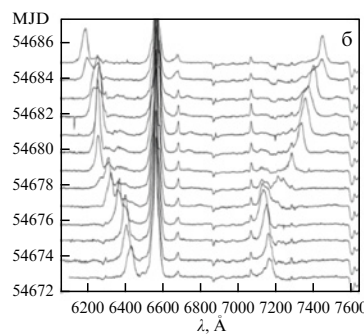
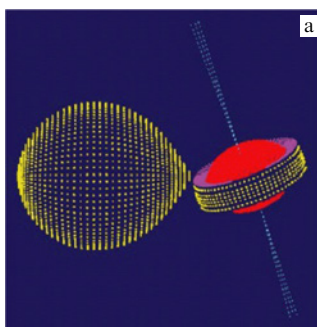
Начиная с 2002 г. в МГУ также реализуется глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР (Мобильная Астрономическая Система Телескопов-Роботов), ориентированная, в частности, на открытие и исследование атмосферных эмиссий, продуцируемых гамма-всплесками.

У нашей старейшей обсерватории, отмечающей в 2024 году своё 185-летие, — Пулковской, Главной астрономической обсерватории (ГАО РАН) — последнее десятилетие оказалось сложным — город наступает, и качественные астрономические наблюдения становятся всё более проблемными, что вынуждает искать новые площадки для наблюдений. В 2018 г. президиумом РАН было принято решение о переносе наблюдений на другие площадки, в частности, в район Кисловодска, где давно имеется наблюдательная база — Кисловодская горная астрономическая станция (ГАС) ГАО РАН, которая была основана более 70 лет назад преимущественно для солнечных наблюдений. Но в целом астрономы ГАО РАН сейчас опираются в большей мере не на собственную инфраструктуру, а на инструменты других организаций России и других стран.

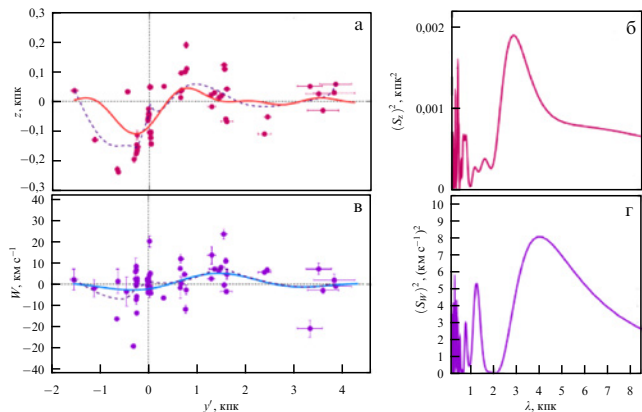
Вообще, следует отметить, что в районе Кисловодска в настоящее время формируется целый кластер астрономических обсерваторий — около ГАС ГАО РАН располагается упомянутая выше Кавказская горная обсерватория ГАИШ МГУ, развивает Кисловодскую площадку и ИНАСАН, хотя и не так масштабно, как ГАИШ МГУ.

Несмотря на все вышеописанные трудности, пулковские астрономы также имеют свои достижения. Например, они проделали интересную работу по маломассивным двойным системам, был обнаружен новый класс объектов — белые карлики, обладающие свойствами пульсаров. Один такой объект находится в тесной двойной системе Водолея, другой — в созвездии Скорпиона [17–19].

Можно упомянуть и интересную недавнюю работу, касающуюся исследований волны Рэдклиффа — распо-



(а) Модель SS433 как массивной тесной двойной системы со сверхкритическим прецессирующим аккреционным диском и релятивистскими джетами. (б) Спектры SS433 (получены на 2,5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ). Видны подвижные эмиссионные линии водорода, формирующиеся в прецессирующих релятивистских джетах. (в) График остаточных отклонений в моментах затмений SS433, которые свидетельствуют об увеличении орбитального периода двойной системы. Это позволило выяснить природу SS433 и определить массу чёрной дыры.



Координаты мазеров z в зависимости от расстояния y' (а) и их спектр мощности (б), вертикальные скорости мазеров W в зависимости от расстояния y' (в) и их спектр мощности (г). Периодические кривые, показанные сплошными жирными линиями, отражают результаты спектрального анализа, штриховыми линиями показаны сглаженные средние значения.

ложенной недалеко от нас крупнейшей газовой структуры в нашей Галактике, образованной цепочкой из молекулярных облаков и недавно (в 2020 г.) открытой по анализу их распределения. Пулковские астрономы по исследованиям мазерных источников излучения показали наличие волны Рэдклиффа как в положениях, так и в вертикальных скоростях мазеров и оценили геометрические и кинематические характеристики волны. В целом исследования этой структуры только начались и важны для уточнения наших представлений и о других галактиках [20–22].

Большая работа ведётся коллективом в области исследований Солнца, в частности, научным руководителем обсерватории членом-корреспондентом РАН А.В. Степановым. Необходимо также отметить, что за годы существования Горной астрономической станции ГАО РАН накоплен и продолжает пополняться ряд непрерывных однородных наблюдений Солнца.

В 1990-х годах на пике Терскол, на высоте 3150 м, был установлен телескоп Цейсс-2000, а в начале 2000-х годов развивалась соответствующая инфраструктура. С 2005 г. Терскольская обсерватория является филиалом ИНАСАН. Обсерватория является самой высокогорной в нашей стране, а телескоп Цейсс-2000 в настоящее время является четвёртым по размеру. На протяжении ряда лет телескоп был активно задействован в международной программе "Астрономия в Приэльбрусье".



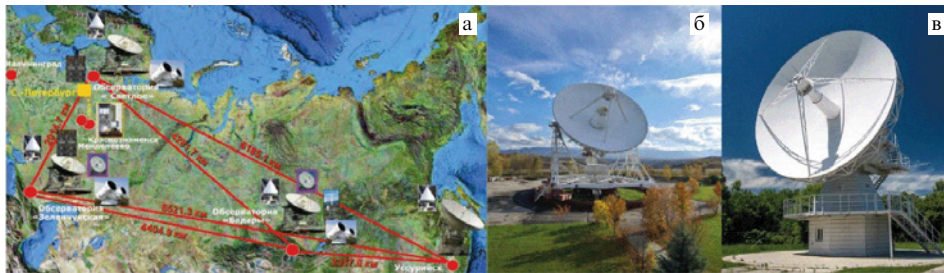
(а) Чл.-корр. РАН А.М. Финкельштейн.
(б) Здание Института прикладной астрономии РАН.

2.2.2. Наземная радиоинтерферометрия. Важнейшее практическое значение имеет созданный в ИПА РАН в 2000-х гг. уникальный радиоинтерферометрический комплекс "Квазар" со сверхдлинной базой, состоящий из трёх обсерваторий, расположенных в районе Санкт-Петербурга, на Северном Кавказе и в Бурятии. Обсуждается в перспективе и подключение четвёртой обсерватории — в Уссурийске. Основным элементом радиоастрономической обсерватории комплекса "Квазар-КВО" является полноповоротный прецизионный радиотелескоп с диаметром главного зеркала 32 м. В 2016 г. дополнительные возможности обсерватории были дополнены телескопом РТ-13 с высокоточной поверхностью антенны.

Хотя, безусловно, создание такого комплекса — труд многих учёных, в этой работе большая роль принадлежит члену-корреспонденту нашего Отделения Андрею Михайловичу Финкельштейну (1942–2011 г.), который в 1987 г. стал директором ИПА РАН — института, созданного специально для реализации данного проекта.

Радиоинтерферометрическая система "Квазар" принципиально важна для обеспечения работы отечественной навигационной системы ГЛОНАСС. "Квазар" проводит также траекторные измерения космических аппаратов, изучает движение планет и малых тел Солнечной системы. С 2006 г. комплекс является базовой системой фундаментального координатно-временного обеспечения России, впервые в истории обеспечив ей возможность самостоятельного решения ряда геодинамических и метрологических задач, таких как, например, высокоточное определение параметров вращения Земли и синхронизация атомных шкал времени.

На телескопах сети выполняются и фундаментальные исследования, например, очень интересный эксперимент по мониторингу астероидов проведён совместно с JPL (Лаборатория реактивного движения, США). Семидеся-



(а) Расположение инструментов радиоинтерферометрического комплекса "Квазар-КВО";
(б) радиотелескоп РТ-32 в Зеленчукской; (в) радиотелескоп РТ-13 в Зеленчукской.



Иллюстрация, показывающая принцип эксперимента по мониторингу астероидов.

тиметровая антенна JPL посылает радиосигнал — отражённые сигналы принимаются 32-метровым телескопом "Квазара". Подробно исследованы шесть астероидов, которые потенциально могут приблизиться к Земле [23]. Можно надеяться, что эта интересная работа с JPL будет со временем продолжена.

Важной задачей также являются наблюдения внегалактических радиисточников (квazarов) с высоким угловым разрешением в составе европейской РСДБ-сети EVN (European VLBI Network).

2.2.3. Астероидно-кометная опасность. В новом тысячелетии большое внимание уделяется проблеме астероидно-кометной опасности (АКО), а также экологии околоземного космического пространства. Согласно классификации, принятой в 2006 г. Международным астрономическим союзом, к малым телам Солнечной системы относятся все тела, обращающиеся вокруг Солнца и не относящиеся к планетам, карликовым планетам или спутникам этих тел. В первую очередь большой интерес представляют малые тела, в ходе своего движения сближающиеся с Землёй. Ярким событием, показавшим реальность угрозы от столкновения таких тел с Землёй, стало падение Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г.

Кроме того, за более чем 65 лет, прошедших от начала космической эры, околоземное космическое пространство (ОКП) непрерывно засоряется космическим мусором (нефункциональными техногенными объектами и их фрагментами), и проблема безопасности космических полётов в ОКП со временем только растёт.

Большой группой специалистов из многих институтов (ИНАСАН, ГАО РАН, ИПА РАН, ИКИ РАН, Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН (ИДГ РАН), ИСЗФ СО РАН, ГАИШ МГУ и др.) и предприятий космической отрасли была выполнена большая

работа по комплексному анализу проблемы АКО. Детально рассмотрены все аспекты проблемы: как фундаментальные (астрономический, геофизический), так и прикладные (методы выявления опасных тел и надёжной оценки степени угрозы, а также возможные методы противодействия и уменьшения ущерба). По итогам работы в ГК "Роскосмос" был представлен проект концепции Федеральной целевой программы "Развитие системы противодействия космическим угрозам (2011–2020 гг.)", сделаны предложения по реализации системы противодействия космическим угрозам (в частности, астероидно-кометной опасности). Эта работа выполнялась под руководством члена-корреспондента РАН Б.М. Шустова.

Сейчас в Роскосмосе с привлечением институтов РАН ведётся проработка вопроса о создании системы "Млечный путь" для информационно-аналитического обеспечения безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве.

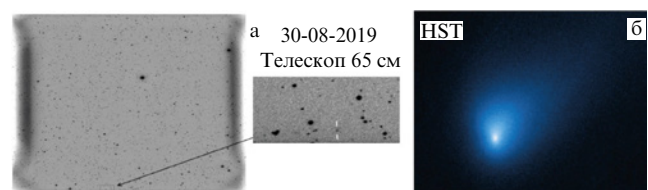
Одним из интересных научных результатов, полученных в результате исследований малых тел Солнечной системы, стало открытие первой межзвёздной кометы 2I/Borisov, ставшей всего лишь вторым известным межзвёздным объектом. Относительно высокое содержание в коме кометы молекул CO означает, что комета была выброшена с периферии протопланетного диска. В результате исследования подтверждён единый механизм формирования таких объектов, как кометы, в Солнечной системе и вне её. Также показано, что в окосолнечной сфере радиусом 50 а.е. в каждый момент времени может находиться около 50 межзвёздных тел (в основном ядер комет) размером более 50 м. Это исследование выполнено астрономами КраО РАН, ИНАСАН, ГАИШ МГУ и ИКИ РАН [25, 26].

Остановимся немного подробнее и на таком важном, интересном и относительно молодом направлении, как исследования экзопланет. Экзопланеты (планеты, обращающиеся вокруг других звёзд, вне пределов Солнечной системы) были открыты в самом конце прошлого тысячелетия, их интенсивное исследование происходит уже



(а) Разные типы малых тел;

(б) обложка коллективной монографии под редакцией Б.М. Шустова и Л.В. Рыхловой [24] (Москва: Физматлит, 2010).

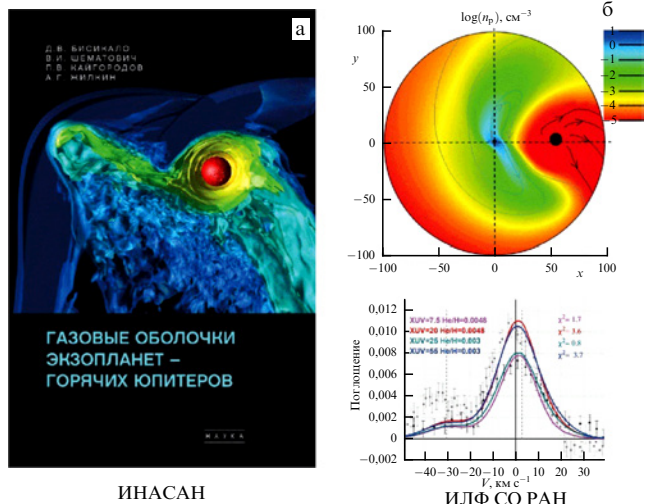


Межзвёздная комета. (а) Изображение, полученное на небольшом любительском телескопе. (б) Изображение, полученное Космическим телескопом им. Хаббла.

в XXI в. Это одно из наиболее актуальных направлений современной мировой астрономии. Открыты уже тысячи таких объектов разных типов, и непрерывно открываются новые. Конечно, открытием объектов дело не ограничивается и необходимо их всестороннее изучение. Для этого требуется совершенствование как различных экспериментальных методов наземной и космической астрономии, так и численные и теоретические методы интерпретации получаемых данных, построение моделей как индивидуальных внесолнечных планет, так и планетных систем, сформированных около других звёзд Галактики, принадлежащих различным спектральным классам. Сейчас данная область астрофизики включает элементы космогонии, небесной механики, космической газодинамики, теоретических моделей эволюции звёзд, околозвёздных оболочек и дисков, физики и химии звёздных и планетных атмосфер.

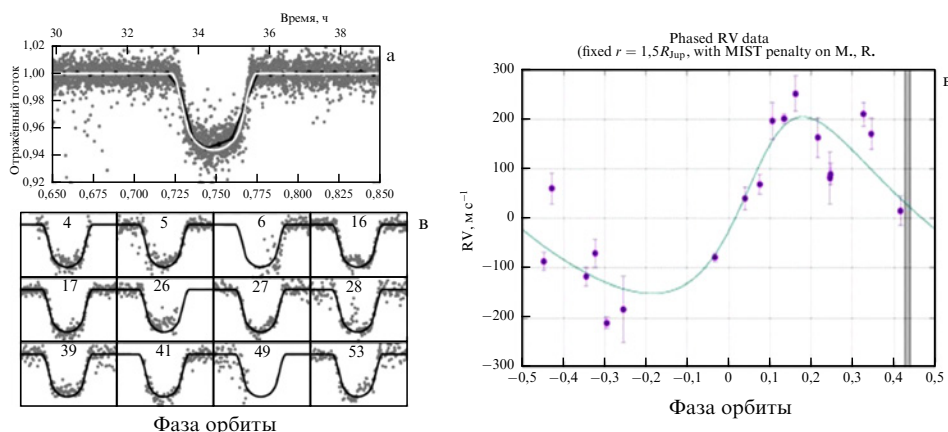
Наша страна в силу достаточно скромных наблюдательных возможностей, к сожалению, здесь находится далеко от переднего края исследований, однако у нас делается всё возможное для сокращения отставания в экспериментальных наблюдательных работах. Исследования, связанные с экзопланетами, ведутся во многих наших институтах, и чтобы сконцентрировать усилия, найти новые оригинальные методы и подходы, в период 2020 – 2022 гг. при поддержке Министерства науки и высшего образования реализовывался масштабный проект "Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет", направленный на исследования этих интереснейших объектов. Был сформирован большой консорциум, объединявший учёных из 17 научных организаций и вузов нашей страны. Большое внимание уделялось теоретическим исследованиям и численному моделированию. Надо сказать, что здесь опыт и квалификация российских специалистов обеспечивают высокий научный уровень проводимых исследований, не уступающий мировому.

2.2.4. Лабораторное и численное моделирование. Например, в ИНАСАН и ИЛФ СО РАН разрабатывались численные модели атмосфер горячих юпитеров (больших планет, находящихся с близкой окрестности материнской звезды), результаты изложены в монографии, обложка которой показана на рисунке.



(а) Обложка коллективной монографии, изданной учёными ИНАСАН [27]; (б) результаты численного моделирования истекающей верхней атмосферы во взаимодействии со звёздным плазменным ветром и интерпретации данных наблюдений экзопланеты HD-189733-b (относящейся к типу "горячий юпитер"), полученные коллективом ИЛФ СО РАН. Вверху — рассчитанное распределение протонов вокруг планеты, внизу — поглощение в линии метастабильного гелия 1083 нм в единицах доплеровской скорости смещения, рассчитанное при различных значениях ионизирующей радиации родительской звезды (XUV, выражено в эрг см⁻² с⁻¹ на 1 а.е.) и относительного содержания гелия в атмосфере (He/H).

Как уже упоминалось выше, в CAO РАН создан комплекс широкоугольных роботизированных телескопов для поиска экзопланет и нестационарных (транзитных) событий и высокоточный планетный спектрограф, позволяющий регистрировать изменения лучевых скоростей родительских звёзд под влиянием экзопланет. В результате на базе CAO РАН начал работу проект, сокращённо именуемый EXPLANATION (EXoPLANet And Transient events InvestigatiON). Его цель — массовый поиск и исследование экзопланет и нестационарных событий во Вселенной. За неполные два года работы проекта методами фотометрических транзитов и доплеровской спектроскопии обнаружен и исследован первый десяток экзопланет и кандидатов в экзопланеты [28, 29]. Пример двух таких событий представлен на рисунке.



(а) Транзитные кривые блеска одной из обнаруженных транзитных экзопланет.
(б, в) Доплеровские измерения спектрографа FFOREST одной из обнаруженных доплеровским методом экзопланет.

Важно то, что теперь среди открытых многочисленных экзопланет уже есть десяток кандидатов в экзопланеты, найденных в САО. Длинная дорога начинается с первого шага.

Мы ожидаем также, что наблюдение экзопланет станет одной из важных задач ультрафиолетовой космической обсерватории "Спектр-УФ", о которой ещё будет рассказано ниже.

Большое развитие в последние десятилетия получило направление астрохимии. В середине 1990-х гг. в ИНАСАН была начата разработка самосогласованной химико-динамической модели ранних стадий образования звёзд и планет [30, 31]. Эта разработка была одной из первых в мире, и к настоящему моменту она разрослась в целое научное направление на стыке астрофизики и химии, дав основу для формирования новой научной школы и импульс для развития астрохимических исследований в России. Одним из важных первых результатов стала демонстрация существенной динамической роли ультрафиолетового облучения дозвёздных ядер, которое в зависимости от интенсивности может как стимулировать образование звезды, так и подавлять его, а также возможности по наблюдаемому химическому составу точно определять возраст и динамический статус изучаемых объектов. В настоящее время в рамках астрохимического направления в институте проводятся наблюдательные и теоретические исследования протопланетных дисков, дозвёздных ядер, областей ионизированного водорода. Активно развивается исследование свойств космической пыли — важного компонента астрохимических процессов. Эти исследования позволяют пролить свет на химические процессы, происходящие в межзвёздной среде, и выявить их связь с общей эволюцией органических соединений во Вселенной.

Важным этапом развития астрохимических исследований в России стало появление активно работающих астрохимических лабораторий. Одна из таких лабораторий — Лаборатория астрохимии и внеземной физики — работает в Уральском федеральном университете, другая — на базе Центра лабораторной астрофизики Самарского филиала ФИАН.

Говоря о лабораторной астрофизике, следует отметить то, что сейчас развитию этого направления у нас

тоже уделяется большое внимание. Помимо уже упомянутой лаборатории ФИАН, развивается направление лабораторной астрофизики в недавно созданном Национальном центре физики и математики (рук. направления академик Л.М. Зелёный). В настоящее время проводится моделирование астрофизических джетов на установках Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН (ИПФ РАН), ИЛФ СО РАН, а также Национального исследовательского центра "Курчатовский институт". Проведено уже несколько научных конференций и школ молодых учёных по этому актуальному направлению. С некоторыми исследованиями струйных выбросов из молодых звёзд при помощи методов лабораторной астрофизики можно ознакомиться в обзоре [32].

3. Космическая астрофизика

3.1. Рентгеновская и гамма-астрономия

Ещё в 1980-х гг. была задумана программа всеволновых астрофизических исследований Вселенной в самом широком диапазоне длин волн — от радио до гамма (Спектр-Р, или Радиоастрон; Спектр-УФ; Спектр-РГ и, наконец, Спектр-М, или Миллиметрон). Как обычно, в отличие от сказки, которая сказывается скоро, переход к делу занял почти 30 лет. Только в 2011 г. эта амбициозная масштабная программа начала реализовываться, и до настоящего момента всё идёт вполне успешно. Рассказ об этих проектах начнём с высоких энергий, где у российских исследований есть большая и успешная советская предыстория.

