

ПРОДА

9 15



Главный редактор академик **А.Ф.АНДРЕЕВ**

Первый заместитель главного редактора
доктор физико-математических наук **А.В.БЯЛКО**

Заместители главного редактора:
член-корреспондент РАН **В.В.МАЛАХОВ** (биология),
доктор геолого-минералогических наук **А.А.ЯРОШЕВСКИЙ** (науки о Земле)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

О.О.Астахова (редактор отдела биологии и медицины), кандидат химических наук
Л.П.Белянова (редактор отдела экологии и химии), доктор физико-математических наук
А.Н.Васильев (физика), доктор географических наук **А.А.Величко** (география), академик РАН **А.И.Воробьев** (медицина), академик **С.С.Герштейн** (физика), академик **Г.С.Голицын** (физика атмосферы), доктор химических наук **И.С.Дмитриев** (химия), академик **Л.М.Зеленый** (космические исследования), академик **В.Т.Иванов** (биоорганическая химия), доктор биологических наук **С.Л.Киселев** (генетика), член-корреспондент РАН **М.В.Ковальчук** (физика), **Г.В.Короткевич** (редактор отдела научной информации), **Е.А.Кудряшова** (ответственный секретарь), академик **Н.П.Лаверов** (геология), доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Леин** (геохимия), доктор биологических наук **А.М.Носов** (физиология растений), академик **Л.В.Розенштраух** (физиология животных), академик **А.Ю.Румянцев** (ядерная физика), академик **В.П.Скулачев** (биохимия), кандидат физико-математических наук **К.Л.Сорокина** (редактор отдела физики и математики), кандидат исторических наук **М.Ю.Сорокина** (история науки), кандидат физико-математических наук **В.Г.Сурдин** (астрономия), **Н.В.Ульянова** (редактор отдела геологии, геофизики и геохимии), **Н.В.Успенская** (редактор отдела истории естествознания и публицистики), академик **О.Н.Фаворский** (энергетика), академик **Л.Д.Фаддеев** (математика), академик **М.А.Федонкин** (палеонтология), академик **А.Р.Хохлов** (физическая химия), академик **А.М.Черепашук** (астрономия, астрофизика), академик **Ф.Л.Черноусько** (механика), член-корреспондент РАН **В.П.Шибяев** (химия), **О.И.Шутова** (редактор отдела охраны природы)

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Сотрудничество на орбите. Американский астронавт М.Э.Лопез-Алегрия (командир МКС) помогает борт-инженеру-1 экспедиции МКС-14 М.В.Тюрину в установке на внешней поверхности служебного модуля «Звезда» Российского сегмента станции детекторного блока аппаратуры для эксперимента БТН-М1 (2007 г.). Это разработанный в ИКИ РАН прибор для регистрации потока и спектра нейтронов; два таких детектора одновременно ведут измерения с борта МКС и с орбиты искусственного спутника Марса.

Фото М.В.Тюрина, Роскосмос

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Проект ИНТЕРБОЛ. Парные аппараты «Интербол-2» и «Магион-5» (запуск 1996 г.) синхронно измеряли параметры плазмы в авроральной области магнитосферы Земли. Таким образом удалось исследовать многие интересные процессы в плазменном слое магнитосферы, в том числе глобальную перестройку всей магнитосферной системы под действием гигантских «магнитных облаков» в солнечном ветре.

Рисунок художника А.Н.Захарова, ИКИ РАН



Специальный выпуск
К 50-летию Института космических
исследований (ИКИ) РАН

В НОМЕРЕ:



- 3 Зеленый Л.М.**
Оптимистическое предисловие с нотами пессимизма
- 5 Зайцев Ю.И.**
ИКИ РАН – вчера, сегодня, завтра
- 18 Чуразов Е.М.**
Две ближайшие сверхновые
Вспышка близкой сверхновой – желанное для астрофизиков, но очень редкое событие. Прямые наблюдения ее рентгеновского и гамма-излучения позволяют детально проверить теоретические модели.
- 25 Бисноватый-Коган Г.С., Моисеенко С.Г.**
Магнитный «мотор» сверхновых
Объяснить природу взрыва сверхновой с коллапсирующим ядром можно с помощью различных механизмов. Один из самых перспективных среди них сегодня – магниторотационный.
- 31 Зеленый Л.М., Петрукович А.А.**
Арктика. Космическая погода
Эффектные полярные сияния – последнее звено в сложной цепочке плазменных процессов, связывающих Солнце и Землю. Все живое и вся техника в Арктике подвержены их влиянию. Какая физика задает космическую погоду?
- 40 Застенкер Г.Н.**
Новости о солнечном ветре
Потоку плазмы, который испускает солнечная корона, принадлежит одна из ведущих ролей в передаче на Землю возмущений, возникающих на Солнце. Исследования солнечного ветра продолжаются, принося новую и важную информацию.

48 Попель С.И.

Пыль и пылевая плазма в Солнечной системе

Нано- и микроразмерные пылевые частицы, встречающиеся в Солнечной системе почти везде, – участники как явлений в межпланетной среде, так и планетообразующих и геологических процессов. Интерес к изучению пыли растет.

57 Эйсмонт Н.А., Ледков А.А., Назиров Р.Р.

Укрощение астероидов: как управлять их движением

Чтобы защититься от астероидной угрозы, надо уметь отводить траектории опасных объектов от столкновения с Землей. Эту задачу можно решить с помощью гравитационного маневра.

66 Зеленый Л.М., Митрофанов И.Г.

Луна – от исследований к освоению

Какова же начальная фаза российской лунной программы, которая создаст условия для последующих этапов планомерного освоения нашего спутника?

74 Кораблев О.И.

Метан на Марсе – это жизнь?

Проходят годы, работают поколения ученых, запускаются космические аппараты, но однозначный ответ на вопрос, есть ли жизнь на Марсе, так и не получен.

83 Лаврова О.Ю., Митягина М.И.

Нефтяные загрязнения морской поверхности: взгляд из космоса

Работа с разнообразной спутниковой информацией позволила создать метод радиолокационного зондирования поверхности океана. Проводимый с его помощью спутниковый экологический мониторинг выявляет на ней любые антропогенные загрязнения.

Рецензии

90 Маров М.Я.

Профессор Джованни Биньями и его новая книга

(на кн.: G.F.Bignami. Imminent Science. What Remains to be Discovered)

94

Новые книги

**Special Issue
To 50th Anniversary
of Space Research Institute of RAS**

CONTENTS:



3 Zelenyi L.M.
**Optimistic Preface
with Notes of Pessimism**

5 Zaitsev Yu.I.
ISS RAS: Yesterday, Today, Tomorrow

18 Churazov E.M.
Two Nearest Supernova
Supernova explosion in our vicinity is welcome, but rare event for astrophysicists. Direct observations of its X-ray and gamma radiation allow one to verify theoretical models in detail.

25 Bisnovatyi-Kogan G.S., Moiseenko S.G.
Magnetic «Engine» of Supernovae
Explanation of the nature of core-collapsed supernova explosion can involve different mechanisms. Today one of the most promising of them is magnetorotational.

31 Zelenyi L.M., Petrukovich A.A.
Arctic. Space Weather
Spectacular auroras are the final element in the complex chain of plasma processes that connect Sun and Earth. All living organisms and all technical devices are subject to their influence. What is the physics behind space weather?

40 Zastenker G.N.
News about Solar Wind
Plasma flow emitted by solar corona plays one of the leading roles in transmitting to Earth the disturbances occurring at Sun. Studies of solar wind continue and give a new and important information.

48 Popel S.I.
**Dust and Dusty Plasmas
in Solar System**

Nano- and microscale dust objects which present in Solar system almost everywhere participate in interplanetary space phenomena and also in geological processes and planet formation. The interest to dust study is growing.

57 Eismont N.A., Ledkov A.A., Nazirov R.R.
**Curbing of Asteroids:
How to Control their Movement**

To defend from asteroid menace we need to be able to divert trajectories of the dangerous objects from collision with Earth. This can be done using gravitational maneuver.

66 Zelenyi L.M., Mitrofanov I.G.
**The Moon: From Research
to Development**

What is the starting phase of Russian lunar program which will create conditions for following stages of planned development of our moon?