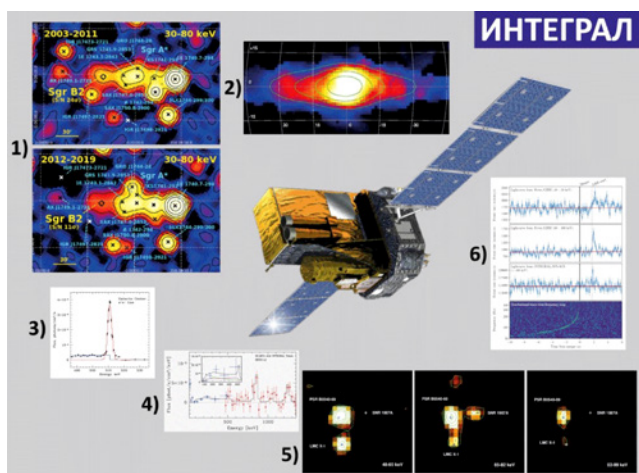
На станции "Мир" в 1980-е гг. успешно работал гамма-спектрометр "Пульсар", одним из важных результатов которого можно считать открытие гамма-излучения от знаменитой сверхновой 1987 г. Был создан отечественный телескоп АРТ (прототип будущих мощных инструментов), который 10 лет успешно проработал на астрофизической станции ГРАНАТ. Был подробно исследован центр Галактики, открыты новые чёрные дыры. Соответствующий цикл работ был в 2000 г. удостоен первой из четырёх Государственных премий, полученных за эту четверть века учёными-астрономами нашего отделения — "за результаты астрофизических исследований в рентгеновских и мягких гамма-лучах: наблюдения чёрных дыр и нейтронных звёзд с орбитальной обсерватории "ГРА-



Лабораторная установка для изучения криогенных поверхностных процессов в Самарском филиале ФИАН. Ориентирована на изучение механизмов роста органических соединений в условиях межзвёздных льдов.



Серия космических обсерваторий "Спектр".

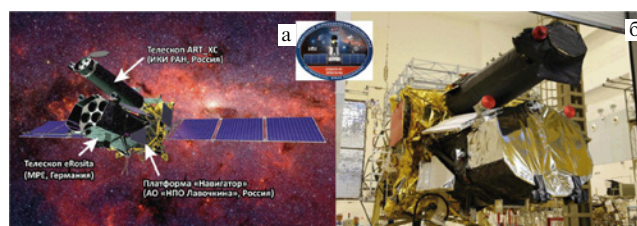


Обсерватория ИНТЕГРАЛ. Иллюстрации некоторых результатов. 1) Рентгеновские карты окрестностей ядра Галактики (Sgr A*) по данным телескопа IBIS/ISGRI (ИНТЕГРАЛ), полученные в 2003–2011 и 2012–2019 гг. Видно падение яркости излучения молекулярного облака Sgr B2, светящего отражённым светом мощной вспышки излучения чёрной дыры в центре Галактики [34]. 2) Распределение диффузного рентгеновского излучения галактического "хребта" (телескоп IBIS/ISGRI, ИНТЕГРАЛ, 18–60 кэВ) и ИК-излучения на 4,9 мкм (контуры, данные COBE/DIRBE) [35]. 3) Аннигиляция позитронов в Галактике с образованием позитрония: двухфотонная (в узкой линии 511 кэВ) или трёхфотонная [36]. 4) Спектр излучения сверхновой SN 2014J (гамма-спектрометр SPI, ИНТЕГРАЛ). Видны линии излучения на энергиях 511, 847 и 1238 кэВ, образующиеся при радиоактивном распаде кобальта-56, синтезированного при взрыве сверхновой [37]. 5) Изображения области в галактике Большое Магелланово Облако в трёх диапазонах энергий (телескоп IBIS/ISGRI, ИНТЕГРАЛ). Остаток SNR1987A виден только в диапазоне 65–82 кэВ, в который попадают две рентгеновские линии излучения, испускаемые при распаде ^{44}Ti , происходящем в недрах этого остатка [38]. 6) Открытие слияния нейтронных звёзд (LIGO + INTEGRAL + Fermi) [39] — об этом ещё будет рассказано далее в тексте статьи.

НАТ" в 1990–1998 гг.". (лауреаты — Новиков Б.С., академик Сюняев Р.А., Тамкович Г.М., Терехов О.В. Бабышкин В.Е., Церенин И.Д. Кустодиев В.Д., Гликин Ю.Н.).

Следующего отечественного рентгеновского проекта пришлось ждать почти 35 лет, и был заключён своеобразный бартер — российский запуск в 2002 г. Международной космической обсерватории Европейского космического агентства ИНТЕГРАЛ (INTEGRAL, INTErnational Gamma-RAY observatory), в обмен на 25 % её наблюдательного времени [33]. Обсерватория работает и по сей день, проводит наблюдения в рентгеновском и гамма-диапазонах электромагнитного излучения 15 кэВ–10 МэВ и фактически стала лабораторией ядерной физики в космосе. Наблюдались двух- и трёхфотонные аннигиляции электронов и позитронов (линия гамма-излучения 511 кэВ и плато в более низких энергиях). Удалось зарегистрировать распад радиоактивных изотопов тория и кобальта после вспышек сверхновых: и той, о которой шла речь выше (1987 г.), и сверхновой 2014 г.

Сотрудничество в такой форме оказалось успешным — впервые в России был реализован принцип международной обсерватории, и десятки российских астрономов получили доступ к данным ИНТЕГРАЛа. В частности, благодаря данным ИНТЕГРАЛа отечественные учёные оказались в "элитном" консорциуме тех, кто имел возможность участвовать в самых передовых исследованиях последнего десятилетия — открытии гравита-



Проект "Спектр-РГ". (а) Иллюстрация КА "Спектр-РГ"; (б) "Спектр-РГ" в НПО им. С.А. Лавочкина.

ционных волн и их генерации при слиянии нейтронных звёзд [39]. Мы ещё вернёмся к этой теме позже. В 2023 г. было принято решение продлить плановую работу обсерватории ИНТЕГРАЛ на орбите, что позволит поддержать четвёртую международную кампанию совместных наблюдений за гравитационными волнами сетью инструментов LIGO, Virgo и KAGRA. По результатам обсерватории ИНТЕГРАЛ к настоящему моменту опубликованы тысячи статей, при этом роль российских учёных в ключевых публикациях по проекту достаточно велика.

Наконец, после ряда переносов, замены части приборов из-за ухода и прихода новых международных партнёров аппарат серии "Спектр" — "Спектр-РГ" (рентген-гамма) в 2019 г. был запущен с космодрома Байконур и через несколько месяцев впервые в истории отечественной космонавтики встал на рабочую орбиту в точке Лагранжа L_2 (примерно 1,5 млн км от Земли в направлении от Солнца). Обсерватория "Спектр-РГ" включает два телескопа — немецкий eROSITA и первый российский зеркальный рентгеновский телескоп ART-XC (Astronomical Roentgen Telescope — X-ray Concentrator), работающий в более жёстком диапазоне энергий, вплоть до 30 кэВ. Телескоп ART-XC создавался под руководством заместителя директора ИКИ РАН Михаила Павлинского (1959–2020 г.) и сейчас носит его имя. Диапазоны энергий двух телескопов перекрываются, что даёт дополнительное преимущество с точки зрения проведения их калибровок и повышения надёжности научных результатов.



Телескоп ART-XC им. М.Н. Павлинского в НПО им. С.А. Лавочкина. На вставке вверху — д.ф.-м.н. М.Н. Павлинский.

Обсерватория "Спектр-РГ" продолжает обогащать науку и радовать своих создателей — и учёных институтов РАН, МГУ, КФУ, и инженеров НПО им. Лавочкина. Пока в основном аппарат работал в обзорном режиме. ART-XC им. М.Н. Павлинского и eROSITA вместе провели четыре полных скана небесной сферы, и в декабре 2021 г. приступили к пятому. Уже первый обзор eROSITA дал почти миллион новых рентгеновских источников — на порядок больше, чем было известно ранее. По итогам четвёртого обзора (более 1,7 млрд рентгеновских фотонов) построена карта, содержащая 3 млн рентгеновских источников. ART-XC работает в более жёстком диапазоне энергий, где наблюдаемых источников меньше, но, тем не менее, уже за первые два года работы сделанный им обзор позволил найти почти 1,5 тыс. новых источников рентгеновского излучения. Весной 2022 г. по инициативе немецкой стороны телескоп eROSITA, к сожалению, был отключён, и сейчас он находится в спящем режиме. Надеемся всё же, что это временная ситуация и взаимодополняющая пара телескопов ещё сможет вместе поработать на своей гало орбите. Но анализ полученного за время работы eROSITA наблюдательного материала продолжается и ещё долго позволит получать важные научные результаты.

После отключения телескопа eROSITA ART-XC продолжил успешно работать в рамках скорректированной программы научных наблюдений, ключевой задачей которой стал глубокий обзор уже не всего неба, а плоскости нашей Галактики, завершённый осенью 2023 г., после чего ART-XC вернулся к решению основной задачи проекта и возобновил программу обзора всего неба. Пятый полный скан небесной сферы ART-XC завершил в апреле 2024 г. и сейчас проводит шестой.

Очень важно, что "Спектр-РГ" имеет пул работающих вместе с ним наземных обсерваторий. Это телескоп в Турции, который управляется Казанским (Приволжским) федеральным университетом, большой шестиметровый телескоп CAO и 2,5-метровый телескоп ГАИШ, где совместно изучаются далёкие квазары.

Невозможно даже просто перечислить в рамках данной статьи все результаты, полученные обсерваторией за время её работы, — по ним уже опубликованы сотни научных статей и телеграмм об открытиях, и их число постоянно растёт. Приведём лишь некоторые примеры.

Телескопом eROSITA обнаружены крупномасштабные пузыри горячего газа в гало Млечного Пути, получившие впоследствии название "пузыри eROSITA" (по аналогии с ранее обнаруженными обсерваторией Ферми в гамма-диапазоне пузырями Ферми) [40]. Эти структуры

имеют угловые размеры, сравнимые с размерами Галактики, и чётко видны на карте рентгеновского обзора (см. рисунок). Скорее всего, они связаны с ударными волнами, вызванными мощнейшим всплеском активности центра нашей Галактики десятки миллионов лет назад. Данное открытие помогает понять циркуляцию вещества в Млечном Пути и вокруг него, а также в других галактиках, изучение которых с такой детализацией нам недоступно.

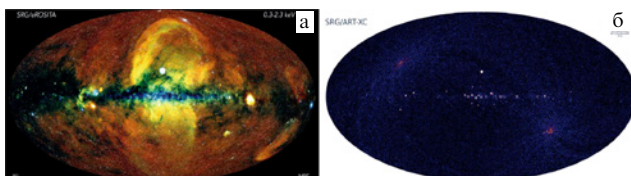
С помощью данных телескопа eROSITA, созданной в ИКИ РАН системы машинного обучения SRGz, а также данных наблюдений на российских и зарубежных оптических телескопах ведётся поиск редчайших объектов во Вселенной. Открыта необычная сверхновая на расстоянии около 1 кпк над плоскостью Галактики (около 3 кпк от Солнца) [41]. Ранее так высоко над плоскостью Галактики остатки сверхновых ещё не наблюдались. Главное отличие обнаруженного остатка сверхновых от нескольких сотен подобных объектов — свойства газа, в котором находилась взорвавшаяся звезда.

Открыт квазар на красном смещении $z = 5,5$, и впервые зарегистрировано рентгеновское излучение от ранее известного квазара на $z = 6,2$. Эти объекты оказались самыми мощными в рентгене квазарами на $z > 5$. Эта работа проводилась совместно с коллегами из CAO РАН [42].

С ядрами галактик связано катастрофическое явление — разрыв звёзд приливными силами сверхмассивной чёрной дыры. В результате захвата чёрной дырой вещества разрушенной звезды ядро галактики может на несколько месяцев стать ярким источником рентгеновского излучения. После запуска обсерватории "Спектр-РГ" наступила новая эпоха в исследовании таких космических катастроф: с помощью телескопа eROSITA уже открыто



Российская часть наземной поддержки обсерватории "Спектр-РГ".



(а) Карта рентгеновских источников, полученная телескопом eROSITA космической обсерватории "Спектр-РГ", по итогам первого обзора (400 млн рентгеновских фотонов). По итогам четвёртого обзора (более 1,7 млрд рентгеновских фотонов) построена карта, содержащая 3 млн рентгеновских источников.

(б) Карта рентгеновских источников неба в диапазоне энергий 4–12 кэВ, построенная телескопом ART-XC.

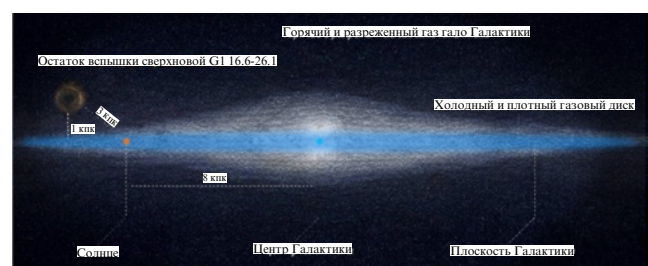
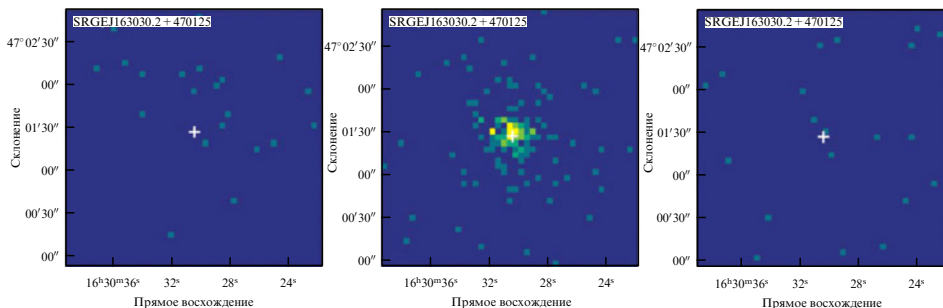


Иллюстрация показывает положение обнаруженного в 2022 г. остатка сверхновой в Галактике.



Событие приливного разрушения звезды сверхмассивной чёрной дырой в галактике, расположенной на $z = 0,29$, открытое телескопом SRG/eROSITA [43]. Показаны три изображения, полученные с интервалами в полгода. Видно, что источник отсутствовал в первом скане неба, появился во втором и исчез в третьем. В оптических наблюдениях этого и ряда других подобных событий были задействованы российские наземные телескопы, а также 10-метровый телескоп обсерватории Кека на Гавайских островах.

несколько десятков событий приливного разрушения в галактиках на расстояниях в несколько миллиардов световых лет от нас, составлен первый каталог таких событий.

Выпущен и каталог источников, зарегистрированных в жёстких рентгеновских лучах с помощью телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории "Спектр-РГ", по данным первого года обзора всего неба. С помощью наблюдений на всех крупных российских оптических телескопах определена природа новых объектов, обнаруженных в ходе этого обзора. Открыто несколько десятков ранее неизвестных аккрецирующих белых карликов и нейтронных звёзд в нашей Галактике, а также активно растущих сверхмассивных чёрных дыр в ядрах других галактик. Обнаружены транзитные события разной природы — мощные вспышки на звёздах, необычные объекты в Галактике, гамма-всплески; впервые построены детальные карты остатков вспышек сверхновых в жёстких рентгеновских лучах.

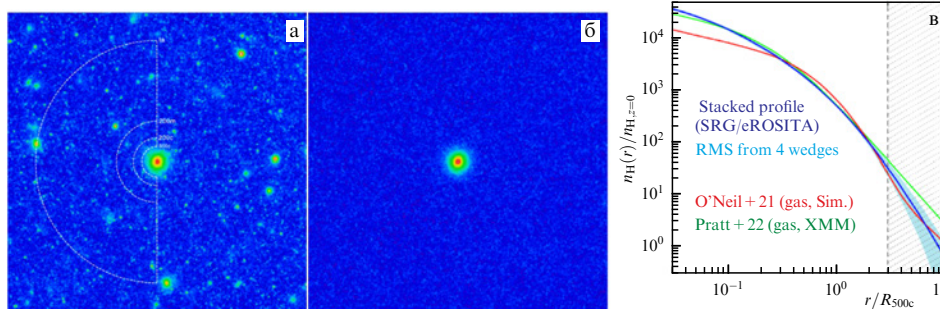
Телескопом ART-XC обнаружены микроквазары, наподобие SS-433, о котором говорилось выше, и миллисекундные рентгеновские пульсары.

В частности, в феврале 2024 г. ART-XC обнаружил новый аккрецирующий миллисекундный пульсар SRGAJ44459.2-604207 [44]. По характеристикам его спектра и кривой блеска можно заключить, что SRGAJ44459.2-604207 — двойная система с нейтронной звездой, вращающейся вокруг своей оси с периодом 2,2 мс, имеющей радиус 11–12 км и атмосферу, нагреваемую в результате аккреции, в которой с высокой регулярностью происходят термоядерные взрывы. Это — достаточно редкий объект, всего их известно около двух десятков.

Путём наложения друг на друга изображений 40 массивных скоплений галактик были получены профили плотности, температуры и энтропии вплоть до рекордных расстояний, где плотность газа лишь в 50 раз выше, чем в среднем по Вселенной. Отличное согласие с космологическими численными расчётами показывает, что в режиме таких плотностей наши представления о формировании и эволюции скоплений достаточно точны. Эта работа была выполнена в ИКИ РАН в сотрудничестве с академиком А.А. Старобинским (ИТФ Ландау) [1].

Также учёными ИКИ РАН, Института прикладной математики им. М.В. Келдыша (ИПМ РАН) и специалистами НПО им. С.А. Лавочкина сейчас активно ведётся проработка технологии навигации космических аппаратов в межпланетном пространстве, где рентгеновские пульсары используются как космические "вечные" и "бесплатные" маяки. Для решения этой задачи предложено провести космический эксперимент "Спектр-РГН".

Космический эксперимент будет включать в себя комплекс аппаратуры на основе кремниевых детекторов и рентгеновских зеркал косоуго падения, а также служебных систем, установленных на многофункциональную космическую платформу "Навигатор", изготавливаемую в НПО им С.А. Лавочкина. С целью ускорения реализации проекта и уменьшения его стоимости планируется использовать технологический задел и результаты, полученные в рамках проекта "Спектр-РГ". Важно отметить, что наряду с решением практических задач в рамках проекта "Спектр-РГН" планируется провести и фундаментальные исследования нейтронных звёзд и чёрных



Изображение "усреднённого" скопления галактик в рентгеновском диапазоне длин волн, полученное на основе данных eROSITA, без вычитания компактных и протяжённых источников, не относящихся к скоплению, (а) и с вычитанием источников (б). (в) Измеренный радиальный профиль плотности газа вокруг скопления в сравнении с численными расчётами формирования крупномасштабной структуры Вселенной.

дыр. Оптимистическая оценка срока запуска проекта "Спектр-РГН" в космос — 2032–2033 гг.

Дальнейшим развитием работ в области рентгеновской и гамма-астрономии в России должен стать проект "Спектр-РГМ". Обсерватория "Спектр-РГМ" расширит возможности российских обсерваторий не только в рентгеновском, но и в гамма-диапазоне (от 100 кэВ и выше). Научная аппаратура обсерватории разрабатывается совместно со специалистами ФТИ Иоффе и будет включать комплекс высокочувствительных рентгеновских телескопов в диапазоне энергий 0,3–10 кэВ и комптоновского гамма-телескопа, работающего в диапазоне энергий 0,3–10 МэВ, в том числе на поворотной платформе. Задачами обсерватории будут физика сверхновых звёзд и влияние их активности на химическую эволюцию Галактики, механизмы распространения нестабильных ядер в Галактике, природа и структура источников антивещества в Галактике; широкополосная спектроскопия галактических и внегалактических источников рентгеновского и гамма-излучения с целью определения механизмов формирования их спектров; обнаружение и исследование уникальных вспышечных (транзистентных) событий. Предполагается, что запуск мог бы быть осуществлён во второй половине 2030-х гг.

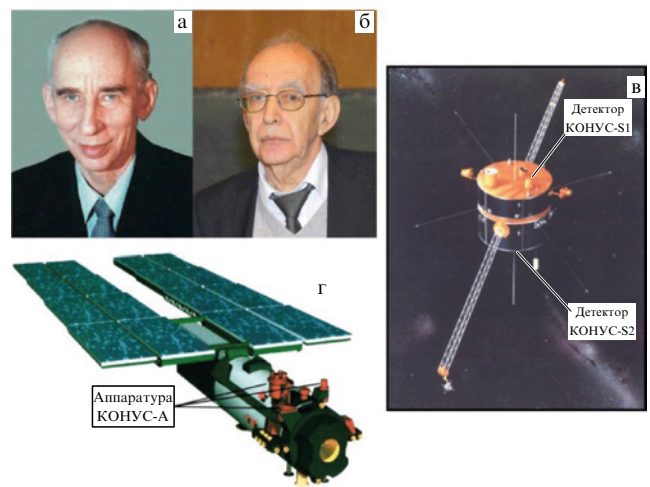
В октябре 2022 г. "Спектр-РГ" (телескоп ART-XC) зарегистрировал рекордный по энергетике (10^{55} эрг) гамма-всплеск GRB20221009A [45]. Это мощное событие исследовалось сотрудниками ИКИ РАН совместно с коллегами из ФТИ Иоффе, ведущими российский эксперимент с использованием прибора "Конус", установленного на американском аппарате "Винд" (НАСА), о котором пойдёт речь далее.

Космические гамма-всплески — наиболее мощные явления во Вселенной, им посвящены многочисленные пионерские работы чл.-корр. РАН Евгения Павловича Мазеца и д.ф.-м.н. Рафаила Львовича Аптекаря из ФТИ Иоффе. Разработанный ими прибор "Конус" стоял на множестве аппаратов, включая ещё советские Венеры (Венера-11 и Венера-12) и работающий с 1994 г. американский аппарат "Винд", (находящийся в точке либрации L_1). Конус — компактный и недорогой прибор — отличается очень широким полем зрения (один детектор может наблюдать половину небесной сферы, два детектора — почти всю сферу) и по своим характери-

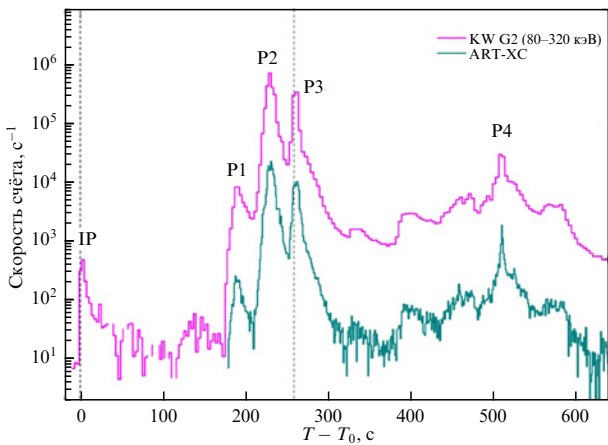
стикам хорошо подходит для поиска мощных космических транзистентов. Подробную информацию об исследованиях с помощью приборов "Конус" можно найти в публикациях [46, 47], здесь же мы остановимся на них кратко.

В ФТИ Иоффе имеются большие планы относительно дальнейшего использования этих уникальных приборов. Из ближайших — установить "Конус" на будущей ультрафиолетовой обсерватории "Спектр-УФ", о которой будет рассказано ниже.

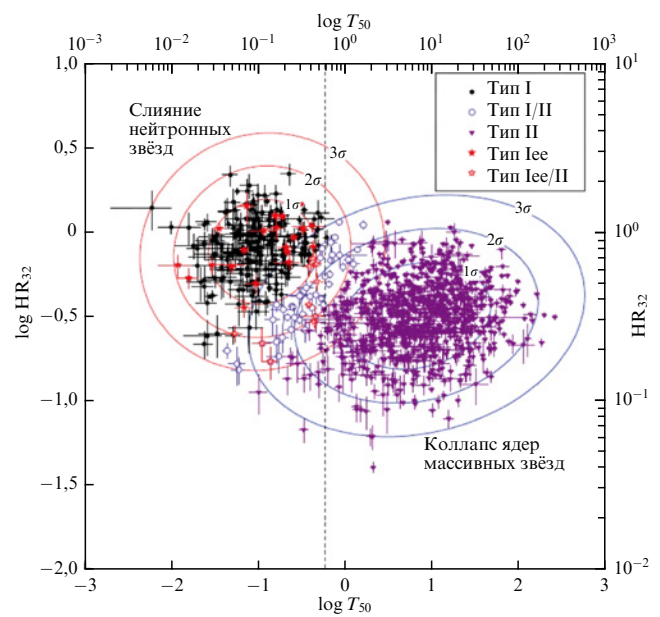
Помимо упомянутого выше уникального сверхмощного всплеска с энергией 10^{55} эрг, который подробно исследовался "Конусом", за счёт большой многолетней статистики "Конусу" удалось провести и классификацию всплесков по двум группам — короткие, связанные со слиянием нейтронной звезды с другой нейтронной звездой или чёрной дырой, и длинные — за счёт коллапса



(а, б) Е.П. Мазец и Р.Л. Аптекарь. (в) КА Wind, показано размещение детекторов эксперимента "Конус". (г) Аппаратура "Конус-А" на КА серии "Космос".



Собственное излучение GRB221009A по данным прибора Конус-Винд (фиолетовая кривая) и телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского, Спектр-РГ (голубая кривая) [45].



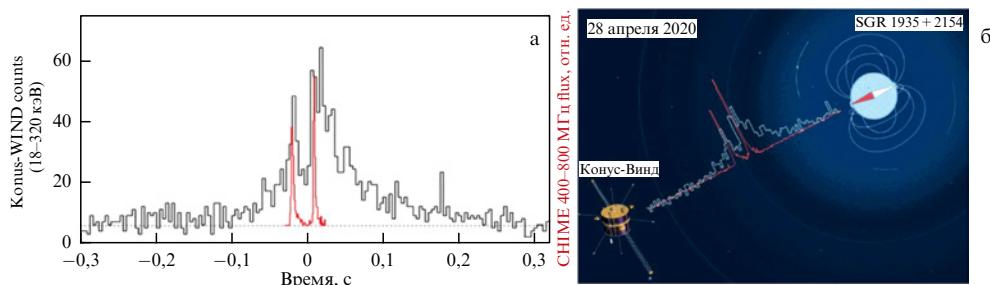
Классификация гамма-всплесков по физическим типам, построенная по данным эксперимента "Конус". Всплески типа I — основные кандидаты в источники гравитационных волн [46].

ядер массивных звёзд. Коллапс ядра массивной звезды формирует релятивистское истечение с гамма-излучением, наблюдаемым даже от первых звёзд ($z \sim 9$), слияние нейтронной звезды с чёрной дырой или другой нейтронной звездой формирует короткий всплеск.

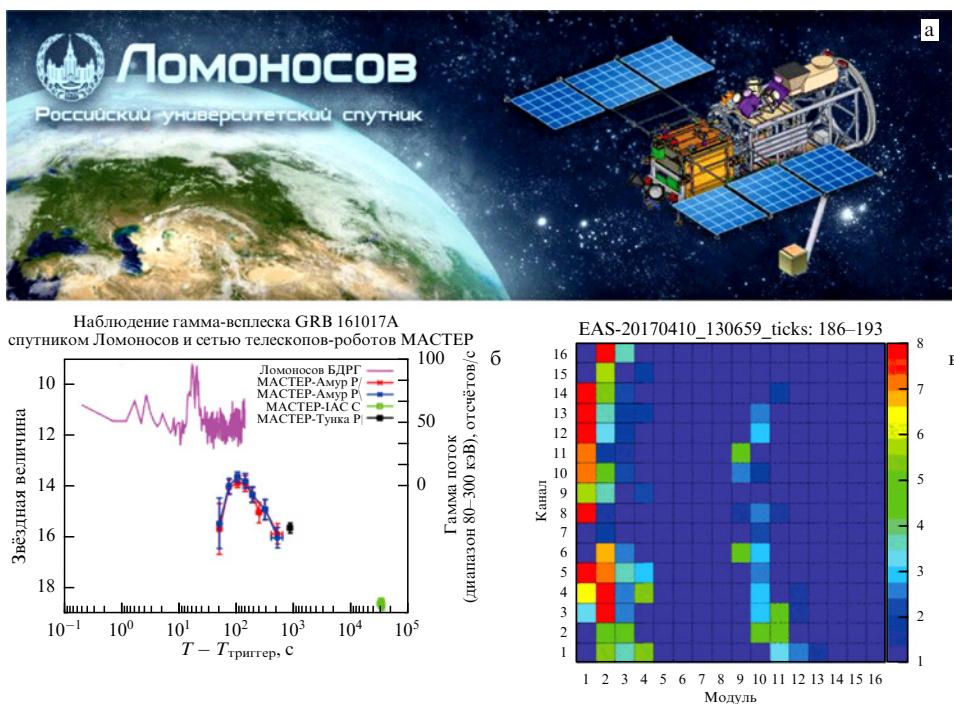
Ещё одним примером яркого научного результата, полученного в рамках эксперимента "Конус-Винд", несомненно, можно считать установление связи между гамма-излучением магнетаров (нейтронных звёзд со сверхсильным магнитным полем, превышающим так называемое швингеровское — 10^{14} Гс) и генерацией другого загадочного явления — быстрых радиовсплесков (миллисекундных мощных радиоимпульсов неизвестной природы, открытых в 2007 г.). Похоже, что это радиоизлучение создаётся за счёт синхротронного мазерного эффекта во время мощной вспышки активности магнетара. 28 апреля 2020 г. космическим гамма-спектрометром Конус-Wind была зарегистрирована вспышка от магнетара SGR 1935 + 2154 с необычно жёстким спектром, сопровождавшаяся мощным радиовсплеском, измеренным радиотелескопами CHIME и STARE2. Одновременное детектирование и точное совпадение пиков на кривых

блеска рентгеновского и радиоизлучения впервые позволило установить связь между галактическими магнетарами и быстрыми радиовсплесками. Детальный анализ необычных свойств этой вспышки позволил выдвинуть гипотезу о генетической связи радиовсплесков с редкими аномально жёсткими рентгеновскими вспышками магнетаров и подкрепить её согласием оценок частоты таких событий. Работа выполнялась в ФТИ Иоффе в сотрудничестве с коллегами из ГАИШ МГУ [48].

Следует отметить большую работу коллег из МГУ. Выше отмечалась скудность нашей космической группировки, находящейся под эгидой Роскосмоса. Но надо сказать, что МГУ по числу аппаратов, на которых размещены научные приборы, созданные специалистами Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ (НИИЯФ МГУ), уже догоняет её. В МГУ исследованиям космоса уделяется достойное внимание — можно также вспомнить и уже упомянутую выше новую обсерваторию ГАИШ МГУ, и созданный в 2017 г. факультет космических исследований МГУ. Одним из флотилии университетских аппаратов является КА "Ломоносов", кстати, первый спутник



(а) Вспышка магнетара SGR 1935 + 2154 в рентгеновском диапазоне 18–320 кэВ (чёрная кривая, "Конус-Винд") и в радиодиапазоне 0,4–0,8 ГГц (красная кривая, CHIME/FRB), 28.04.2020 г. (б) Регистрация всплеск магнетара в художественном представлении.



(а) Примеры результатов, полученных с помощью КА "Ломоносов". (б) Результаты совместных наблюдений гамма-всплеска GRB161017A прибором БДРГ спутника Ломоносов и наземными телескопами сети МАСТЕР [49]. (в) Регистрация атмосферного электромагнитного транзientа прибором ТУС.

Земли, запущенный в 2016 г. с нового космодрома "Восточный". Основная часть научной аппаратуры, установленной на спутнике, была разработана в НИИЯФ МГУ. Космический аппарат "Ломоносов" специалисты рассматривают как обсерваторию для исследования экстремальных явлений во Вселенной. Здесь тоже в центре внимания были гамма-всплески — ищется связь их наблюдений в оптическом и гамма-диапазонах. Обсерватория проработала в штатном режиме 2 года. В декабре 2023 г. КА Ломоносов закончил своё существование.

Несмотря на относительно недолгий срок работы миссии, был получен ряд существенных результатов. Например, впервые проведены одновременные наблюдения излучения космических гамма-всплесков в оптическом и гамма-диапазонах и для двух всплесков (GRB161017 и GRB160625B) обнаружены оптические транзиенты одновременно с гамма-излучением. Кроме того, в оптическом излучении всплеска GRB161017 обнаружены квазипериодические колебания, свидетельствующие о трёхстадийном коллапсе спинара в чёрную дыру. Впервые проведена апробация флуоресцентной методики регистрации космических лучей предельно высоких энергий с орбиты Земли. Исследованы структуры транзиентных атмосферных явлений с субмикросекундным временным разрешением. Зарегистрированы события типа Multiple ELVES (Emission of Light and Very low frequency perturbations due to Electromagnetic pulse Sources).

3.2. Ультрафиолетовая Вселенная

Спустимся по энергии квантов излучения вниз к ультрафиолетовому (УФ) диапазону. В УФ-диапазоне высока плотность астрофизической информации о звёздах и газе, поэтому наблюдения в нём важны для широкого круга астрофизических задач. "Спектр-УФ" — следующая в очереди (после обсерватории "Спектр-РГ") на запуск космическая обсерватория серии "Спектр" (запуск запланирован на 2029 г.). Это — многоцелевая обсерватория, открывающая целый ряд новых возможностей для астрофизики: исследования химической эволюции Вселенной, образования планетных систем и молодых звёзд, физики аккреции на компактные объекты и пр. В частности, значительные ожидания связаны здесь с исследованиями экзопланет, свойств их атмосфер, возможно даже выявления неких биомаркеров, свидетельствующи-

щих об обитаемости планеты. Коллеги из ИНАСАН, являющегося головной научной организацией по этому проекту, активно готовятся к запуску обсерватории.

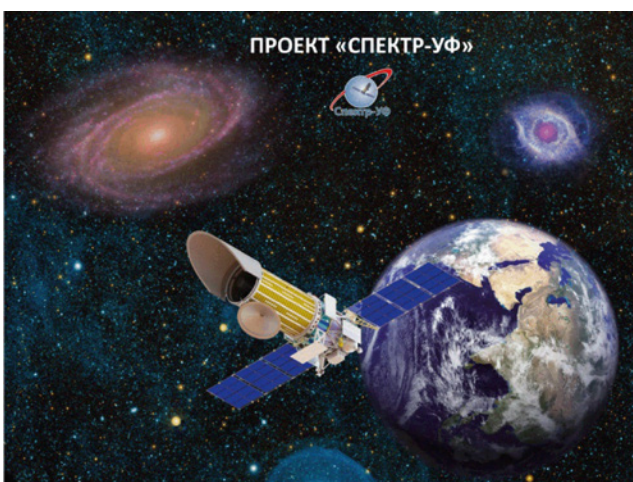
В направлении ультрафиолетовой астрономии у России тоже есть неплохой исторический задел — проработавший 6 лет в 1980-х гг. космический аппарат "Астрон", давший первый отечественный опыт длительных астрофизических наблюдений с борта космического аппарата. Можно также отметить, что помимо ультрафиолетового телескопа на борту Астрона был и комплекс рентгеновской аппаратуры. Научным руководителем проекта был академик Александр Алексеевич Боярчук, на тот момент работавший в КраО РАН. Большой вклад был внесён здесь и членом-корреспондентом нашего отделения Николаем Владимировичем Стешенко (КраО РАН), под научным руководством которого была создана оптика для этого космического телескопа.

Затем важную нишу УФ-астрономии надолго, но не навсегда занял известный всем телескоп им. Хаббла, функционирующий уже более 30 лет, с 1990 г. Следующая амбициозная американская обсерватория (Habitable Worlds Observatory, HWO) полетит не ранее 2040-х гг., т.е. для российского "Спектра-УФ" открывается прекрасное окно возможностей, уникальная ниша, которую надо успеть вовремя занять. Поэтому всегда огорчают задержки реализации этой миссии, происходящие, как правило, не из-за реальных технических проблем, а в основном из-за сбоев финансирования.

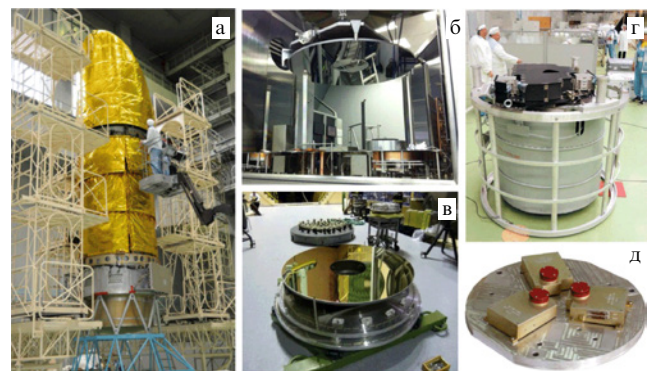
Научным руководителем проекта "Спектр-УФ" долгое время являлся академик А.А. Боярчук, а после его ухода из жизни его сменил также член нашего отделения чл.-корр. РАН Б.М. Шустов.

Главный инструмент обсерватории — ультрафиолетовый телескоп Т170-М с главным зеркалом 170 см, научные приборы проекта — спектрографы высокого и низкого разрешения, камеры для построения высококачественных изображений в УФ и оптическом участках спектра (разрешение 0,1"), а также уже упоминавшийся выше прибор серии "Конус" для регистрации гамма-лучей.

На настоящий момент можно считать, что все основные проблемы проекта "Спектр-УФ" решены. Создан макет телескопа с нужными параметрами. Импортозамещение, конечно, создаёт определённые трудности, но они вполне преодолимы.



Проект "Спектр-УФ".



(а) Общая сборка телескопа Т170-М, АО "НПО Лавочкина". (б) Нанесение отражающего покрытия $AlMgF_2$ на главное зеркало телескопа Т170-М, НИИ НПО "Луч". (в) Вторичное зеркало телескопа Т170-М. (г) Сборка научных приборов, АО "НПО Лавочкина". (д) Система датчиков гида, ИКИ РАН.

3.3. Радиоастрон и Миллиметр

В области космической радиоастрономии мы были первыми — советский телескоп КРТ-10, установленный ещё в 1979 г. на советской орбитальной станции "Салют-6", был первым в мире космическим радиотелескопом. Этот телескоп монтировался на орбите вручную, и проработал он всего около месяца, выполнив наблюдения пульсара PSR 0329 + 054 и участка Млечного Пути, после чего был размонтирован.

Серия "Спектр" включает два радиоастрономических проекта: уже реализованный "Спектр-Р" (Радиоастрон) и ещё планируемый "Спектр-М" (Миллиметр). Оба проекта предполагают работу как в режиме одиночного телескопа, так и в режиме наземно-космического интерферометра, в зависимости от поставленной задачи. Идея вынести радиотелескоп в космос для создания интерферометрической базы, превышающей диаметр Земли, принадлежит ещё Иосифу Самуиловичу Шкловскому. Но реализация этой идеи в проекте Радиоастрон (Спектр-Р) заняла почти 30 лет, а проект Миллиметр предполагается к запуску только в следующем десятилетии. Головная научная организация по обоим проектам — Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, точнее, его структурное подразделение — Астрокосмический центр (АКЦ ФИАН). Огромная роль здесь принадлежит академику Н.С. Кардашёву. Николай Семёнович успел увидеть успех проекта Радиоастрон и ушёл из жизни вскоре после его завершения в 2019 г.

Космический аппарат Радиоастрон с десятиметровой антенной был запущен в 2011 г. на орбиту с апогеем 350 тыс. километров и стал первым реализованным проектом серии "Спектр".

Важной целью было максимально отдалиться от помех, связанных с различными излучениями, исходящими от Земли, так что фактически аппарат оказался в солнечном ветре. Это дало возможность исследовать не только далёкие объекты, но и локальные условия в плазме, окружающей аппарат, о которых мы тоже рассказываем в данной статье. Радиоастрон проработал почти 8 лет, превысив запланированное время работы (5 лет), выполнил большой объём наблюдений различных источников радиоизлучения в диапазонах сантиметровых и дециметровых длин волн.

В проекте был реализован режим наземно-космического интерферометра со сверхдлинной базой — одним из радиотелескопов системы был Радиоастрон, другим(и) — наземные радиотелескопы. Таким обра-

зом база интерферометра (расстояние между телескопами) получилась исключительно большой и удалось достичь очень высокого углового разрешения ~ 10 мкс.

В центре внимания проекта были исследования активных ядер галактик со сверхмассивными чёрными дырами. Хорошее разрешение позволило обнаружить в них локальные компактные структуры с гораздо более высокой яркостью, чем средняя. Полученные результаты показывают, что надо многое скорректировать в наших моделях излучения, скорее всего, какую-то роль играют магнитные структуры, формирующиеся при пересоединении. Протоны в таких процессах могут ускоряться почти до скорости света. Необходимо понять, как это связано с образованием нейтрино. Кроме того, возникающие джеты имеют необычную винтовую форму, как будто активность ядер таких галактик связана с наличием в них не одной, а сразу двух взаимодействующих сверхмассивных чёрных дыр.

Стоит упомянуть, что именно возможности Радиоастрона позволили впервые зарегистрировать экстремальную яркость ядра квазара — было получено значение эффективной температуры излучения от 20 до 40×10^{12} К. Эффективная температура плазмы, из которой состоят джеты квазаров, не может превышать 500 млрд градусов. Этот потолок температуры связан с резким возрастанием потерь на обратный эффект Комптона. Однако квазар 3C273 нарушает данное ограничение более чем в 10 раз. Полученный результат указывает на необходимость пересмотра механизма излучения ядер квазаров [50].

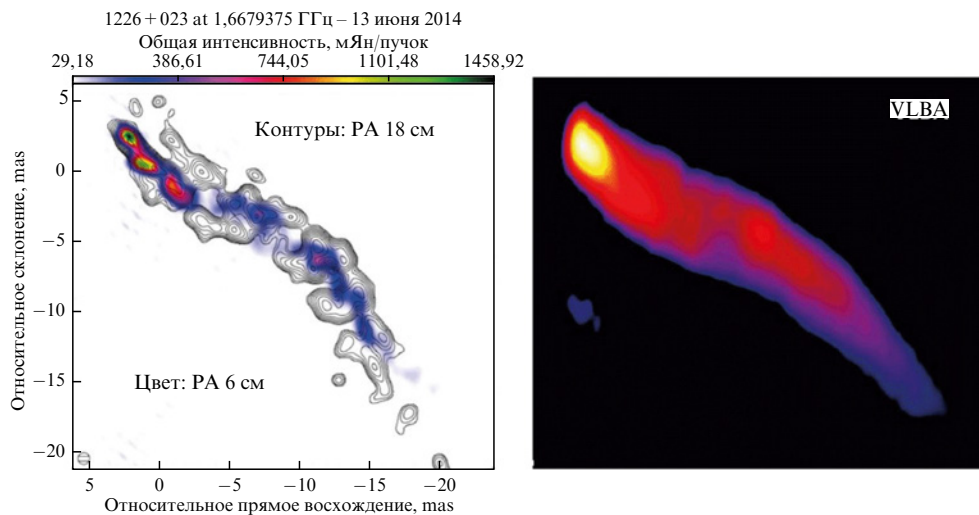
Ещё один пример. В результате анализа РСДБ наблюдений пульсара B0329 + 54, выполненных с наземно-космическим интерферометром Радиоастрон, была обнаружена тонкая структура (субструктура) диска рассеяния радиоизлучения этого пульсара [51]. Измеренный угловой диаметр диска рассеяния составил величину в несколько тысячных долей секунды дуги. Только наземно-космический интерферометр Радиоастрон позволил реализовать подобное угловое разрешение. Параметры обнаруженной субструктуры для пульсаров, точечных излучателей, связаны только со свойствами неоднородностей межзвёздной плазмы. Субструктура рассеяния была также обнаружена при наблюдениях Радиоастроном квазара 3C273 на больших проекциях базы (на плоскость, перпендикулярную лучу зрения). Для квазаров появление субструктуры обусловлено как средой, так и структурой самого источника, и влияние субструктуры должно учитываться при построении изображений таких источников. Более того, анализ свойств субструктуры позволяет получить информацию о характеристиках межзвёздной среды и даже восстановить истинное изображение космического объекта, размытое межзвёздными облаками. Это даёт специалистам новые возможности по изучению массивных чёрных дыр, скрытых от наблюдателя плотной окружающей их средой.

Мы привели только несколько иллюстраций.

Всего же за время своего существования интерферометром Радиоастрон было проведено около 4000 наблюдений различных астрофизических объектов. Была получена информация о структуре с уникальным угловым разрешением для 160 активных ядер галактик, 20 пульсаров, 12 космических мазеров гидроксила и



Академик Н.С. Кардашёв, проекты Радиоастрон и Миллиметр.