74 Korablev O.I.
Metan on Mars: Is this Life?

Years pass, generations of researchers work, space probes are launched, but unambiguous answer to the question «Is there life on Mars» still is not available.

83 Lavrova O.Yu., Mityagina M.I.
**Oil Pollution of Sea Surface:
Look from Space**

Study of diverse satellite information allows develop a method of radar probe of ocean surface and perform satellite ecologic monitoring identifying all anthropogenic pollution of it.

Book Reviews

90 Marov M.Ya.
**Professor Giovanni F.Bignami
and his New Book**
(on book: G.F.Bignami. Imminent Science. What Remains to be Discovered)

94 **New Books**

Оптимистическое предисловие с нотами пессимизма

Я очень рад, что любимый всеми учеными-естественниками журнал «Природа» согласился целиком посвятить один из своих выпусков юбилею нашего Института. ИКИ РАН (РАН, а не ФАНО!) почти вдвое моложе журнала, столетие которого мы недавно отмечали целой чередой мероприятий.

Юбилеи, хотя и психологически тяжелы для чествуемых, дают все-таки возможность «остановиться-оглянуться» и понять, что сделано за прошедшие годы, что пока не удалось и перенеслось на следующие десятилетия, а что будет делаться уже в другие времена и другими людьми...

Видит Бог, 10 лет назад, когда отмечался 40-летний юбилей Института, я был еще молодым начинающим директором и, как поется в известной рок-опере «Иисус Христос — суперзвезда», «then I was inspired, now I am sad and tired»: был полон надежд на то, какими великими победами в космосе мы встретим наше грядущее, тогда еще далекое, 50-летие. Мало что сбылось из этих планов. Аппарат «Фобос-Грунт», главный проект планетной программы, долетел только до дна Тихого океана. Другие наши центральные проекты — «Резонанс» и «Спектр-Рентген-Гамма» — потихоньку сдрейфовали на конец этого, а то и на начало следующего десятилетия.

Это была грустная преамбула. Тем не менее, были и хорошие новости. К таковым относится запуск и штатная работа другого аппарата серии «Спектр» («Спектр-Р»). Благодаря дружеской поддержке главы этого проекта академика Н.С.Кардашева, руководителя Астрокосмического центра Физического института им.П.Н.Лебедева РАН, специалисты отдела 54 ИКИ установили на космическом аппарате небольшой комплекс приборов «Плазма-Ф» для изучения локальных свойств среды (бесстолкновительной горячей плазмы), через которую проходит его траектория.

Основную часть времени «Спектр-Р» обтекает потоками солнечного ветра, и в статье доктора физико-математических наук Г.Н.Застенкера «Новости о солнечном ветре» рассказывается о необычных результатах, полученных в этих экспериментах. Я же хочу сказать несколько слов об авторе — Георгии Наумовиче Застенкере, одном из старейших по паспорту, но одном из самых юных душой и полных энергии сотрудников Института. Без его увлеченности и ежедневного труда не было бы ни «Плазмы-Ф», ни многих других, более ранних, экспериментов.

Как, наверное, помнят читатели «Природы», последний успешный отечественный проект по исследованию Солнечной системы, «Фобос», был

осуществлен (хотя, к сожалению, только частично) еще в позднесоветское время (1988—1989). Из-за финансовых трудностей число российских проектов в 1990—2000 гг. считалось единицами. Но, как гласит туркменская поговорка, «вода дырочку найдет»: экспериментаторы нашего Института проторили ценой больших и постоянных усилий дорогу на зарубежные (европейские и американские) космические аппараты.

Первым здесь был доктор физико-математических наук И.Г.Митрофанов с прибором HEND на аппарате НАСА «Mars Odyssey» (запуск в 2001 г.). Затем та же команда из ИКИ была приглашена участвовать и в других проектах НАСА: LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) и знаменитом тяжелом марсоходе «Curiosity», который сейчас «бороздит просторы» Красной планеты.