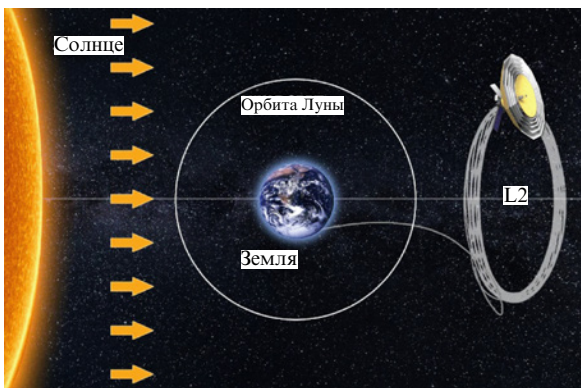


Джет квазара 3C273 показывает как эффект уярчения к краю на 18 см, так и яркую сердцевину на 6 см [50].

водяного пара в нашей Галактике (области образования звёзд и планетных систем), 2 мегамазеров около ядер галактик NGC3079 и NGC4258, обнаружены и исследованы необычные свойства распространения радиоволн в межзвёздной среде. Проект был очень успешным и, хотя миссия была завершена в 2019 г., массив

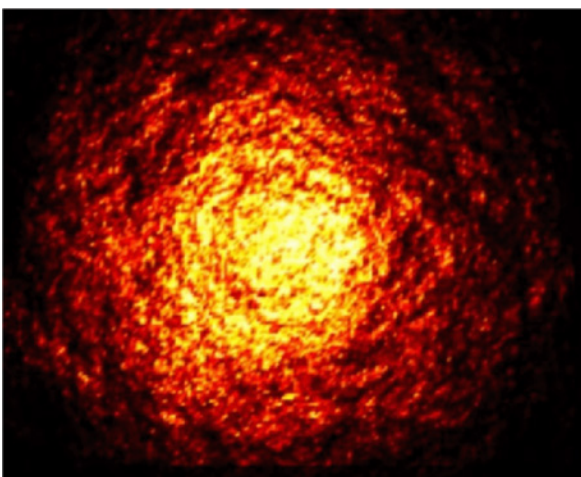
полученных наблюдательных данных, накопленный за годы работы обсерватории, даёт и сейчас возможность получения новых уникальных научных результатов.

Продолжением проекта "Спектр-Р" должна стать обсерватория "Спектр-М", более известная под названием Миллиметрон — данный аппарат задуман для прорыва в области уже миллиметровых, субмиллиметровых и даже в ближнем ИК-диапазоне длин электромагнитных волн. Раскрываемая антенна будет иметь диаметр 10 м. Охлаждаемый (до 10 К) телескоп сможет работать в диапазоне до 10 мм как интерферометр и как самостоятельная антенна в диапазоне до долей миллиметра. Высокое угловое разрешение обеспечивается конфигурацией орбиты — в отличие от Радиоастрона, эта обсерватория будет работать на орбите вблизи точки Лагранжа L_2 на расстоянии 1,5 млн км от Земли в противосолнечном направлении. Миллиметрон будет проводить наблюдения в двух режимах: как сверхчувствительный одиночный космический телескоп диаметром 10 м и как часть наземно-космического интерферометра.



Проект Миллиметрон.

Проект даёт серьёзную надежду, основываясь на особенностях спектра реликтового излучения, заглянуть в раннюю Вселенную, в эпоху реионизации. Вторая задача, связанная уже скорее с планетной физикой, — происхождение и перенос воды. Будут проводиться исследования и в области физики чёрных дыр и кротовых нор, их образования и эволюции, в частности, ожидается, что в режиме РСДБ будут получены детальные изображения горизонта событий сверхмассивной чёрной дыры (например, Sgr A*, M87). Будет уделено большое внимание и вопросам звездообразования. Сейчас детально прорабатывается научная программа этой амбициозной миссии [52]. О точной дате запуска обсерватории говорить пока рано, но если все сложные технические вопросы удастся достаточно оперативно решить, то становится реальным 2033–2034 гг. Более подробно о проектах Радиоастрон и Миллиметрон рассказано в недавно опубликованном обзоре коллег из ФИАН «От проекта Спектр-Р к проекту "Спектр-М": вехи космической радиоастрономии» [53].



Тонкая субструктура диска рассеяния радиоизлучения пульсара.

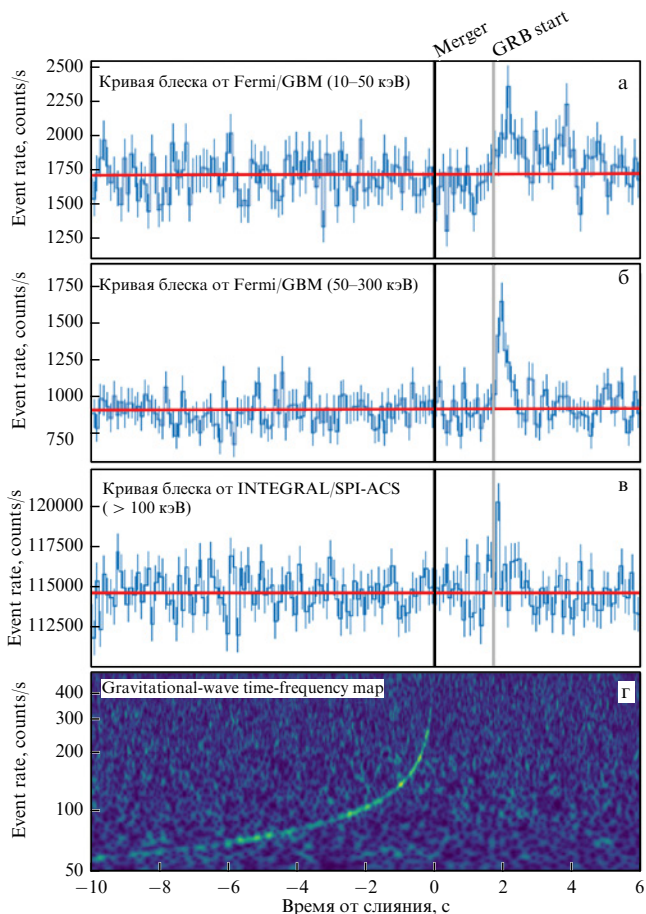
4. Многоканальная астрономия

4.1. Гравитационные волны

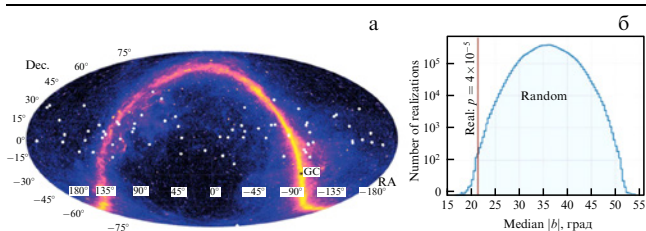
Наверное, самое значительное из того, что произошло в астрофизике за недавнее время, — открытие гравитационных волн. Наш коллега, академик РАН Владислав Иванович Пустовойт (1936–2021 гг.) стоял у истоков разработки его методики. К сожалению, в группе зарубежных учёных, получивших за это открытие (заслуженно) Нобелевскую премию, места ему не нашлось, но частично справедливость была восстановлена, когда Государственная премия в области науки и технологий 2018 г. была присуждена российским специалистам (в том числе и В.И. Пустовойту), работы которых были тесно связаны с данным открытием. Об этом немного более подробно рассказывается в статье И.А. Щербакова "О некоторых научных результатах, полученных в институтах Отделения физических наук РАН за последние 25 лет", опубликованной в этом же номере журнала [54]. Большая команда учёных из нескольких институтов нашего Отделения и Московского университета участвовала в поисках давно разыскиваемого электромагнитного сигнала от гравитационно-волновых событий. Таким событием стало первое зарегистрированное слияние двух нейтронных звёзд. Событие (получившее название GW170817) практически одновременно зарегистрировали детекторы гравитационно-волнового детектора LIGO и космические обсерватории "ИНТЕГРАЛ" и "Ферми" (НАСА) [39]. Важно, что благодаря участию в европейском проекте "ИНТЕГРАЛ" российские учёные смогли сыграть важную роль и в космических измерениях, и в разработке теории таких явлений. Слияние нейтронных звёзд привело к образованию "килоновой", когда оставшийся от столкновения материал ярко светится и выбрасывается из области столкновения далеко в космос. Это мощное явление (на три порядка превышающее по энергетике вспышку новой) сопровождалось генерацией гамма-излучения, зарегистрированного "ИНТЕГРАЛОМ". Важно, что в таком "multimessenger" эксперименте удалось точно доказать, что в пределах точности измерений скорость распространения гравитационных волн равна скорости света.

Важное значение имеют работы по исследованию происхождения нейтрино высоких энергий, проводившиеся совместно членами обеих секций ОФН РАН. Нынешнее тысячелетие ознаменовалось существенными достижениями в области физики нейтрино. Один из значимых "свежих" результатов был получен нашими российскими коллегами из АКЦ ФИАН и Института ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН) по данным антарктической нейтринной обсерватории IceCube. Нейтрино высоких энергий по этим наблюдениям концентрируются вблизи плоскости Галактики, что говорит о значительном вкладе Млечного Пути в общую картину распределения высокоэнергичных нейтрино наряду с внегалактическими источниками [55].

Наша страна является одним из лидеров по установкам класса "мегасайенс" для нейтринной астрономии. В первую очередь здесь стоит упомянуть подводный нейтринный телескоп Baikal-GVD. Идея этого телескопа и первые шаги по его созданию относятся ещё к 1980-м гг., а в 1998 г. была введена в строй первая очередь. В нынешнем тысячелетии реализуется вторая очередь теле-

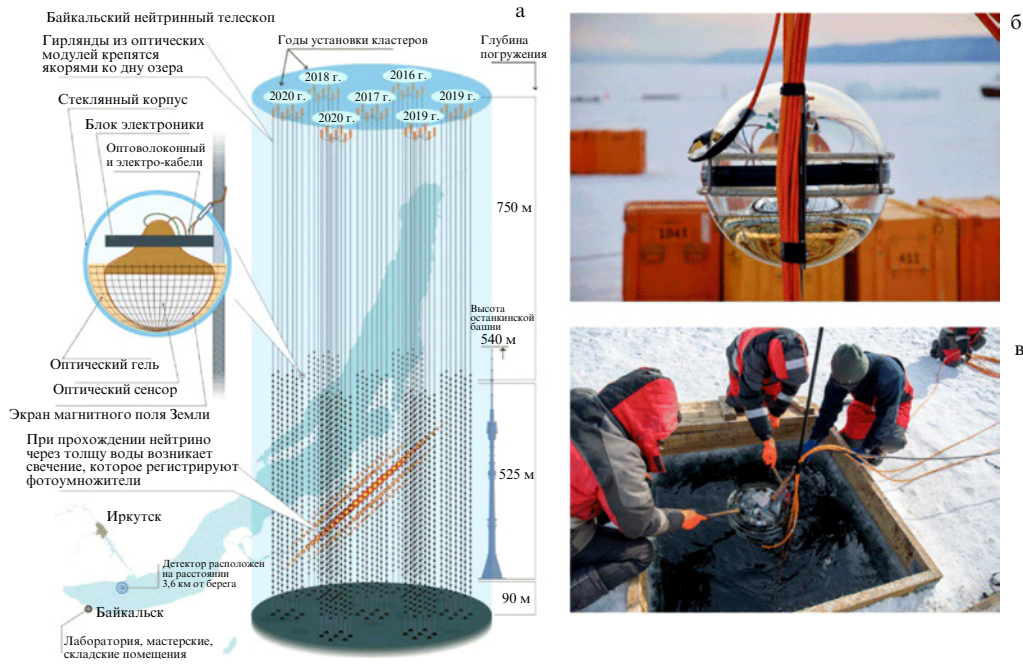


Первые данные о событии GW170817. По горизонтали отложено время от момента слияния в секундах. Чёрная линия — момент слияния нейтронных звёзд, серая — момент регистрации гамма-излучения. (а, б) Данные космической гамма-обсерватории Fermi, (в) данные обсерватории "Интеграл". (г) Данные гравитационно-волновой обсерватории LIGO [39].

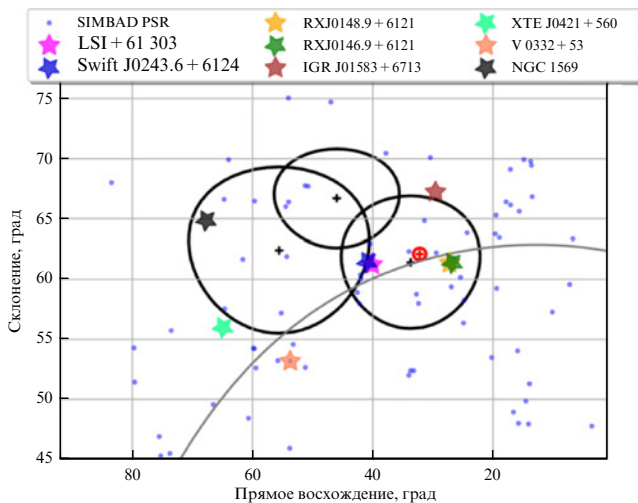


(а) Направления прихода 71 высокоэнергичных нейтрино на IceCube, показанные белыми точками поверх карты гамма-излучения Fermi. (б) Медианное значение галактической широты этих нейтрино (21°), и распределение широты для Монте-Карло симуляций в предположении изотропии [55].

скопа — в 2015 г. был спущен под воду первый кластер, в 2021 г. состоялся официальный ввод в эксплуатацию установки в составе 8 кластеров (2304 оптических модуля, рабочий объём достиг 0,4 км³), к 2023 г. кластеров было уже 12 (3500 оптических модулей, рабочий объём — 0,5 км³). На настоящий момент Baikal-GVD является самым большим в Северном полушарии и вторым в мире после антарктического IceCube. Работа по проекту ведётся широкой коллаборацией учёных, очень большую роль играют здесь учёные из ИЯИ РАН и Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ). При помощи телескопа уже получают уникальные результаты, а сов-



(а) Схема подводного нейтринного телескопа Baikal-GVD; (б) оптический модуль телескопа; (в) погружение оптического модуля.



Три каскадных события Baikal_GVD с высокой энергией GVD190216CA, GVD190604CA и GVD210716CA вблизи галактической плоскости (серая линия) и ошибки определения их направлений (чёрные линии). Точка статистически наиболее значимого превышения потока IceCube над изотропным в Северном полушарии показана красным значком [56].

местная работа с IceCube даёт возможность вести поиск источников нейтрино высоких энергий на всей небесной сфере и в перспективе позволит построить карту нейтринного неба.

Baikal-GVD даёт нам много уникальных результатов. Например, недавно обнаружены корреляции с радио-яркими блазарами каскадных событий с энергиями, превышающими 100 ТэВ. Анализ указывает на наличие ассоциации как с внегалактическими, так и с галактическими астрофизическими источниками.

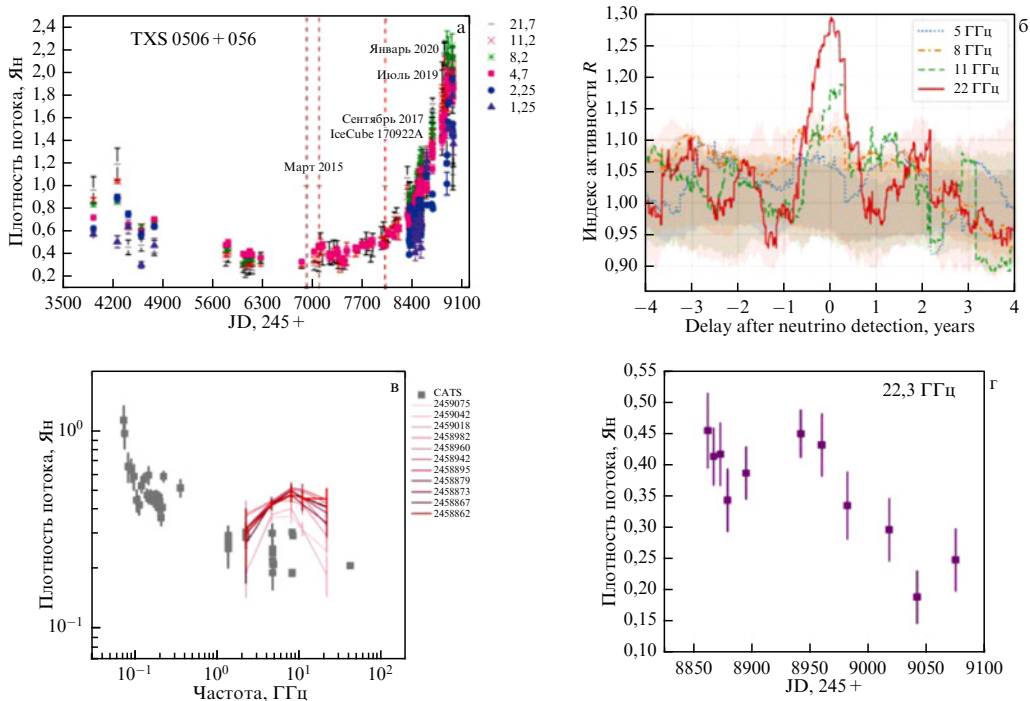
В частности, выполнен анализ наблюдаемого триплета нейтринных кандидатов в галактической плоскости, исследована их потенциальная связь с определёнными галактическими источниками, рассмотрено совпа-

дение направлений прихода каскадных событий с несколькими яркими блазарами.

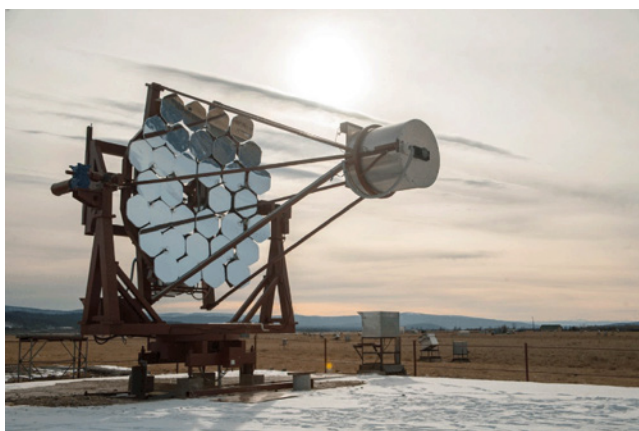
Как иллюстрацию многоканального подхода можно привести ещё один пример. По данным нейтринного телескопа IceCube, наблюдений на международных радиоинтерферометрических сетях и на РАТАН-600 САО РАН обнаружено, что нейтрино широкого спектра энергий рождаются в центральных областях ярких блазаров, т.е. активных галактик со струями, направленными на наблюдателя [57]. Области прихода нейтрино сверхвысоких энергий (от ТэВ до ПэВ) совпадают с положением ярких квазаров на небе, а моменты их прихода — с мощными вспышками синхротронного излучения в компактных джетах этих объектов. Полученные результаты позволят лучше понять свойства центральных машин активных галактических ядер как ускорителей массивных частиц — протонов.

Гамма-астрономия — актуальная, интенсивно развивающаяся область астрофизики, она является важной частью многоканальной астрономии. Во многом изучаемые в гамма-астрономии процессы связаны с физикой космических лучей. Особенностью наземной регистрации таких высокоэнергичных фотонов является то, что они инициируют в атмосфере Земли каскады частиц, которые затем регистрируются наземными установками. Мы уже обсуждали исследования в гамма-диапазоне в разделе, посвящённом космическим проектам, здесь же считаем необходимым кратко упомянуть и наш крупный наземный проект класса мегасайенс — гамма-обсерваторию TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) в Тункинской долине в Республике Бурятия.

TAIGA занимает площадь в один квадратный километр и является одной из самых чувствительных в мире установок этого типа. Чувствительность и точность инструментов обсерватории достигается за счёт детекторов, использующих разные принципы и методы регистрации частиц сверхвысоких энергий, — оптические



(а) Кривая блеска TXS 0506 + 056, полученная на РАТАН-600; одной из вертикальных линий показано событие IceCube-170922A в 2017 г. (ТЭВ). (б) Корреляция времени прихода нейтрино с радиовспышками, наблюдаемыми на РАТАН-600. Максимальная корреляция наблюдается на наибольшей частоте измерений 22 ГГц с нулевой задержкой по времени. (в) Рост спектральной плотности потока квазара J1100 + 122 в момент регистрации события IceCube-200109A (красным) по измерениям РАТАН-600 на 2–22 ГГц (измерения из CATS показаны серым). (г) Кривая блеска J1100 + 122 на 22 ГГц, измеренная на РАТАН-600 с момента события IceCube-200109A [57].



Один из черенковских атмосферных телескопов гамма-обсерватории TAIGA.

станции, черенковские телескопы и сцинтилляционные детекторы. Реализация проекта началась в 2013 г. В 2023 г. получены первые физические результаты на сцинтилляционной установке Tunka-Grande, действующей с 2018 г. в составе комплекса и включающей в себя 19 станций, расположенных вблизи центров кластеров установок Тунка-133 на площади около 0,5 кв. км.

Коллаборация TAIGA включает значительное число научных и образовательных организаций, как российских, так и зарубежных. Конечно, здесь нельзя не отметить большую роль Иркутского государственного университета, из институтов РАН активное участие принимают ИИИ РАН, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН (ИЯФ СО РАН), Институт земного магнетизма, ионосферы и



Обложка книги "Многоканальная астрономия".

распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН).

Многоканальная астрономия — молодое направление, но за ним будущее. В 2019 г. вышла книга под редакцией академика А.М. Черепашука "Многоканальная астрономия" [58]. Книга представляет собой коллективный труд более чем 20 ведущих учёных нашей страны, работающих в различных областях астрономии и астрофизики, в том числе членов нашего отделения и сотрудников институтов РАН. Эта книга, возможно, первая в мире, посвящённая многоканальной астрономии (книга *Multimessenger Astronomy*, выпущенная издательством Springer и позиционируемая как первая популярная книга по многоканальной астрономии, появилась только в 2021 г.).

5. Ближний космос

С началом космической эры человечество получило новые возможности для исследований, которые бурно развиваются в новом тысячелетии. И если в случае объектов дальнего космоса это сейчас выражается в основном в создании космических телескопов, позволяющих регистрировать излучение в более широком диапазоне энергий с постоянно растущим угловым разрешением, то объекты нашей Солнечной системы стали доступными и для непосредственного изучения. Наверное, будет излишним обосновывать здесь очевидную необходимость исследований Солнца, которое помимо определяющей роли в климатических процессах влияет на все стороны деятельности человечества — начиная от самочувствия людей, заканчивая опасными воздействиями на работу различных технических устройств в космосе и на Земле. Но и исследование других объектов ближнего космоса приобретает особую важность — помимо получения новых фундаментальных знаний, также и в связи с перспективами, хоть и достаточно отдалёнными (порой даже кажущимися сейчас научной фантастикой), последующего освоения ближайших небесных тел для различных целей, включая использование их в качестве потенциальных источников космических ресурсов.

В этом разделе рассказывается о работах нашего отделения в ближнем космосе, посвящённых изучению Солнца, Земли, Луны и планет Солнечной системы. Несмотря на многие организационные и финансовые трудности, у нас здесь есть чем гордиться.

5.1. Исследования солнечно-земных связей и космической погоды

5.1.1. Программа "Коронас". Новое тысячелетие началось под знаменем успешных исследований по солнечно-земной физике (серия низкоорбитальных спутников КОРОНАС — Комплексные Орбитальные Околосолнечные Наблюдения Активности Солнца).

Наиболее успешным оказался проект "Коронас-Ф", в котором сложилась мощная кооперация российских академических институтов, вузов, зарубежных организаций из Польши, Великобритании, США и других стран. Головная роль в проекте принадлежала ИЗМИРАН. Научными руководителями проекта были д.ф.-м.н. В.Н. Ораевский и чл.-корр. РАН И.И. Собельман. Научная аппаратура состояла из трёх групп уникальных научных приборов: приборы рентгеновского диапазона для построения монохроматических изображений активных областей на Солнце с пространственным разрешением



Космические проекты (реализованные и планируемые), направленные на исследования Солнца.

порядка $1''$ в линиях высокоионизированных атомов Fe, Mg, K, Ar, Ca, Si, Ni; приборы для измерения потоков и поляризации электромагнитного излучения активных областей и вспышек от гамма- до радиодиапазона; приборы для исследования солнечных корпускулярных потоков (спектры и потоки электронов, протонов, нейтронов, гамма-квантов). Пять из этих приборов имели лучшие в мире характеристики, остальные соответствовали мировому уровню. Коронас-Ф работал на орбите с середины 2001 г. до конца 2005 г. и получил впечатляющее число высокозначимых научных результатов.

В центре внимания миссии находились исследования проявлений солнечных вспышек в широком диапазоне — от оптического до гамма-излучения. Детально изучалась импульсная фаза вспышек, получены динамические рентгеновские спектры, определены характерные периоды колебаний плазмы на разных стадиях вспышки, зарегистрированы линии гамма-излучений от ядерных реакций во вспышках, по которым определено содержание в солнечной атмосфере различных химических элементов и их изотопов. Изучены атомные процессы в солнечных вспышках и впервые получены полнопрофильные спектральные линии от самых мощных вспышек. С помощью новых спектроскопических методов определено абсолютное содержание ряда химических элементов в короне Солнца.

На основе наблюдений не имевшим в мире аналога рентгеновским спектрогелиографом РЕС-К (ФИАН) в резонансной линии MgXII ($8,42 \text{ \AA}$) в солнечной короне обнаружен и исследован целый класс новых явлений — высокодинамичных плазменных образований с температурами до 20 млн градусов. Изображения и динамика этих высокотемпературных образований получены впервые. Установлено, что образования имеют самую разнообразную форму: "горячих облаков", "пауков", петель, распространяющихся волновых фронтов, последовательно зажигающихся магнитных арок. Они являются проявлением одного из механизмов нагрева солнечной короны в результате выделения магнитной энергии в магнитных конфигурациях и трансформации её в энергию плазмы. Установлена связь обнаруженных горячих плазменных образований в короне с выбросами массы из атмосферы Солнца.

Вдоль орбиты спутника вёлся непрерывный мониторинг потоков солнечных энергичных частиц — особенно интересны уникальные данные в диапазоне $> 300 \text{ кэВ}$. Эти измерения позволили изучить динамику радиацион-

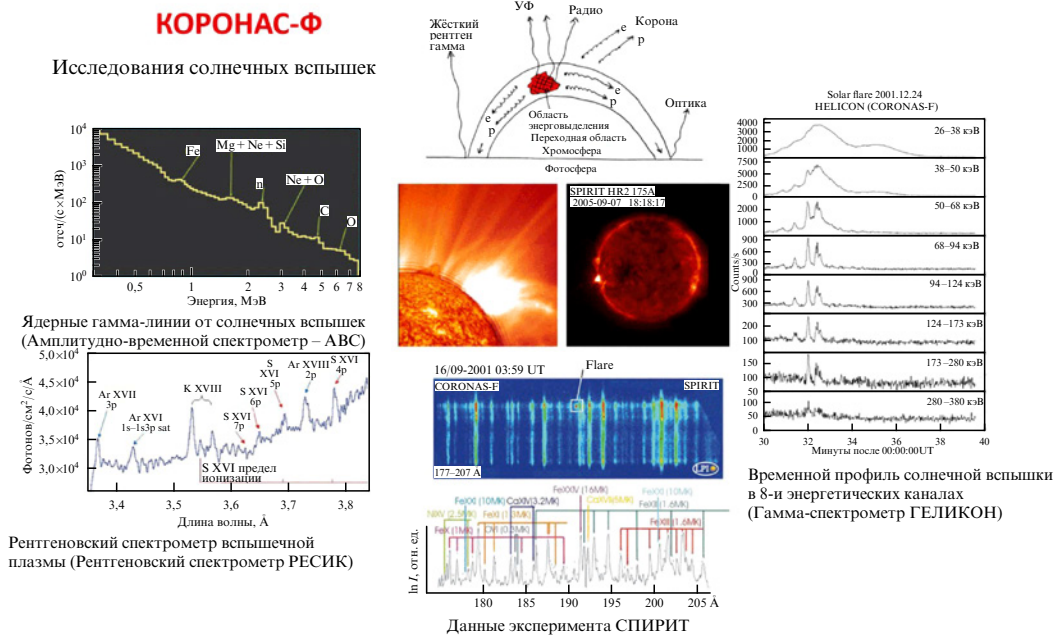
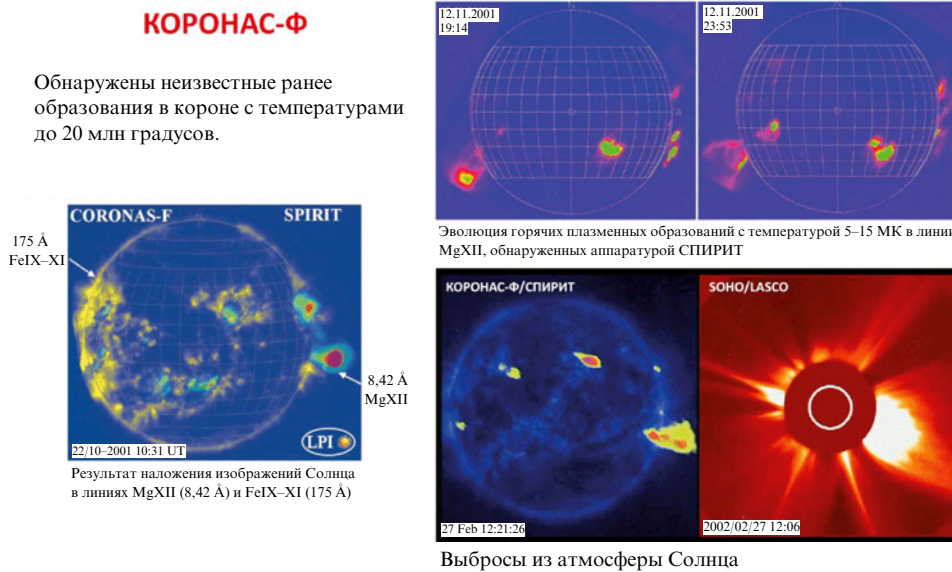


Иллюстрация некоторых результатов исследования солнечных вспышек, полученных миссией "КОРОНАС-Ф".



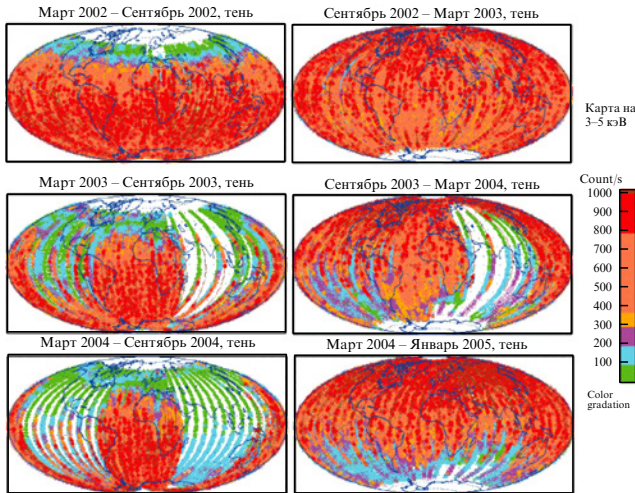
Обнаружение миссией "КОРОНАС-Ф" ранее неизвестных образований в короне Солнца.

ных поясов Земли и проникновение энергичных солнечных заряженных частиц внутрь магнитосферы в периоды сильных магнитных бурь. Обнаружен новый эффект исчезновения внешнего радиационного пояса электронов на главной фазе магнитных бурь при энергиях выше 1,5 МэВ. Впервые были проведены длительные измерения свечения верхней ночной атмосферы Земли в рентгеновском диапазоне и получены карты, показывающие его динамику.

Можно также упомянуть ещё и то, что гамма-спектрометром ГЕЛИКОН (ФТИ Иоффе) было зарегистрировано редчайшее событие — отражение от Луны гигантского гамма-всплеска нейтронной звезды, позволившее оценить энергию взрыва на нейтронной звезде, которая составила около $10^{45} - 10^{46}$ эрг. Это стало пер-

вым в мировой практике наблюдением отражения космического гамма-всплеска от небесного тела или, другими словами, первая локация небесного тела при помощи природного сверхмощного импульса гамма-излучения.

В общем, проект был очень успешным и совершенно заслуженно получил в 2008 г. премию Правительства РФ "За создание комплекса научной аппаратуры с новыми информационными каналами регистрации корпускулярного и электромагнитного излучений Солнца, а также за приоритетные результаты наблюдений солнечной активности и её воздействия на Землю со спутника КОРОНАС-Ф (2001–2005 гг.)". По результатам миссии была опубликована книга под редакцией д.ф.-м.н. В.Д. Кузнецова "The Coronas-F Space Mission" [59], содержащая по-



Карты свечений верхней ночной атмосферы Земли в рентгеновском диапазоне (3–5 кэВ), построенные по данным Комплекса солнечных космических лучей (НИИЯФ МГУ), установленного на борту КА КОРОНАС-Ф.

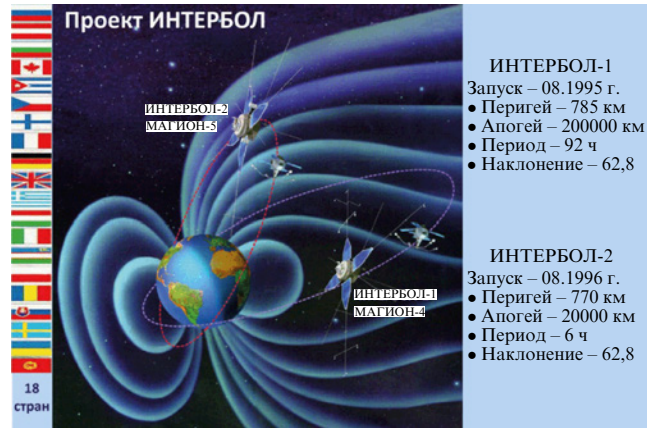


Схематическое представление события, зарегистрированного КОРОНАС-Ф — отражение от Луны гамма-всплеска нейтронной звезды.

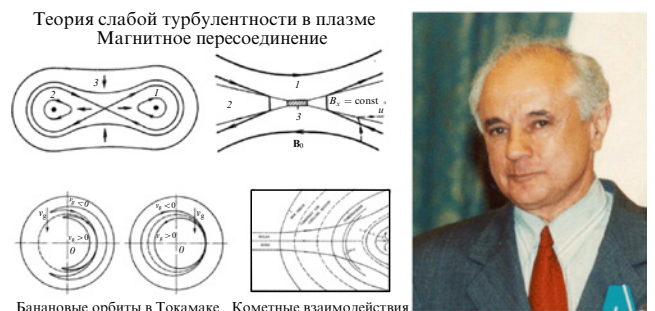
дробное описание миссии и полученных в её ходе результатов.

5.1.2. Многоспутниковая система "Интербол". "Интербол" (Interball) — международный четырёхспутниковый проект, запущенный в конце 1990-х гг., можно рассматривать как некое чудо — несмотря на общий развал страны, удалось запустить сложную многомасштабную спутниковую систему для изучения связей дальней магнитосферы Земли с ближней к Земле авроральной областью. В проекте участвовали 18 стран. Помимо глобальных, в проекте проводились и локальные измерения, т.е. в его состав входили 2 больших (ещё советских) спутника "Прогноз" и 2 малых чешских субспутника "Магион".

Научным руководителем всей программы исследований на космических аппаратах серии "Прогноз" был академик А.А. Галеев (1940–2022 гг.). Наиболее известны его работы по квазилинейной теории плазмы и удержанию горячей плазмы в токамаках, но и его деятельность последних лет активной жизни, связанная с разработкой моделей пересоединения магнитных полей, была



Проект Интербол.



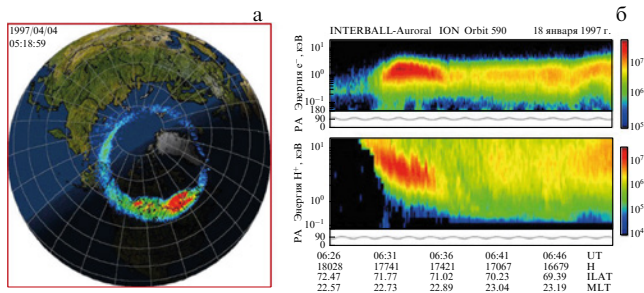
Академик А.А. Галеев.



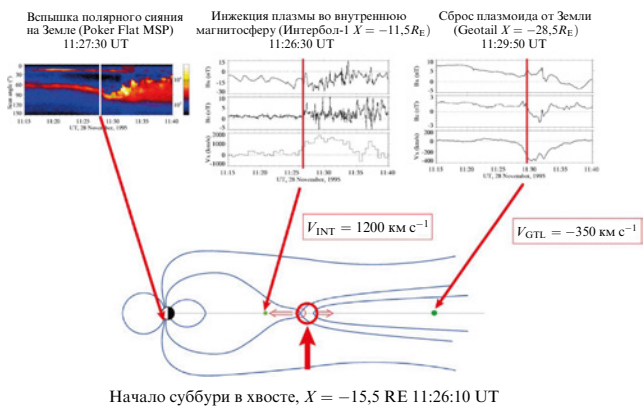
Программа ISTP. На фото — А.А. Галеев и руководители космических агентств США, Европы и Японии.

в 2009 г. удостоена престижной медали им. Ханнеса Альфвена, учреждённой Европейским геофизическим обществом, — "за выдающийся вклад в теорию космической плазмы, в том числе за исследования явлений критической ионизации, спонтанного пересоединения и теорию короны аккреционного диска".

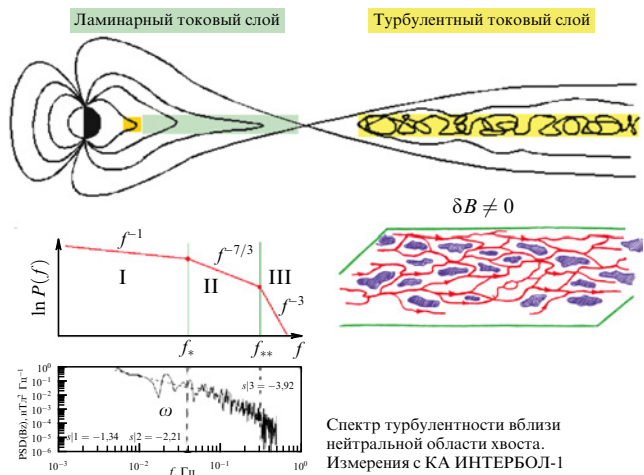
Время запуска "Интербола" оказалось очень удачным, проект попал в международную программу исследований по солнечно-земной физике (ISTP) и работал вместе с американскими и японскими спутниками — впервые на "всех этажах" земной магнитосферы функционировала мощная международная многоспутниковая система. И это, конечно, быстро принесло серьёзные успехи. Однозначно разрешилась многолетняя дискуссия о том, где именно в магнитосферном хвосте локализовано магнитное пересоединение, ведущее к началу суббури (основное геомагнитное возмущение) и выделению запасённой в хвосте магнитной энергии. Сравнение наземных данных, спутниковых измерений Интербола и японского КА "Geotail" позволило однозначно найти эту локализацию примерно в 15 радиусах в антисолнечном направлении от Земли.



(а) Проекция аврорального овала на Землю. (б) Тонкие структуры потоков частиц в авроральной магнитосфере (прибор ИОН).



Схематическое изображение сценария многоспутникового изучения развития магнитной суббури по данным Interball-1, Geotail и наземных наблюдений (станция Poker Flat на Аляске). Схематически изображена структура магнитосферного хвоста и показано положение начала суббури.



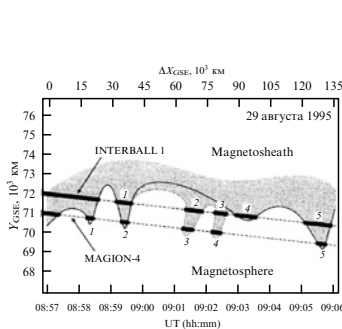
Неравновесные квазистационарные состояния токовых слоёв.

Вторая часть программы — локальные измерения на парах спутник (с орбитой в полярной области, "авроральный зонд")–субспутник (с орбитой в хвосте магнитосферы, "хвостовой зонд") — тоже дала интересные результаты о поведении магнитопаузы (границы магнитосферы), своеобразного магнитного щита Земли, под действием различных воздействий, приходящих от Солнца.

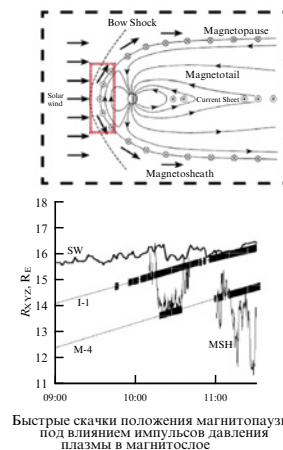
Проект дал множество результатов, сотни статей в российских и зарубежных журналах. Успех программы "Интербол" — это, конечно, эхо советской программы

СПУТНИК-СУБСПУТНИК

Свойство магнитного щита Земли



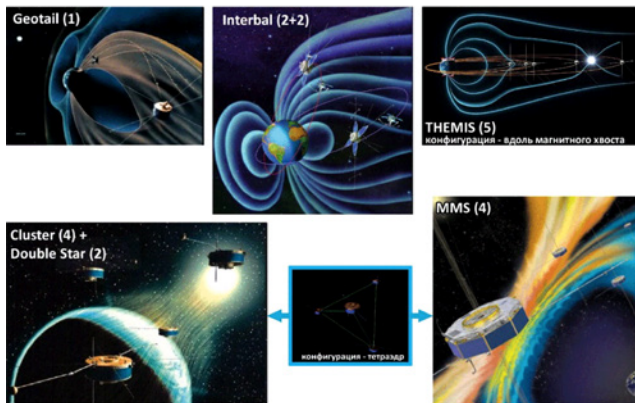
Волны на поверхности магнитопаузы



Быстрые скачки положения магнитопаузы под влиянием импульсов давления плазмы в магнитосфере

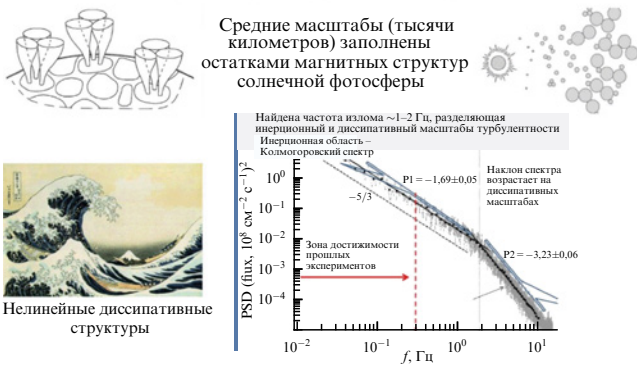
Результаты измерений на парах спутник – субспутник.

ИЗМЕРЕНИЯ «IN SITU» (1992-2023)



Многоспутниковые системы.

"Интеркосмос". "Интербол" — наверное, последний выдающийся проект советской эпохи, хотя и реализовался он уже в российское время. Эксперименты, проведённые с помощью приборов на спутниках проекта, позволили получить огромный объём высококачественной научной информации, заметно превышающий весь суммарный объём данных по солнечно-земной физике, собранный в исследованиях, проведённых в СССР и в России в течение примерно 30 предшествующих лет. Импульс, данный "Интерболом", как первой многоспутниковой системой, космической физике, продолжается, но исследования переходят на всё более и более мелкие масштабы — в нулевые и десятые годы создавались всё более и более тесные спутниковые группировки. Следующей после "Интербола" стала четырёхспутниковая европейская система "Кластер", запущенная, кстати, двумя российскими РН "Союз". Разделение спутников в системе "Кластер" соответствует характерным масштабам движения ионов, примерно сотни километров. Затем последовала американская система MMS (Magnetospheric Multi Scale), где разделение соответствует масштабам электронного движения и составляет единицы и десятки километров. Многие российские учёные работают с этими данными, находящимися в открытом доступе, и получают прекрасные результаты, в частности, найдены сверхтонкие структуры с экстремально сильными локальными электронными



Солнечный ветер как лаборатория исследования турбулентности в горячей плазме.

токама. Эти измерения позволили окончательно прояснить проблемы объяснения метастабильности ТС и взрывного пересоединения в них, основы решения которых были заложены в работах А.А. Галеева.