Доктор физико-математических наук О.И.Кораблев, используя приборные разработки, сделанные для еще одного утопленного в Тихом океане марсианского проекта «Марс-96», добился участия сотрудников ИКИ в проектах Европейского космического агентства (ЕКА) «Mars Express» и «Venus Express». Надо сказать, что европейский «Mars Express», запущенный в 2002 г., по своей научной нагрузке и задачам фактически стал реинкарнацией погибшего российского проекта «Марс-96». Сама Россия не нашла, к сожалению, сил и возможностей это сделать.

Статьи, помещенные в этом выпуске, как раз и основываются на оригинальных данных (конечно, не только на них одних), полученных в ходе этих экспериментов. Надо сказать, что отделы и Митрофанова, и Кораблева готовятся сейчас к активному участию в новой международной программе исследования Марса — «ЕхоMars», а также уже поставили летные комплекты приборов для интереснейшей международной экспедиции к Меркурию «VeriColombo» (ЕКА, Япония, Россия).

Астрофизики ИКИ, много лет ожидающие начала работы гамма-рентгеновского «Спектра», тоже не теряли времени даром. Проект ИНТЕГРАЛ Европейского космического агентства был запущен российским «Протоном», благодаря чему российские астрофизики (конечно, не только сотрудники ИКИ) получили право на четверть наблюдательного времени станции. Это стало началом все более активной работы с интереснейшими данными ИНТЕГРАЛА.

Один из недавних результатов — наблюдения близкой сверхновой типа Ia, которая вспыхнула в начале 2014 г. Этому событию посвящена статья

члена-корреспондента РАН Е.М.Чуразова. Но не только ему. Так получилось, что «госпожа Удача» дважды оказалась «доброй» к российским астрофизикам, сумевшим получить очень подробные данные об уникальных явлениях — вспышках близких сверхновых разных типов, которые наблюдали в 1987 и 2014 гг.

Становящаяся постепенно классической магниторотационная модель взрыва сверхновых представлена в статье одного из ее главных идеологов — профессора Г.С.Бисноватого-Когана.

Еще одна теоретическая работа, с легким нахальством названная профессором Н.А.Эйсмонтом «Укрощение астероидов», посвящена футуристической программе «космического биллиарда» — управления движением опасных астероидов путем их контролируемых столкновений друг с другом. Не всех, наверное, автор убедит своими аргументами, но я считаю, что такие идеи гораздо лучше планов, вынашиваемых в некоторых известных кругах, — стрельбе по опасным астероидам термоядерными зарядами.

Традиционной, давно разрабатываемой в ИКИ теме космической погоды посвящена статья члена-корреспондента РАН А.А.Петруковича. Еще будучи молодым ученым, Анатолий подступился к этой теме, создав важнейшую в то время для проекта «Интербол» базу данных ключевых физических параметров, полученных в ходе измерений приборными комплексами проекта. Само же понятие «космическая погода» восходит к идеям русских философов-космистов: Федорова, Морозова, Циолковского, Чижевского. Эти идеи, вначале чисто интуитивные, получили физическое обоснование с началом космической эры, когда стало ясно, что мы фактически живем в солнечной короне. Землю бомбардируют и энергичные солнечные частицы, и еще более энергичные частицы космических лучей, прилетающие из нашей Галактики и даже соседних с ней. Всё это влияет на ближайшую к нам космическую среду и на саму Землю — так что мы можем говорить о том, какова «погода» в околоземном космосе.

Работа доктора физико-математических наук С.И.Попеля посвящена новой для Института тематике: космической пыли и ее заряженной компоненте — пылевой плазме. Лунная тема вышла сейчас на авансцену Федеральной космической программы России на предстоящее десятилетие. Частицы лунной пыли, заряженные благодаря выбиванию из них электронов солнечным ультрафиолетовым излучением, — один из основных факторов риска и для техники, которой предстоит работать на Луне, и для космонавтов, которые, я думаю, вернутся на Луну в начале 30-х годов. (Кстати, советую в связи с этим перечитать интереснейшую книгу «Лунная пыль» Артура Кларка, которому удалось угадать многие связанные с ней опасности.)

И, нарушая неписанные законы галантности, последней в этом предисловии я упомяну статью

профессора О.Ю.Лавровой с М.И.Митягиной о мониторинге морей. Зондирование Земли, включающее не только моря, но и «луга, леса, поля и реки», всегда было традиционным в деятельности Института. Хочется еще добрым словом вспомнить основателя этого направления Яна Львовича Зимана, которого, к сожалению, уже нет с нами. Ольга Юрьевна вместе с многочисленными учениками активно и плодотворно работает в этом направлении. Известны ее классические работы по загрязнению Черного моря. Думаю, что читатели «Природы» с интересом ознакомятся с популярным изложением результатов этой группы.

И наконец, мы решили, что здесь будет более чем уместно опубликовать рецензию академика М.Я.Марова на пока еще не изданную у нас книгу под названием «Imminent Science», что можно перевести как «Неизбежное знание». Книгу эту написал замечательный ученый, большой друг нашего Института и вообще России, президент Международного комитета по исследованию космического пространства (COSPAR) в 2010—2014 гг. Джованни Биньями (Giovanni Bignami). Профессор Биньями очень много сделал, чтобы 40-я Научная ассамблея COSPAR, одна из крупнейших конференций для ученых-исследователей космоса, в 2014 г. состоялась в Москве и прошла максимально успешно, несмотря на все политические пертурбации прошлого года. Михаил Яковлевич Маров, ученик академика Мстислава Всеволодовича Келдыша — главного инициатора основания ИКИ, тоже стоял в те далекие годы у истоков основания нашего Института, и я очень рад, что его анализ книги Биньями вошел в наш юбилейный выпуск.

Кризисы не вечны, и я обоснованно рассчитываю, что читатели, заинтересовавшиеся книгой профессора Биньями, смогут вскоре увидеть и ее издание на русском языке, а текст Михаила Марова станет прекрасным предисловием к ней.

В заключение позвольте мне помечтать о юбилейном выпуске «Природы» 2025 г. Институту исполнится 60 лет, Академии — 300. Надеюсь, мы уже забудем о всех передышках, запущенных в 2013 г. неизвестными авторами закона «о реформе РАН». Верю, что РАН встретит свое 300-летие в качестве мощного и востребованного государством центра интеллектуальной активности страны. А осенью 2025 г. читатели прочтут о результатах проектов исследования Луны, Марса, Земли и далеких галактик, над которыми сейчас трудятся сотрудники ИКИ РАН и которые пока еще ждут своего часа.

Как видите, автор предисловия все-таки остается оптимистом — без чего, думаю, было бы невозможно заниматься космическими исследованиями в России.