5.1.3. Исследования солнечного ветра плазменным комплексом КА Радиоастрон. Отечественные спутниковые измерения плазменных явлений после "Интербола" замерли почти на 25 лет. Поэтому очень важными оказались плазменные измерения в астрофизическом проекте "Спектр-Р" (Радиоастрон) (о котором говорилось выше), работавшем на сильно вытянутой эллиптической орбите в межпланетном пространстве, заполненном плазмой солнечного ветра. Научный руководитель проекта академик Николай Семёнович Кардашёв согласился установить небольшой международный плазменный комплекс (Плазма-Ф) на своём аппарате, и проведённые измерения позволили получить отличные результаты.

Приборный комплекс "Плазма-Ф" включал в себя: плазменный прибор БМСВ (быстрый монитор солнечного ветра), магнитометр ММФФ (феррозондовый и индукционный магнитометры), детектор энергичных частиц МЭП-2 и систему сбора, обработки и хранения данных. Орбита КА "Спектр-Р" позволяла проводить измерения как внутри магнитосферы Земли, так и за её пределами — в течение 7–8 дней аппарат находился вне магнитосферы Земли, что обеспечивало практически непрерывный мониторинг солнечного ветра, а затем быстро проходил через магнитосферу, позволяя измерять параметры в различных её областях.

Солнечный ветер можно рассматривать как лабораторию для изучения плазменной турбулентности, где структуры на больших и средних масштабах ещё помнят своё солнечное происхождение, а мелкие, малоизученные до сих пор, структуры содержат информацию о механизмах реализующейся там нелинейной диссипации. Быстрые измерения плазменных потоков на "Спектре-Р" позволили выйти за пределы прежних измерений, изучить процессы на малых масштабах и определить структуру спектра турбулентности в диссипативной мелкомасштабной области. На рисунке показана общая форма спектра межпланетной плазменной турбулентности с коленом, отделяющим хорошо изученный "колмогоровский" интервал с наклоном $\sim 3/5$ от крутого (наклон 3,2) диссипативного участка.

Резонанс-МКА (Странник)

Параметры космического аппарата (КА):

- Апогей орбиты – 150000 км
- Масса КА – 400 кг
- Масса научной аппаратуры – 67 кг

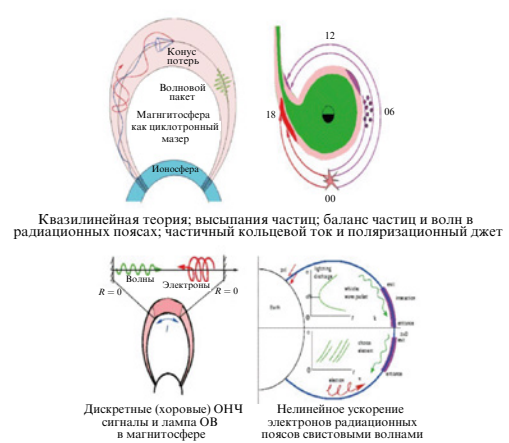
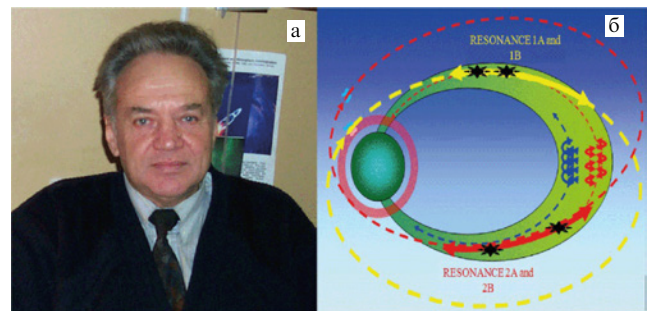
Приоритетные исследования

- детальной структуры солнечного ветра
- взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы
- методов геомагнитного прогноза по солнечному ветру

Состав:
полностью отечественный полнофункциональный приборный комплекс для измерений космической плазмы, электромагнитных полей и волн в различных областях Солнечной системы

Запуск — 2009 г.

Проект Резонанс-МКА (Странник). Слева внизу — приборы, составляющие комплекс научной аппаратуры проекта.



(а) Д.ф.-м.н. В.Ю. Трахтенгерц (1939–2007 гг.), идеолог проекта "Резонанс". (б) Схема проекта "Резонанс" — четырёхспутниковый кластер во внутренней магнитосфере. (в) Иллюстрация теории магнитосферных циклотронных мазеров.

5.1.4. Спутниковые эксперименты по изучению околоземной космической плазмы и эффектов атмосферного электричества. Надеемся к концу десятилетия продолжить эти исследования на новом высокоапогейном отечественном КА "Странник", оснащённом уже полным (~ 70 кг) комплексом научной аппаратуры.

Много лет ИКИ РАН и ИПФ РАН развивают концепцию многоспутникового кластера, но уже во внутренней магнитосфере, где доминирующую роль играют коллективные взаимодействия заряженных частиц и плазменных волн. Идеологом этой программы был Виктор Юрьевич Трахтенгерц, создавший теорию магнитосферных циклотронных мазеров, где радиационные пояса, заполненные захваченными энергичными частицами, обладающими неравновесным распределением по скоростям (благодаря наличию конуса потерь), играют роль активной среды.

Проект пока отложен, но он будет реализовываться на платформе аппарата "Странник", о котором говорилось выше. После, как мы надеемся, успешной отработки этой платформы планируется её тиражирование в четырёх экземплярах для создания спутникового кластера для проекта "Резонанс". Пока наши непосредственные ожидания связаны с ионосферной группировкой "Ионозонд", в состав которой входят 5 спутников: 4 однотипных КА "Ионосфера" предназначены для глобального мониторинга параметров ионосферной плазмы, и один КА "Зонд" (запускаемый позже) будет нацелен на мониторинг параметров солнечной активности. Спутники "Ионосфера" будут расположены попарно на солнечно-синхронных орбитах 03-15 и 09-21LT, орбита спутника "Зонд" будет расположена вблизи линии терминатора, с тем чтобы максимально увеличить видимость Солнца. Группировка создаётся для постоянного контроля космической погоды в интересах Росгидромета, являющегося основным заказчиком программы. Научные приборы космических аппаратов делаются в академических институтах и в НИИЯФ МГУ. Первые два спутника проекта "Ионосфера" успешно запущены с космодрома "Восточный" 5 ноября 2024 г.

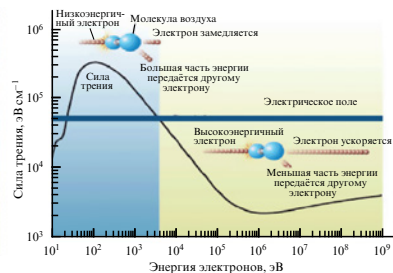
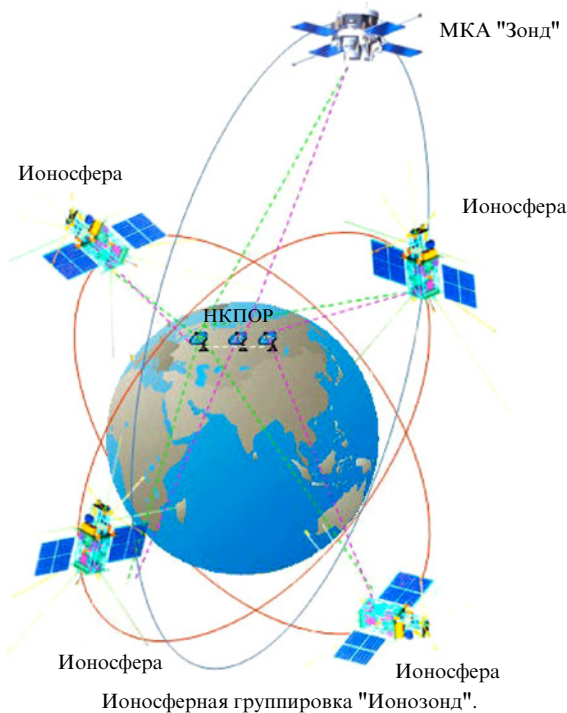
Как уже отмечалось, в МГУ существует дополнительная к Федеральной научная космическая программа,

реализуемая за счёт средств Университета. Это спутники "Татьяна 1 и 2", обсерватории "Ломоносов" и "Вернов", наноспутники.

Обе университетских "Татьяны" и академический микроспутник "Чибиc" были нацелены на исследование процессов в атмосфере, связанных с молниевыми разрядами. Безусловно, в реализации столь успешной спутниковой программы МГУ сыграла роль поддержка ректора Университета академика В.А. Садовниченко.

Первый и, к сожалению, последний академический спутник "Чибиc" был запущен с борта МКС в 2011 г. В этом случае помогла помощь тогдашнего Президента РАН академика Ю.С. Осипова, проявившего большой интерес к научным задачам проекта. Академик А.В. Гуревич (1930–2023), автор популярной модели генерации земных всплесков гамма-излучения за счёт возникновения лавины убегающих электронов, внёс существенный вклад и идеологию данного проекта.

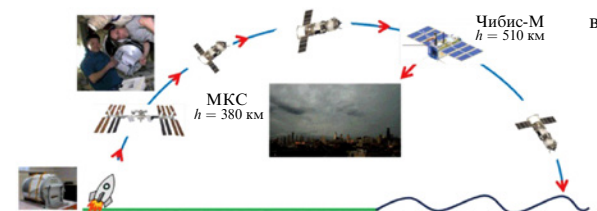
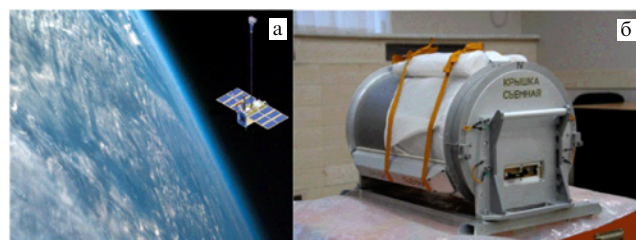
В проекте "Чибиc" участвовали коллективы из НИИЯФ МГУ, Венгерского Университета Этвёша и других организаций. Специалисты РКК "Энергия" под руководством академика В.А. Соловьёва разработали оригинальную модель запуска спутника на круговую орбиту ~ 500 км с использованием грузового корабля "Прогресс" и инфраструктуры Международной космической станции (МКС).



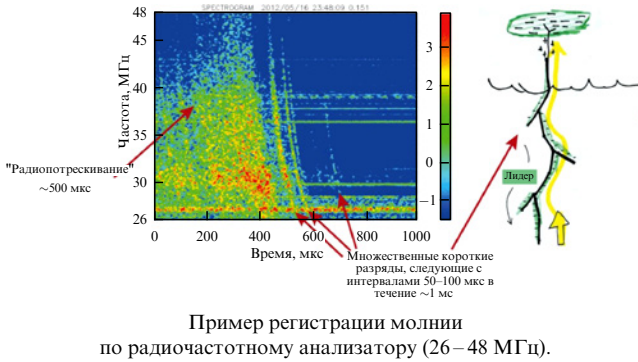
Академик РАН А.В. Гуревич. В российской школе теоретиков ФИАН во главе с академиком Александром Викторовичем Гуревичем была построена модель пробоя на убегающих электронах. Определяющую роль в модели играют электроны релятивистских энергий. Рождающаяся в ходе развития пробоя лавина убегающих электронов служит источником гамма-излучения. Движение этих электронов в электрическом поле грозы рождает мощный импульс радиоизлучения.



Спутниковые проекты МГУ.



(а) Спутник "Чибиc-M". (б) Внешний вид спутника "Чибиc-M". (в) Схема выведения на орбиту спутника "Чибиc-M".



Объекты Национального геофизического комплекса РАН.

Несмотря на малую общую массу аппарата, комплекс научной аппаратуры "Чибиса" весил целых 14 кг и микроспутник удалось оснастить полным комплектом инструментов для исследования молний в диапазонах длин волн от гамма до радио. Лучшие результаты дал радиочастотный анализатор РЧА.

На рисунке можно увидеть, как мелкие многочисленные разряды (на радиоприёмниках они слышны как потрескивания) самоорганизуются в глобальный молниевый пробой. Геометрический фактор гамма-прибора "Чибиса" оказался маловат для регулярной регистрации гамма-всплесков, и эта работа была продолжена на спутнике МГУ "Вернов", где были надёжно зарегистрированы гамма-вспышки из атмосферы и изучены их особенности. Измерения показали, что для объяснения земных гамма-всплесков необходимы ещё исследования, дополняющие модель пробоя на убегающих электронах.

5.1.5. Программа наземных исследований для изучения солнечно-земных связей. Пожалуй, главное за эти годы событие в отечественной солнечно-земной физике — создание в Сибири коллегами из ИСЗФ СО РАН Национального геофизического комплекса РАН [60]. Это многоэтапная, сложная и очень дорогая система для наземных исследований процессов, связывающих Солнце и Землю, и изучения структуры связей уже на нижнем этапе цепочки между ионосферой–атмосферой–литосферой. На рисунке показана географическая карта размещения обсерваторий комплекса.

Сейчас уже введены в строй солнечный телескоп-коронограф и комплекс оптических инструментов. В самое

последнее время начал работу солнечный многочастотный радиогелиограф. На втором этапе планируется введение в строй нагревного стенда и лидара.

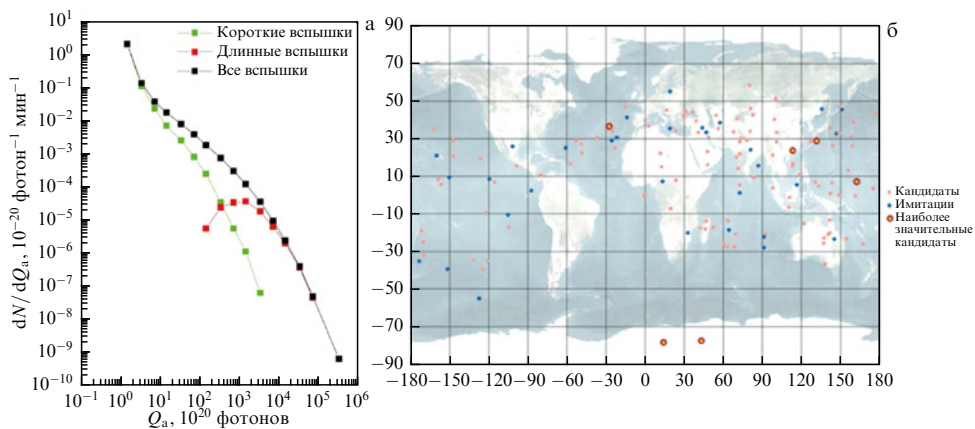
Радиогелиограф, функционирующий с 2023 г., представляет собой систему антенн диаметром 3, 1,8, 1 м, работающих на частотах от 3 до 24 ГГц. Достигается пространственное разрешение до 5 угл. с, временное — до 10 мс. Сибирский радиогелиограф — первый в мире солнечный радиотелескоп, позволяющий получать спектры микроволнового излучения Солнца в каждой точке солнечного диска. В мире не существует микроволновых радиотелескопов апертурного синтеза, состоящих из такого количества элементов.

На рисунке показан один из примеров работы радиогелиографа. Прибор даёт возможность изучать корональные магнитные поля, на рисунке видна активная область Солнца в диапазонах 3–6 и 6–12 ГГц. Удалось оценить величину магнитных полей в переходной зоне между хромосферой и короной от 1500 до 1300 Гс [61, 62].

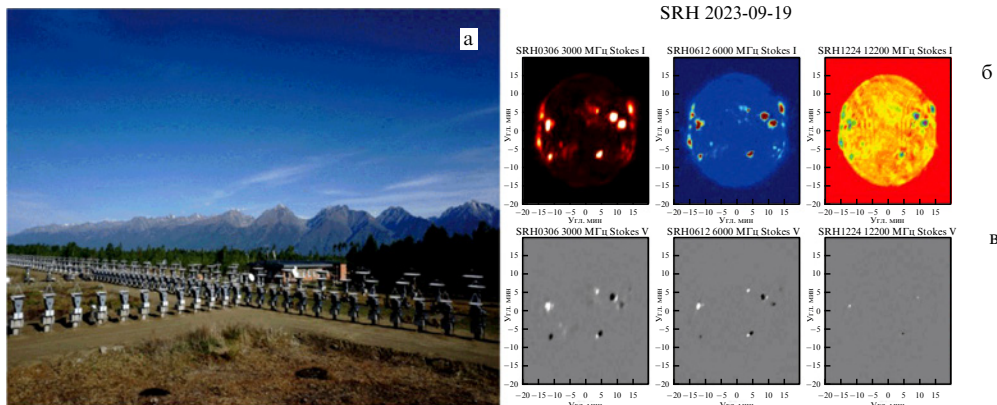
6. Исследование планет Солнечной системы и Луны

6.1. Меркурий

Переходя к достижениям в исследованиях планет, будем двигаться в направлении от Солнца. Европейско-японский проект "БегиКоломбо" начинает сейчас работу



Результаты, полученные по данным спутника "Вернов". (а) Распределение УФ-транзиевтов по энергиям. (б) Карта географического распределения кандидатов в TGF (гамма-всплеск из атмосферы Земли).



(а) Общий вид Сибирского радиогелиографа. (б, в) Изображения Солнца, полученные Сибирским радиогелиографом на 3,0, 6,0 и 12,2 ГГц: (б) интенсивность; (в) круговая поляризация.

вблизи Меркурия. Миссия "БеппиКоломбо" включает два аппарата: европейский МРО (Mercury Planetary Orbiter), основная цель которого состоит в изучении самого Меркурия, и японский Mio (ранее ММО, Mercury Magnetospheric Orbiter), нацеленный на исследования магнитосферы планеты. Во время перелёта аппараты соединены в один комплекс с помощью меркурианского перелётного модуля МТМ. Странное название проекта — это просто имя итальянского баллистика (Джузеппе Коломбо, 1920 – 1984 гг.), сконструировавшего сложную, но экономичную схему перелёта к Меркурию с использованием гравитационных манёвров у Земли и Венеры. Перелёт по такой схеме занимает всего 7 лет. За это время блок аппаратов должен совершить девять гравитационных манёвров: вокруг Земли, дважды вокруг Венеры и шесть раз вокруг Меркурия. Ожидается, что выход на околомеркурианскую орбиту произойдёт в конце 2025 г.

На обоих аппаратах миссии — планетном и магнитосферном — установлено несколько российских (либо созданных с российским участием) приборов, а именно:

- Меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр (Mercury Gamma-ray and Neutron Spectrometer, MGNS),

предназначенный для изучения элементного состава вещества поверхности Меркурия. Прибор разработан в ИКИ РАН.

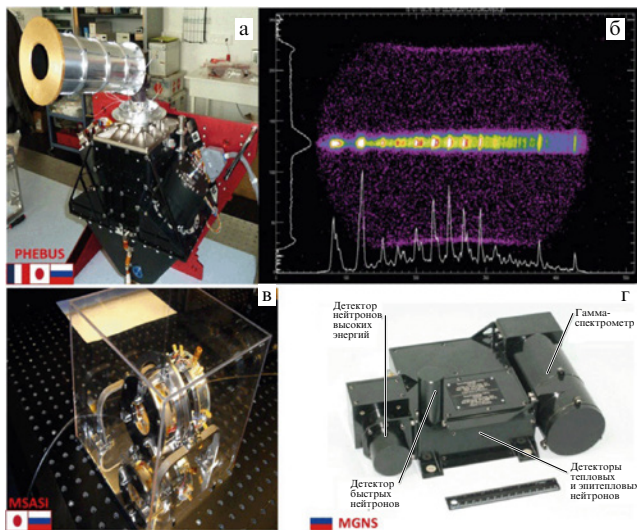
- Ультрафиолетовый спектрометр для исследования состава и динамики экзосферы Меркурия (Probing of Hermean Exosphere By Ultraviolet Spectroscopy, PHEBUS). Здесь главным разработчиком является Национальный центр космических исследований Франции (Centre National d'Etudes Spatiales, CNES), российское участие заключается в разработке входного оптического блока с системой наведения прибора в заданном направлении.

- Камера наблюдения в лучах натрия для определения причин появления натрия в экзосфере Меркурия (Mercury Sodium Atmospheric Spectral Imager, MSASI) разработана в кооперации России и Японии. Российский вклад — блок оптико-механической развёртки для получения изображения — является разработкой ИКИ РАН.

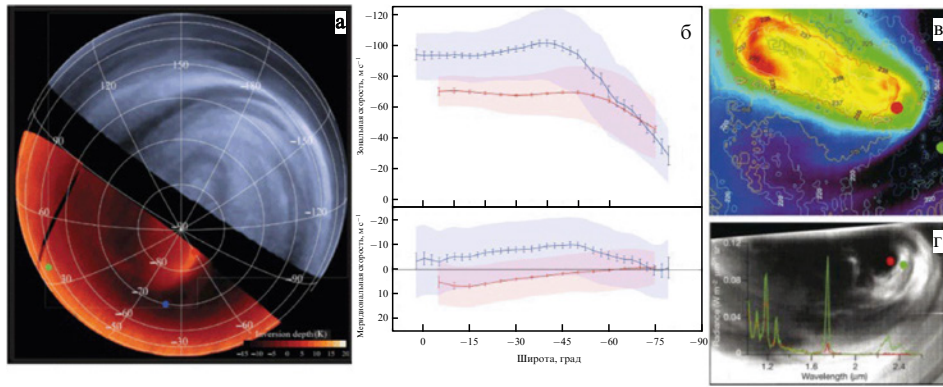
- Панорамный энерго-масс-спектрометр положительно заряженных ионов (Planetary Ion CAMera, PICAM), входящий в состав плазменного комплекса SERENA (Search for Exospheric Refilling and Emitted Natural Abundances). Плазменный комплекс SERENA — совместная разработка учёных Австрии, Франции и России. Вклад российской стороны (ИКИ РАН) — разработка электронно-оптической схемы.