© Директор ИКИ РАН
академик Л.М.Зеленый

ИКИ РАН — Вчера, сегодня, завтра

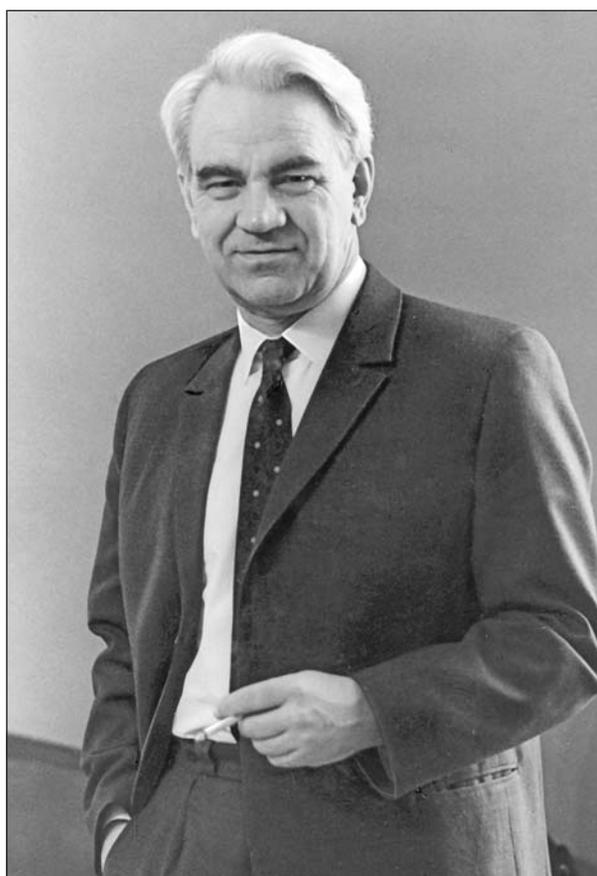
Ю.И.Зайцев

руководитель пресс-службы ИКИ РАН

В июле 1963 г. президент Академии наук СССР академик М.В.Келдыш обратился с письмом в директивные органы страны с предложением создать в системе АН СССР Объединенный институт космических исследований. Основной его задачей стали бы систематические исследования космического пространства с помощью унифицированных малых, а в дальнейшем и тяжелых искусственных спутников Земли, создаваемых отечественной промышленностью. При этом институт должен разрабатывать и изготавливать научную аппаратуру, монтировать ее на серийные космические аппараты, проводить их испытания, выполнять предстартовую подготовку и участвовать в запусках [1].

К этому времени Советский Союз не только запустил первые искусственные спутники Земли, но и приступил к исследованиям Луны и планет Солнечной системы. Был получен целый ряд выдающихся результатов, определивших ведущее положение нашей страны в этой новой отрасли науки и техники. Подтвердилась и правильность основных направлений космических исследований, начатых в стране. Но это были только первые шаги на пути познания Вселенной. Исследования проводились отдельными институтами АН СССР, конструкторскими и промышленными организациями разных министерств и ведомств. На первых этапах такая форма проведения космических экспериментов вполне оправдывала себя, поскольку они выполнялись на базе единичных, по сути уникальных запусков спутников. Проведение дальнейших работ, направленных на углубленное изучение космического пространства, необходимость специализированных экспериментов, ориентированных на решение более сложных проблем проникновения человека в космос, требовало не просто расширения фронта исследований, привлечения к ним новых научных и конструкторских организаций, но и обеспечения их эффективного взаимодействия.

По мнению Келдыша, эта задача могла быть решена путем создания некоего научно-методи-



Президент АН СССР академик М.В.Келдыш.

Фото из архива «Природы»

ческого центра (института), что позволило бы упорядочить ведущиеся работы, исключило параллелизм, сделало бы их более целеустремленными и планомерными, обеспечило необходимое развитие всех направлений научных знаний о космосе, наконец, дало бы возможность получать наибольшее количество новых данных при наименьших затратах [1]. Самое же главное, институт следовало наделить функциями заказчика по всем научным космическим аппаратам, что



Главный корпус ИКИ.

Здесь и далее фото предоставлены Институтом космических исследований РАН

исключило бы диктат производителя, который можно выразить словами: «Вот вам космический аппарат, не нравится — не берите, только другого не будет».

Для выполнения задач, которые предлагалось поставить перед Объединенным институтом, он должен был иметь постоянный состав высококвалифицированных научных сотрудников с опытом космических исследований, серьезную опытно-конструкторскую и производственную базу, центр сбора и обработки научной информации, чтобы оперативно использовать результаты исследований, а также испытательный комплекс для полного объема проверок при подготовке спутников к запуску. Предполагалось, что институт станет головной организацией по исследованию и использованию космического пространства в интересах фундаментальной науки.

Предложение Келдыша о создании института было принято, хотя и с существенно меньшими, чем первоначально планировалось, полномочиями. Постановление Совета министров СССР №392-147 от 15 мая 1965 г. было подписано его председателем А.Н.Косыгиными. В этот же день оно было предварительно утверждено постановлением Президиума ЦК КПСС №П202/16. Совет министров дал два месяца Академии наук, Министерству общего машиностроения и Министерству обороны СССР совместно выработать «Положение об Институте космических исследований Академии наук», а Комиссии по военно-промышленным вопросам одобрить это положение. Постановление констатировало незамедлительное начало строительства института.

<...> 5. Разрешить Академии наук СССР построить в 1965—1967 годах, в виде исключения, в г.Москве для размещения Института космических исследований лабораторные корпуса общей

рабочей площадью основного назначения до 30 тыс. кв. метров.

Мосгорисполкому отвести Академии наук СССР для строительства указанных корпусов земельный участок.

Строительство корпусов Института космических исследований возложить на Главспецстрой при Государственном производственном комитете по монтажным и специальным строительным работам СССР.

б. Разрешить Академии наук СССР и Госплану СССР, в виде исключения, включить в план капитальных работ на 1965—1966 годы строительство лабораторно-производственных корпусов Института космических исследований без наличия утвержденной в установленном порядке проектно-сметной документации.

<...> Госбанку СССР впредь до утверждения проектно-сметной документации финансировать строительство указанных объектов по проектам и сметно-финансовым расчетам, составленным по рабочим чертежам.

Но права заказчика на научные космические аппараты Институту космических исследований так и не были даны. Министерство общего машиностроения — производитель и одновременно заказчик космической техники — здесь стояло на смерть. Возможно, это и стало одной из причин сегодняшнего ослабления научных космических позиций России.

Исчезло из предлагаемого Келдышем названия института слово «Объединенный», хотя формировался он, как и планировалось, на базе многих отделов и лабораторий, работавших ранее по космической тематике в различных институтах АН СССР и других ведомств, а также в конструкторских и промышленных организациях, в том числе королёвском ОКБ-1.

Институту вменялось выполнение экспериментальных работ по таким направлениям космической физики, как астрофизика и физика планет и малых тел Солнечной системы, физика Солнца и солнечно-земных связей, космическая плазма и исследования в области нелинейной геофизики. Ему также поручалась подготовка программ научных космических исследований, разработка и испытания комплексов научной аппаратуры по проектам, включенным в отечественную космическую программу [2].

Келдыш не только непосредственно участвовал в организации института, но и был, по сути, основной движущей силой этого процесса, особенно в первые, самые трудные годы его становления. Символично, что здание института находится на площади, носящей имя Келдыша. Когда-то здесь планировалось соорудить памятник прославленному академику, но эти планы до сих пор не реализованы.

Структура института

В разные годы Институт космических исследований возглавляли академики Г.И.Петров (1965—1973), Р.З.Сагдеев (1973—1988), А.А.Галеев (1988—2001); в 2002 г. директором института был избран академик Л.М.Зелёный.

За прошедшие со дня образования института 50 лет менялись возлагаемые на него задачи, а в соответствии с ними — и его структура. При этом реорганизации зачастую носили радикальный характер.

Одним из первых научных подразделений, сформированных в институте, стал отдел геофизики — физики космической плазмы. В него вошли группы теоретиков во главе с Г.А.Скуридиным, ра-

нее работавших в Отделении прикладной математики Математического института им.В.А.Стеклова АН СССР, и лаборатория полярных сияний из Института физики атмосферы АН СССР во главе с Ю.И.Гальпериным. В отделе был также образован сектор космической плазмы, который возглавил О.Л.Вайсберг.

Практически одновременно организуется отдел космических лучей, который по своей тематике был наиболее близок к отделу геофизики. Еще один отдел, в котором велись исследования космической плазмы и космической газовой динамики, возглавил академик Петров. В него входили теоретическая (заведующий В.Б.Леонас) и экспериментальная (В.Б.Баранов) лаборатории. Позднее в состав отдела на правах лаборатории вошла группа сотрудников во главе с И.М.Подгорным, переведенная из Института атомной энергии им.И.В.Курчатова АН СССР. Они занимались лабораторным моделированием взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли и атмосферами планет [3].

В 1971 г. в институт переводится из Радиотехнического института АН СССР большая группа ученых, возглавляемая К.И.Грингаузом, которая на правах самостоятельного отдела также занимается экспериментальными исследованиями солнечной плазмы.

Отдел геофизики вскоре был расформирован, на его базе создали отдел физики космической плазмы во главе с Л.Л.Ваньяном, ранее работавшим в Институте физики Земли АН СССР.

В результате очередной реорганизации в 1972 г. возникло штатное плазменное отделение. Его руководителем на общественных началах стал Сагдеев, незадолго до этого пришедший в институт. После того, как его назначили директором, он пригласил своего ученика Галеева, кото-



«Первопроходцы» института: Г.А.Скуридин (слева), Ю.И.Гальперин (в центре) и О.Л.Вайсберг.