6.2. Венера

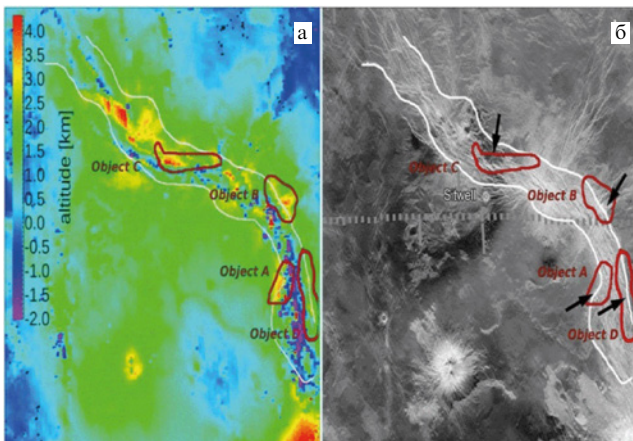
После великой эпохи советских экспедиций к Венере 1970–1980 гг., впервые после 20-летнего перерыва, российские эксперименты проводились у Венеры в 2006 г. на борту европейской миссии "Венера-Экспресс" (Venus EXpress, VEX). Вообще, как будет видно и дальше, теснейшее сотрудничество с Европейским космическим агентством (ЕКА) по всем научным направлениям существенно помогло российским учёным пережить эпоху безвременья и отсутствие собственных космических проектов. На КА "Венера-Экспресс" стояло два совместных российско-французских спектрометра: планетный фурье-спектрометр PFS и ультрафиолетовый и инфракрасный атмосферный спектрометр — SPICAV/SOIR. В трёх экспериментах: VIRTIS, VMC, ASPERA — российские учёные принимали участие как соисследователи. Исследовалась загадочная быстрая суперротация атмосферы, в то время как сама планета вращается крайне медленно. Большой интерес вызвал и вулканизм, который на Венере заменяет земную тектонику плит.



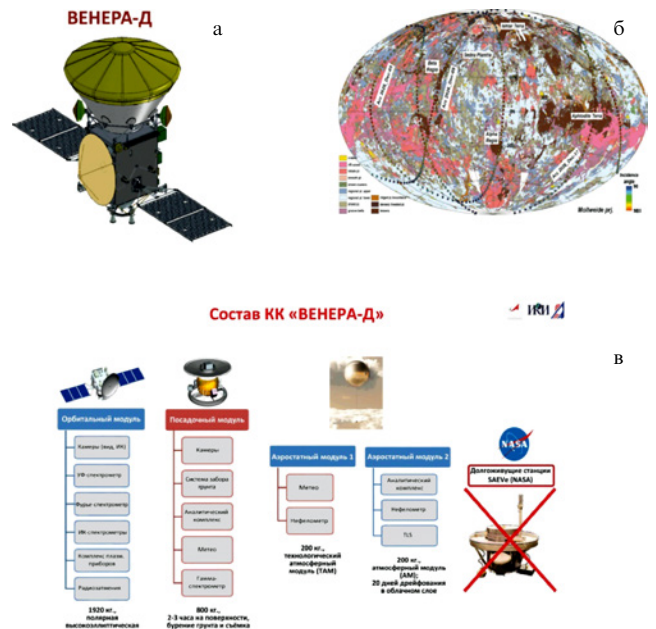
Приборы, установленные на аппарате миссии "БеппиКоломбо". (а, б) Ультрафиолетовый спектрометр PHEBUS и калибровочный спектр. (в) Камера MSASI. (г) Меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр MGNS.



(а) Оранжевыми тонами показана карта дифференциальных температур вершин венерианских облаков, полученная с помощью спектрометра VIRTIS, расположенного с ночной стороны планеты; в серых тонах — УФ-изображение дневной стороны Венеры, одновременно полученное камерой VMC. УФ-диапазон даёт информацию о структуре облаков и динамические условия в атмосфере, ИК — о температуре и высоте вершечек облаков. (б) Средние (вверху) зональные и (внизу) меридиональные профили скорости ветра, полученные по УФ (синий) и ИК (красный) изображениям за весь период наблюдений. (в) Температурные изменения полярного вихря и холодного воронки в диапазоне 5,05 мкм на высотах ~ 60 км. Самая тёплая область соответствует эллипсу полярного вихря, $T = 250$ К — красная область на дневной стороне Венеры. Самая холодная область (тёмная) соответствует холодному кольцу-воронки. (г) Структура вихря в длине волны 2,3 мкм (20–30 км над поверхностью) [63–66].



Обнаружение вулканизма на Венере. (а) Карта высот (каньон Ганис, 18° с.ш., 189° в.д.), полученная камерой VMC, (б) изображение этого района, полученное радаром бокового обзора КА "Магеллан" [67].



(а) Облик КА Венера-Д. (б) Выбор места посадки. (в) Состав космического комплекса "Венера-Д" на текущий момент.

Сотрудник ИКИ РАН Д.В. Титов был одним из организаторов инициативной группы, предложившей проект "Венера-Экспресс". Также российские учёные и специалисты с самых ранних стадий участвовали в подготовке и формировании как проекта в целом, так и научных экспериментов. Миссия была завершена в 2014 г.

Вообще возврат к Венере очень символичен. Как считал основатель российской ИК планетологии Василий Иванович Мороз (1931–2004 гг.) — 10 мягких посадок на поверхность Венеры, осуществлённых в 1970–1980 гг., позволяют говорить о Венере как о русской (точнее — советской) планете. Сейчас, в последние 7–8 лет, Венера вышла на авансцену планетных исследований — найдены следы примитивной микробной жизни в облаках, а некоторые смельчаки, несмотря на экстремальные значения существующих там давления (90 атм.) и температуры (~ 500 °С), говорят и о возможной жизни на поверхности [68]. Все эти экстремальные параметры — результат климатической неустойчивости атмосферы Венеры, возникшей благодаря предельно раскачавшемуся там парниковому эффекту. Это тоже немаловаж-

ный фактор постоянно растущего интереса к Венере — поиск понимания того, как можно избежать подобной катастрофы на Земле.

Центральным планетным проектом в новой Федеральной космической программе России является комплексная экспедиция к Венере — "Венера-Д", запланированная на 2031 г. Экспедиция включает орбитальный модуль, атмосферные аэростаты, а главное — наполненную современной аппаратурой посадочную станцию. В рамках миссии запланированы дистанционные измерения с орбиты с помощью приборов, установленных на орбитальном аппарате; *in situ* измерения приборами на посадочном модуле во время спуска в атмосфере и после посадки на поверхность; прямые измерения в облачном слое с помощью двух аэростатов, плавающих на высоте 54 и 56 км.

Первоначально (до 2021 г.) миссия разрабатывалась как российско-американская, планировался сброс автономных долгоживущих метеорологических станций, создаваемых НАСА.

6.3. Марс

С Марсом всё складывается сложнее. Отечественные экспедиции к Марсу в 1996 и 2011 гг. потерпели довольно нелепые аварии ещё на околоземных орбитах. И здесь снова нам пришлось на помощь международное сотрудничество с европейскими и американскими программами. "Марс-Одиссей", "Марс-Экспресс", "Спирит", "Опортуни" (марсианские лёгкие роверы), "Кьюриосити" (знаменитый тяжёлый марсоход).

Европейский аппарат "Марс-Экспресс", выведенный на околоземную орбиту российской системой "Союз-Фрегат", начал свою работу по научной программе в 2004 г. и успешно продолжает вплоть до сегодняшнего дня.

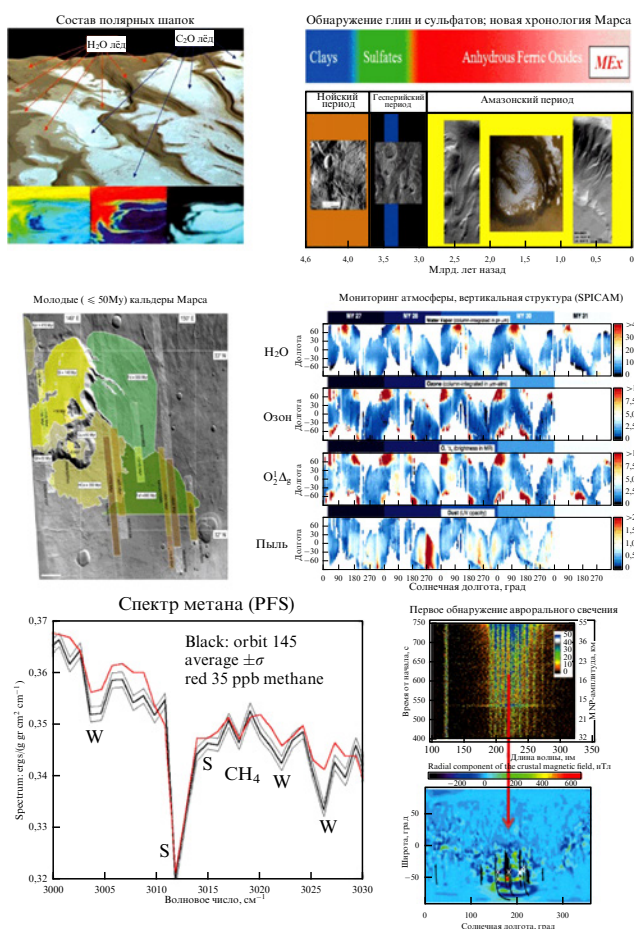
Космический аппарат имеет на борту 3 прибора, созданных с участием России: Спектрометр минералогического картирования в видимом и инфракрасном диапазоне OMEGA, Планетарный фурье-спектрометр PFS и Ультрафиолетовый и инфракрасный атмосферный спектрометр SPICAM. Эти приборы предназначены для исследования атмосферы и наблюдений марсианских полярных шапок, содержащих пласты водяного льда, закрываемых в зависимости от сезона одеялами замёрзшей углекислоты. Обнаружение глин и сульфатов позволило

заглянуть в древнюю хронологию Марса, характеризующую обилием жидкой воды.

Конечно, пиком и, возможно, лебединой песней нашего сотрудничества с ЕКА стала программа "ЭкзоМарс", разделённая на два этапа: 1) орбитальный аппарат TGO (Trace Gas Orbiter), который был предназначен для мониторинга малых газовых составляющих атмосферы, и 2) российскую посадочную платформу с европейским ровером. Первый этап был реализован в 2016 г., срок запуска второго, к сожалению, сдвинулся из-за пандемии и планировался на 2022 год.

"ЭкзоМарс" представлял собой уже подлинно совместную миссию — российские "Протоны" должны были обеспечивать выведение космических аппаратов на околоземные орбиты, перелётный модуль к Марсу создавался в Европе. Научная программа делилась примерно поровну между партнёрами. Так, на TGO стоит по два российских и европейских прибора. Один из российских инструментов — комплекс ACS (Atmospheric Chemistry Suite) для детального исследования состава атмосферы (руководитель чл.-корр. РАН О.И. Корablёв), второй — нейтронный спектрометр FREND (Fine Resolution Epithermal Neutrons Detector) для исследования распределения подповерхностной воды (руководитель д.ф.-м.н. И.Г. Митрофанов).

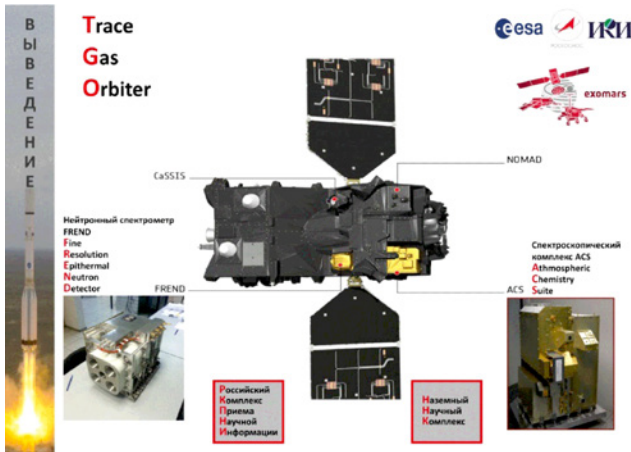
Главная загадка, благодаря которой вообще состоялась эта миссия, — присутствие (или отсутствие) на Марсе атмосферного метана — пусть даже в очень малых количествах. Появление метана естественно связывается с процессами гниения органики, т.е. какими-то выделениями гипотетических микроорганизмов. Таким образом, давнишний сакраментальный вопрос "Есть ли жизнь на Марсе?" стал драйвером этого проекта. Прибор ACS имеет очень высокое спектральное разрешение (~ 50000), высокое отношение сигнал/шум и поэтому убедительно, к разочарованию многих, метана на Марсе не нашёл, однако почти разгадал загадку его появления и исчезновения — измерения ACS обнаружили наличие в атмосфере молекул хлороводорода HCl (скорее всего, вулканического происхождения), который может эффективно разрушать метан, уменьшая время его жизни от нескольких лет до нескольких дней. Надежда найти на Марсе следы хотя бы примитивной жизни, таким образом, ещё не умерла.



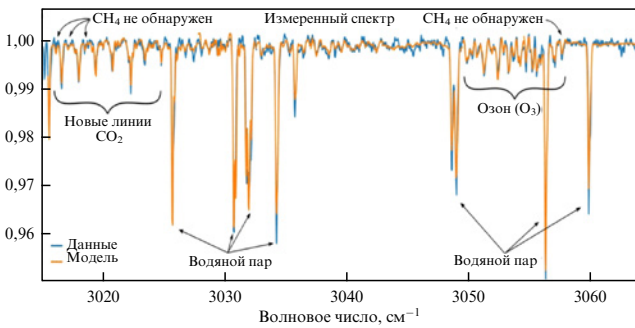
Некоторые результаты, полученные "Марс-Экспресс" [69–74].



Программа "ЭкзоМарс".



Орбитальный аппарат Trace Gas Orbiter. Показаны российские элементы миссии.



Вместо метана открыта новая дипольная полоса CO₂ и не наблюдавшаяся ранее на Марсе полоса озона [75, 76].

6.4. Исследования планет и Луны методами ядерной планетологии

Большой вклад в исследование Марса и Луны внесли специалисты отдела ядерной планетологии ИКИ РАН (зав. отделом д.ф.-м.н. И.Г. Митрофанов, зав. лабораторией д.ф.-м.н. М.Л. Литвак). На рисунке красным показаны эксперименты, и сейчас работающие у Меркурия, Луны и Марса, жёлтым — эксперименты для перспективных проектов, серым — эксперименты на погибших космических аппаратах.

На рисунке ниже показаны результаты нейтронного картирования Марса сначала с низким разрешением прибором "ХЕНД" (с 2001 г.), затем с высоким (бла-

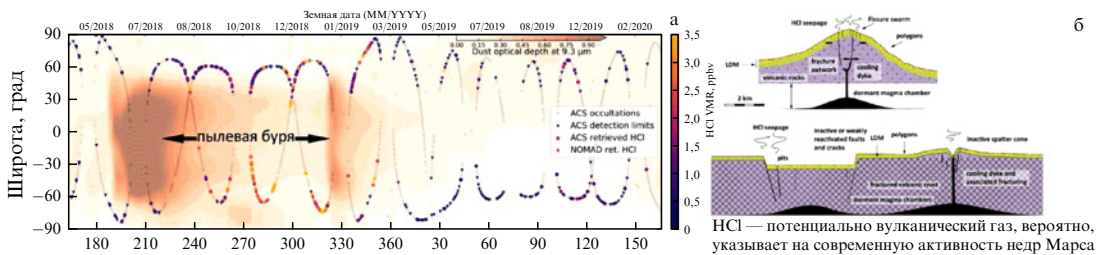


Эксперименты Отдела ядерной планетологии ИКИ РАН.

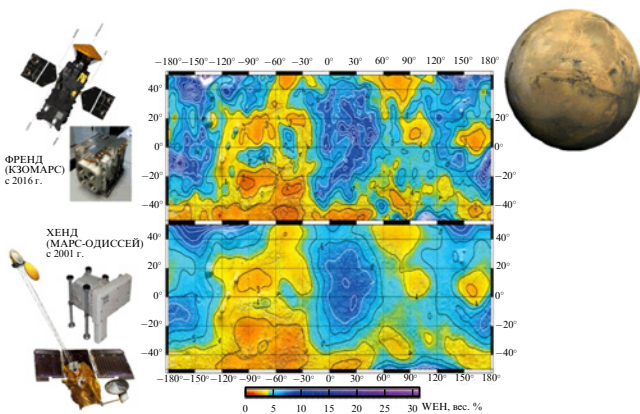
годаря коллиматору) разрешением прибором "ФРЕНД" на КА "ЭкзоМарс" (с 2016 г.). Измеряется поток и энергетический спектр нейтронов от поверхности Марса. По этим данным можно восстановить содержание водорода на поверхности и в грунте планеты на глубине до 1 м. Зная концентрацию водорода, можно предположить, сколько воды могло бы там находиться, если бы весь обнаруженный водород принадлежал именно молекулам воды (H₂O).

Ниже представлена одна из последних карт распределения водяного льда под поверхностью Марса. На картах можно увидеть как обширные "засушливые" районы, так и своеобразные "оазисы" с высоким содержанием водорода в грунте. То, что много льда находится в полярных шапках, было ясно и раньше — но на "Френдe" удалось найти множество таких "синих" областей на средних и низких широтах, где температура и давление атмосферы не благоприятствуют сохранению воды.

Для выяснения природы этих областей требуются исследования уже непосредственно на поверхности планеты, и такая работа ведётся уже более 10 лет на марсианском ровере "Кьюриосити" (НАСА), где также имеется российский прибор ДАН (Динамическое Альбедо Нейтронов) с активным генератором нейтронов, изготовленным в ВНИИА им. Н.Л. Духова Госкорпорации "Росатом". Руководит этими работами профессор М.Л. Литвак (ИКИ РАН). Прибор начал работу на поверхности Марса 7 августа 2012 г. За 10 лет работы (до августа 2022 г.) было проведено почти 1500 сеансов нейтронного зондирования марсианской поверхности, или около 3 сеансов в неделю. На рисунке мы видим траекторию ровера на дне марсианского кратера Гейл и ре-



Орбитальным аппаратом TGO на Марсе обнаружен хлороводород (HCl), измерено соотношение ³⁷HCl/³⁵HCl. (а) Хлороводород на Марсе в течение марсианского года по данным спектрометрического комплекса ACS. По горизонтали указано положение Марса на орбите (солнечная долгота), которое соответствует сезону; по вертикали — широта. Кружками обозначены результаты ACS, ромбами — NOMAD (Бельгия). Цвет кружков и ромбов соответствует количеству HCl в атмосфере (шкала справа, ppbv). Градациями коричневого цвета показана интенсивность глобальной пылевой бури. (б) Возможный механизм поступления хлороводорода в атмосферу [77 – 79].

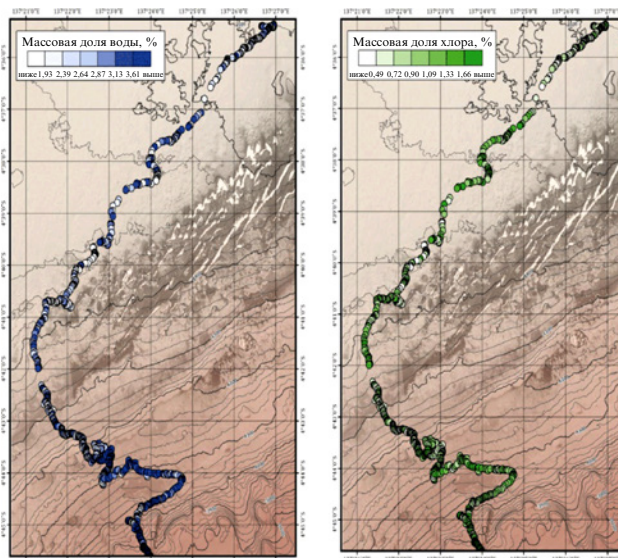


Нейтронное картографирование воды на Марсе. Сравнение карт значений водяного эквивалента водорода (WEN) по данным ФРЕНД (вверху) и ХЕНД (внизу) [80]. Чёрные и белые изолинии показывают районы с определёнными значениями WEN (в массовых процентах, wt). Оттенками серого показан рельеф по данным лазерного альтиметра MOLA (Mars Global Surveyor, NASA).

зультаты сопутствующих измерений водяного льда и хлора. Эксперимент проводится с целью измерения содержания воды в приповерхностном слое грунта на дне марсианского кратера Гейл.

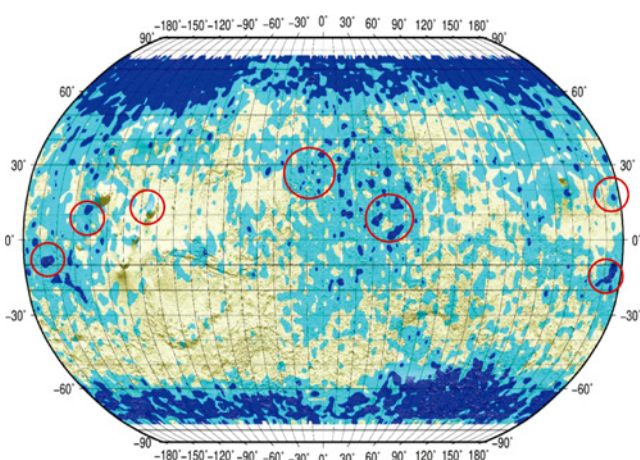
В эксперименте ДАН установлено, что грунт дна кратера имеет переменную солёность и концентрацию грунтовой воды от 2 до 6%. Высокое содержание воды наблюдается именно там, где было обнаружено присутствие гидратированных минералов, сформировавшихся в раннюю эпоху истории Марса, когда кратер был заполнен водой. Также установлено, что вещество грунта содержит значительную долю хлора, до 2,5% по массе, что подтверждает гипотезу о том, что в эпоху раннего Марса кратер Гейл заполняло древнее озеро. Эти данные позволяют определить характер процессов, протекавших в различные эпохи эволюции планеты.

Сходный российский прибор LEND (Lunar Exploration Neutron Detector), также оснащённый коллиматором для увеличения пространственного разрешения, с 2009 г.

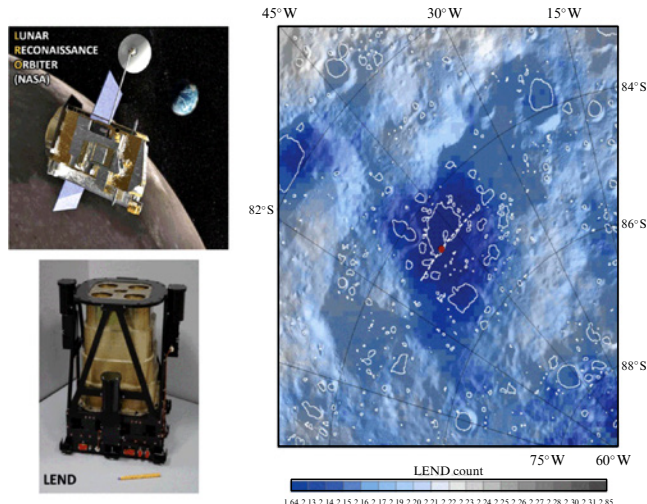


Измерение содержания воды и хлора в грунте Марса на борту марсохода НАСА "Кьюриосити" с помощью российского прибора ДАН во время сеансов нейтронного зондирования марсианской поверхности за 10 лет измерений [81, 82].

работает на окололунной орбите на аппарате НАСА LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter), проводящем исследования Луны с орбиты её искусственного спутника. Прибор регистрирует поток вторичных нейтронов, исходящий от поверхности Луны (так называемое нейтронное альbedo). Эти нейтроны рождаются в приповерхностном слое грунта толщиной 1–2 м в ходе взаимодействий с космическими лучами и при распаде естественных радиоактивных элементов. По пути к поверхности они замедляются и поглощаются ядрами основных породообразующих элементов. Таким образом, выходящий из грунта поток нейтронов зависит от состава вещества, и в первую очередь — от присутствия водорода или водородосодержащих соединений. На основе измерений распространённости водорода в грунте можно судить о наличии водяного льда или связанной воды в



Карта содержания воды на Марсе (значения водяного эквивалента водорода — WEN), построенная по данным нейтронного спектрометра FRENDA (TGO). Красными кружками отмечены области с повышенным содержанием воды, расположенные на умеренных широтах. Бежевый цвет — WEN < 5% wt, голубой цвет — WEN 5–15% wt, синий цвет — WEN > 15% wt.



Карта распределения воды в приполярной области Луны по данным российского прибора LEND (слева внизу), установленного на борту миссии LRO (НАСА). Кратер Кабеус содержит до 5% водяного льда.

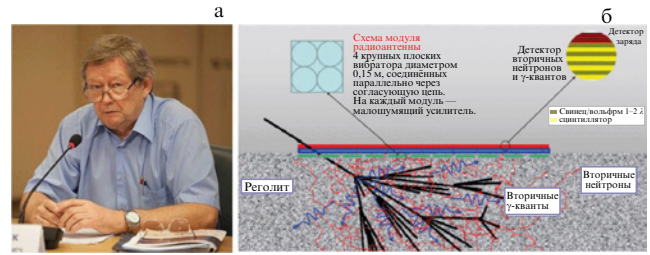
составе минералов. Воды на полярной Луне оказалось неожиданно много [83]. В кратере Кабеус грунт под поверхностью содержит почти 5 % водяного льда.

6.5. Российская Лунная программа и научное освоение Луны

Упомянутые выше исследования стали чрезвычайно важными для разработки отечественной программы лунных исследований, которая оказалась в тупике в середине нулевых годов. Новая "мокрая" полярная Луна стала наиболее привлекательной целью для дальнейших исследований и последующего освоения. Мы сказали об этом первыми ещё в 2011 г. и надеялись быть первыми, кто достигнет поверхности Луны в 2023 г., но не получилось. Из-за ошибки управления российская экспедиция "Луна-25" разбилась при переходе на посадочную орбиту, и первой в южной полярной области Луны совершила посадку индийская миссия "Чандраян-3", аппарат которой мягко "прилунился" в том же районе. Затем началась массивная научная "атака" на южный полюс Луны. Вслед за индийским туда сели японский и американский аппараты, готовится полёт американских астронавтов, где всё организовано очень политкорректно — из четырёх человек, одна женщина, один афроамериканец.

Тем не менее российская Лунная программа продолжается, и в текущем десятилетии мы надеемся успеть организовать ещё по крайней мере 3 экспедиции: орбитальную "Луну-26", две посадочные "Луна-27А и 27В" и посадочную-возвратную "Луну-28", задачей которой станет доставка образцов грунта и содержащихся в них летучих веществ на Землю.

Но полёты на Луну — не самоцель. В перспективе освоение Луны должно стать основой для развития наук о Луне и наук, использующих Луну как полигон для изучения дальнего космоса. Прекрасную программу исследования астрочастиц — галактических космических лучей (тех самых, которые представляют особую радиационную опасность для дальних пилотируемых полётов) предложил НИИЯФ МГУ. Установка "Нейтроний" нацелена на регистрацию электромагнитных излучений, возникающих при взаимодействии космических лучей высоких и сверхвысоких энергий с веществом Луны. Большую роль в разработке этого проекта сыграл ныне ушедший из жизни директор НИИЯФ МГУ, председа-



(а) Д.ф.-м.н. М.И. Панасюк, (б) схема возможного лунного эксперимента.

тель одного из научных советов ОФН РАН, д.ф.-м.н. М.И. Панасюк (1945–2020).

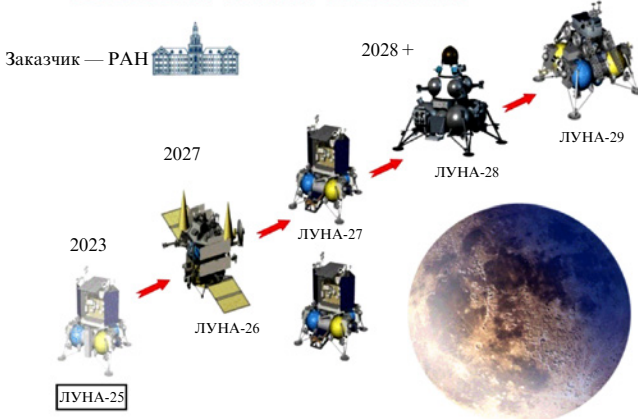
Луна, и в особенности её обратная сторона, удалённая от многочисленных естественных и искусственных радиоизлучений Земли, предоставляет и прекрасные возможности для развития радиоастрономии.

На рисунке показан проект лунного радиотелескопа, совместно разрабатываемого специалистами АКЦ ФИАН и КНР. Эти работы в перспективе продолжат и дополняют исследования Миллиметрона, о которых говорилось в разделе 3.3.

7. Заключение

Подводя итог всему вышеизложенному, отметим, что за прошедший 25-летний период сотрудниками академического сектора науки был выполнен огромный объём научных исследований, есть значимые и признанные международным научным сообществом достижения. Несмотря на финансовые и организационные трудности (например, приснопамятная реформа РАН 2013 г.), астрономические науки и космические исследования продолжают развиваться и в России. Конечно, специалисты, работающие в этих областях, ожидают большего внимания правительства к астрономии и научному космосу и неоднократно заявляют о необходимости

РОССИЙСКАЯ ЛУННАЯ ПРОГРАММА



Российская лунная программа.



Проект лунного радиотелескопа.

увеличения финансирования проводимых нами исследований. Тем не менее научная жизнь идёт вперед: ежегодно в нашей стране проводятся десятки конференций по разным направлениям астрономии, ну и, конечно, очень важно то, что начиная с 2001 г. с периодичностью раз в 3 года проводится наша основная национальная Всероссийская астрономическая конференция (ВАК), собирающая астрономов всей нашей страны и охватывающая практически все направления астрономических исследований. Восьмая по счёту из них (ВАК-2024) прошла совсем недавно в Специальной астрофизической обсерватории РАН. Можно отметить и наиболее масштабные международные мероприятия. В 2000 и в 2011 гг. в России проходили Объединённые съезды европейского и национальных астрономических обществ (Joint European and National Astronomical Meeting, JENAM), первый (JENAM-2000 в Москве) собрал огромное число (около 1000) участников, второй (JENAM-2011 в Санкт-Петербурге) был не столь многочисленным, но также весьма представительным. Крупнейшим и очень важным событием, несомненно, стала прошедшая в Москве в 2014 г. 40-я научная ассамблея Международного комитета по космическим исследованиям (COSPAR-2014). Несмотря на долгую историю этих ассамблей, в России – СССР она проходила всего второй раз, число участников мероприятия превысило 3000 человек.

Науки о космосе всегда вызывали интерес не только у профессионалов, но и у широкой общественности. Например, только число участников фестиваля любителей астрономии "Астрофест", который ежегодно начиная с 1999 г. проводится в нашей стране, — порядка 1000 человек, а круг тех, кому просто интересно узнать, что находится за пределами нашей Земли, намного шире. Науки о космосе оказывают большое влияние на мировоззрение в целом, поэтому важной миссией для наших учёных-астрономов является популяризация научных знаний и донесение их до широких масс. И в этом направлении также ведётся большая работа. Много мероприятий было проведено в рамках Международного года астрономии в 2009 г. В 2011 г. после многолетнего перерыва вновь заработал обновлённый Московский планетарий, многие наши учёные, в том числе члены нашего отделения, принимают самое активное участие в его работе. С 2008 г. проводятся школы лекторов планетариев, с 2007 г. — конференции школьников "Зов Вселенной", Международные молодёжные Циолковские чтения и др. Члены нашего отделения и сотрудники институтов ОФН РАН активно участвуют в таких мероприятиях в качестве организаторов либо лекторов. Вот уже 25 лет ежегодно 12 апреля и 4 октября ИКИ РАН проводит дни открытых дверей для любознательных школьников и студентов, очень популярные среди московской молодёжи. В САО РАН создан свой планетарий, а на экскурсиях в обсерватории ежегодно бывают десятки тысяч человек. Многочисленные экскурсии проводятся в Пулковской обсерватории. В других обсерваториях и институтах также достаточно активно проводятся экскурсии, читаются лекции и пр. Необходимо упомянуть и издаваемый в настоящее время под руководством президиума РАН научно-популярный журнал "Земля и Вселенная" (гл. редактор — академик Л.М. Зелёный). Следует отметить, что здесь мы ограничили только в значительной мере ориентированными на космические науки мероприятиями и пр., не затраги-

вая события более широкого профиля, также включающие тематику астрономии и космоса.

Конечно, в данном обзоре мы не могли упомянуть всех, кто своим трудом внёс достойный вклад в развитие нашей астрономии, и охватить все полученные важные научные результаты, — это лишь выборка, которая, как мы надеемся, позволит составить общее представление о масштабе астрономических исследований нового тысячелетия в нашей стране.

Авторы выражают благодарность Б.М. Шустову, Ю.Ю. Балеге, М.Е. Сачкову, Д.В. Бисикало, А.А. Лутовинову, С.А. Гребеневу, Р.А. Сюняеву, А.М. Быкову, Г.Г. Валавину, Ю.Ю. Ковалёву, С.Ф. Лихачёву, Н.Р. Ихсанову, В.В. Калегасеву, К.А. Постнову, А.В. Ипатову, О.И. Кораблёву, И.Г. Митрофанову, В.Д. Кузнецову, А.А. Петруковичу, М.М. Могилевскому, М.В. Веселову, А.В. Медведеву, В.В. Кочаровскому, А.Г. Демехову, В.С. Бескину, Д.З. Вибе, А.Н. Ростопчиной-Шаховской, А.В. Наумову за полезные консультации и предоставленные материалы.

Список литературы

1. Lyskova N et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **525** 898 (2023)
2. Варшалавич Д А, Москалев А Н, Херсонский В К *Квантовая теория углового момента* (Л.: Наука, Ленинградское отд-ние, 1975)
3. Альперт Я Л, Гуревич А В, Питаевский Л П *Искусственные спутники в разреженной плазме* (М.: Наука, 1964); Пер. на англ. яз.: Al'pert Ya L, Gurevich A V, Pitaevskii L P *Space Physics with Artificial Satellites* (New York: Consultants Bureau, 1965)
4. Бисикало Д В, Жилкин А Г, Боярчук А А *Газодинамика тесных двойных звезд* (М.: Физматлит, 2013)
5. Железняков В В *Радиоизлучение Солнца и планет* (М.: Наука, 1964); Пер. на англ. яз.: Zheleznyakov V V *Radio Emission of the Sun and Planets* (Oxford: Pergamon Press, 1969)
6. Железняков В В, Шапошников В Е *Письма в Астрон. журн.* **48** 720 (2022); Zheleznyakov V V, Shaposhnikov V E *Astron. Lett.* **48** 601 (2022)
7. Karachentsev I D, Telikova K N *Astron. Nachr.* **339** 615 (2018)
8. Men'shikov A V et al. *New Astron.* **3** 601 (1998)
9. Kraus S et al. *Astron. Astrophys.* **466** 649 (2007)
10. Semenko E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **515** 998 (2022)
11. Куценко А С и др. *Изв. Крымской астрофиз. обсерватории* **118** (1) 5 (2022) <https://doi.org/10.31059/izcrao-vol118-iss1-pp5-11>
12. Куценко А С и др., в сб. *Солнечная и солнечно-земная физика — 2023. XXVII Всероссийская ежегодная конф. по физике Солнца, Санкт-Петербург, Пулково, 9–13 октября 2023. Труды* (Отв. ред. А В Степанов, Ю А Наговицын) (СПб.: Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2023) с. 203
13. Volvach L N et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett.* **482** L90 (2019)
14. Вольвач Л Н и др. *Астрон. журн.* **96** 51 (2019); Vol'vach L N et al. *Astron. Rep.* **63** 49 (2019)
15. Cherepashchuk A et al. *New Astron.* **103** 102060 (2023)
16. Shakura N I, Sunyaev R A *Astron. Astrophys.* **24** 337 (1973)
17. Ikhsanov N R *Astron. Astrophys.* **338** 521 (1998)
18. Ихсанов Н Р, Бескровная Н Г *Астрон. журн.* **89** 659 (2012); Ikhsanov N R, Beskrovnaia N G *Astron. Rep.* **56** 595 (2012)
19. Бескровная Н Г, Ихсанов Н Р *Астрофиз. бюлл.* **79** 106 (2024); Beskrovnaia N G, Ikhsanov N R *Astrophys. Bull.* **79** 104 (2024)
20. Бобылев В В, Байкова А Т *Письма в Астрон. журн.* **48** 492 (2022); Bobylev V V, Bajkova A T *Astron. Lett.* **48** 376 (2022)
21. Бобылев В В, Байкова А Т, Мишуров Ю Н *Письма в Астрон. журн.* **48** 553 (2022); Bobylev V V, Bajkova A T, Mishurov Yu N *Astron. Lett.* **48** 434 (2022)
22. Бобылев В В, Байкова А Т, Мишуров Ю Н *Астрофизика* **65** 603 (2022); Bobylev V V, Bajkova A T, Mishurov Yu N *Astrophysics* **65** 579 (2022)
23. Маршалов Д А и др. *Приборы и техника эксперимента* (4) 111 (2018); Marshalov D A et al. *Instrum. Exp. Tech.* **61** 577 (2018)

24. Шустов Б М, Рыхлова Л В (Ред.) *Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра* (М.: Физматлит, 2010)
25. Борисов Г В, Шустов Б М *Астрон. вест.* **55** 144 (2021); Borisov G V, Shustov B M *Solar Syst. Res.* **55** 124 (2021)
26. Busarev V V et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **502** 1882 (2021)
27. Бисикало Д В и др. *Газовые оболочки экзопланет — горячих юпитеров* (М.: Наука, 2020)
28. Galazutdinov G A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett.* **526** L111 (2023)
29. Яковлев О Я и др. *Астрофизический бюлл.* **78** 85 (2023); Yakovlev O Ya et al. *Astrophys. Bull.* **78** 79 (2023)
30. Shematovich V I, Shustov B M, Wiebe D S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **292** 601 (1997)
31. Li Z-Y et al. *Astrophys. J.* **569** 792 (2002)
32. Бескин В С, Крауз В И, Ламзин С А УФН **193** 345 (2023); Beskin V S, Krauz V I, Lamzin S A *Phys. Usp.* **66** 327 (2023)
33. Winkler C et al. *Astron. Astrophys.* **411** L1 (2003)
34. Kuznetsova E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **509** 1605 (2022)
35. Krivonos R et al. *Astron. Astrophys.* **463** 957 (2007)
36. Churazov E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **357** 1377 (2005)
37. Churazov E et al. *Nature* **512** 406 (2014)
38. Grebenev S A et al. *Nature* **490** 373 (2012)
39. Abbott B P et al. *Astrophys. J. Lett.* **848** L13 (2017)
40. Predehl P et al. *Nature* **588** 227 (2020)
41. Churazov E M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **507** 971 (2021)
42. Хорунжев Г А и др. *Письма в Астрон. журн.* **47** 155 (2021); Khorunzhev G A et al. *Astron. Lett.* **47** 123 (2021)
43. Sazonov S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **508** 3820 (2021)
44. Mereminskiy I A et al., The Astronomer's Telegram No. 16464 (2024)
45. Frederiks D et al. *Astrophys. J. Lett.* **949** L7 (2023)
46. Аптекарь Р Л и др. УФН **189** 785 (2019); Aptekar R L et al. *Phys. Usp.* **62** 739 (2019)
47. Быков А М УФН **194** 384 (2024); Bykov A M *Phys. Usp.* **67** 361 (2024)
48. Ridnaia A et al. *Nat. Astron.* **5** 372 (2021)
49. Sadovnichy V A et al. *Astrophys. J.* **861** 48 (2018)
50. Kovalev Y Y et al. *Astrophys. J. Lett.* **820** L9 (2016)
51. Попов М В et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **465** 978 (2017)
52. Новиков И Д и др. УФН **191** 404 (2021); Novikov I D et al. *Phys. Usp.* **64** 386 (2021)
53. Лихачёв С Ф, Ларченкова Т И УФН **194** 814 (2024); Likhachev S F, Larchenkova T I *Phys. Usp.* **67** 768 (2024)
54. Щербаков И А УФН **194** 1242 (2024) <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.05.039790>; Shcherbakov I A *Phys. Usp.* **67** (12) (2024) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.05.039790>
55. Kovalev Y Y, Plavin A V, Troitsky S V *Astrophys. J. Lett.* **940** L41 (2022)
56. Allakhverdyan V A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **526** 942 (2023)
57. Plavin A et al. *Astrophys. J.* **894** 101 (2020)
58. Черепашук А М (Ред.-сост.) *Многоканальная астрономия* (М.–Фрязино: Век 2, 2019)
59. Kuznetsov V (Ed.) *The Coronas-F Space Mission. Key Results for Solar Terrestrial Physics* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 400) (Berlin: Springer, 2014) <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39268-9>
60. Жеребцов Г А *Солнечно-земная физика* **6** (2) 6 (2020); Zhrebctsov G A *Solar-Terr. Phys.* **6** (2) 3 (2020)
61. Uralov A M et al. *Solar Phys.* **298** 117 (2023)
62. Sych R, Altyntsev A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **519** 4397 (2023)
63. Khatuntsev I V et al. *Icarus* **226** 140 (2013)
64. Khatuntsev I V et al. *J. Geophys. Res. Planets* **122** 2312 (2017)
65. Patsaeva M V et al. *Planet. Space Sci.* **113–114** 100 (2015)
66. Piccioni G et al. *Nature* **450** 637 (2007)
67. Shalygin E V et al. *Geophys. Res. Lett.* **42** 4762 (2015)
68. Ксанфомалити Л В и др. УФН **189** 403 (2019); Ksanfomality L V et al. *Phys. Usp.* **62** 378 (2019)
69. Bibring J-P et al. *Nature* **428** 627 (2004)
70. Bibring J-P et al. *Science* **312** 400 (2006)
71. Neukum G et al. *Nature* **432** 971 (2004)
72. Formisano V et al. *Science* **306** 1758 (2004)
73. Montmessin F et al. *Icarus* **297** 195 (2017)
74. Bertaux J-L et al. *Nature* **435** 790 (2005)
75. Trokhimovskiy A et al. *Astron. Astrophys.* **639** A142 (2020)
76. Olsen K S et al. *Astron. Astrophys.* **639** A141 (2020)
77. Korablev O et al. *Sci. Adv.* **7** eabe4386 (2021)
78. Olsen K S et al. *Astron. Astrophys.* **647** A161 (2021)
79. Taysum B M et al. *Astron. Astrophys.* **687** A191 (2024)
80. Malakhov A V et al. *J. Geophys. Res. Planets* **127** e2022JE007258 (2022)
81. Mitrofanov I G et al. *J. Geophys. Res. Planets* **127** e2022JE007327 (2022)
82. Litvak M L et al. *J. Geophys. Res. Planets* **128** e2022JE007694 (2023)
83. Sanin A B et al. *Icarus* **283** 20 (2017)

Physical Sciences Division of Russian Academy of Sciences in the 21st century: space and astrophysics research

L.M. Zelenyi^(1,a), E.Yu. Kilpio^(2,3,b)

⁽¹⁾ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation

⁽²⁾ Physical Sciences Division, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 32a, 119334 Moscow, Russian Federation

⁽³⁾ Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, pos. Nauchny, Bakhchisaraiskii region, 298409 Crimea, Russian Federation

E-mail: ^(a) lzelenyi@cosmos.ru, ^(b) lena@gp.ad.ac.ru

This paper is based on the eponymous talk delivered by Academician L M Zelenyi at the Scientific Session of the General Assembly of the Physical Sciences Division, Russian Academy of Sciences, “300th Anniversary of the Academy: Successes and Achievements of Physical Sciences in the 21st Century,” in May 2024. The information presented in the talk has been supplemented and expanded, but it is still highly challenging to describe everything that has been done over the past quarter of a century in such intricate fields as astronomy and space research and to list all the achievements and all our scientists that contributed to these achievements within a single paper. However, we hope that the selection presented here will allow the reader to formulate a general idea of the significance of many outstanding academic studies carried out in Russia during difficult times for science and to appreciate the scale of the achievements. By academic, we mean studies conducted at the institutes of the Russian Academy of Sciences, leading institutions for higher education and universities, and other institutions under the scientific and methodological guidance of the Russian Academy of Sciences.

Keywords: astronomy, astrophysics, space research

PACS numbers: **07.87.+v**, **95.55.-n**, **96.20.-n**, **96.30.-t**

Bibliography — 83 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (12) 1270–1308 (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.05.039794>

Received 10 October 2024

Physics–Uspekhi **67** (12) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.05.039794>