Георгий Иванович Петров (1913—1987) — первый директор института. Доктор технических наук, член-корреспондент (1953), академик АН СССР (1958). Ученый-механик, с его именем связаны многие выдающиеся достижения отечественной ракетно-космической техники второй половины 20-го столетия.

Петров был неординарной личностью, совмещающей в себе широкий и одновременно глубокий взгляд на рассматриваемые процессы и явления, что позволяло ему ухватить их суть и создать математическую модель для качественного описания. В равной степени ему были присущи черты как теоретика, так и экспериментатора. Он одним из первых оценил перспективы быстродействующих ЭВМ для решения задач механики, внес огромный вклад в развитие аэромеханики больших скоростей, а также в решение проблемы теплозащиты космических аппаратов, входящих в атмосферу со сверхзвуковыми скоростями, близкими к первой космической.

рый возглавил плазменное отделение. В 1973 г. оно было преобразовано в отдел физики плазмы. Помимо теоретической лаборатории А.А.Галеева в состав отдела вошли: лаборатория полярных сияний (затем физики магнитосферных процессов) Ю.И.Гальперина, лаборатория околопланетной плазмы (образованная на базе отдела экспериментальных исследований солнечной плазмы) К.И.Грингауза и лаборатория моделирования И.М.Подгорного, а также группы космической плазмы О.Л.Вайсберга и солнечных космических лучей Н.Ф.Писаренко, ставшие позднее самостоятельными лабораториями.

Плазменное направление исследований продолжало и в дальнейшем, по выражению Сагдеева, *совершенствоваться*. В 1967 г. был создан теоретический отдел во главе с А.А.Галеевым и отдел солнечно-земных связей во главе со Г.А.Скуридиным. После избрания Галеева директором института отдел физики космической плазмы возглавил Зелёный.

Главнейшим научным направлением в институте всегда считались исследования планет и малых тел Солнечной системы. Однако в первые го-

ды работы по этой тематике были рассредоточены по разным подразделениям. На последнем этапе своей деятельности на посту директора Петров принял решение о реорганизации планетной тематики, объединив несколько научных групп в ранге лабораторий в единый лунно-планетный отдел под своим личным руководством. Однако это не нашло понимания у нового директора Сагдеева. Ряд лабораторий лунно-планетного профиля вскоре были ликвидированы, а отдел Луны и планет, первоначально переименованный в лабораторию сравнительной планетологии, со всей тематикой и оборудованием переведен в Институт геохимии и аналитической химии им.В.И.Вернадского АН СССР. Вскоре в стране произошло резкое сворачивание лунных программ как пилотируемых, так и с помощью автоматических средств, и к началу 1980-х годов эта тематика в институте оказалась практически ликвидирована.

Единый отдел планетных исследований был воссоздан в 1974 г. Его возглавил В.И.Мороз. В отдел вошли четыре лаборатории: спектроскопии (заведующий В.И.Мороз), фотометрии и ИК-ра-



Роальд Зиннурович Сагдеев — директор института с 1973 по 1988 г. Доктор физико-математических наук, член-корреспондент (1964), академик АН СССР (1968) — РАН. До прихода в ИКИ РАН работал в Институте атомной энергии им.И.В.Курчатова и в Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР, где стал одним из создателей современной физики плазмы. После ухода с поста директора и до 1990 г. руководил научно-методическим центром аналитических исследований института.

Сагдееву принадлежат многочисленные труды по физике плазмы и космической физике. Широко известна его теория бесстолкновительных ударных волн, без которой немыслима ни современная космическая физика, ни решение проблемы термоядерного синтеза, ни многое другое. За создание неоклассической теории процессов переноса в тороидальной плазме Сагдеев удостоен Ленинской премии (1984). Роальд Зиннурович основал физическую школу, которая насчитывает десятки докторов наук и пользуется международным признанием.



Альберт Абубакирович Галеев — директор института с 1988 по 2001 г. Доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент АН СССР (1987), академик РАН (1992). Специалист в области физики плазмы. Окончил Новосибирский государственный университет, параллельно с учебной работой в Институте ядерной физики СО АН СССР. В 1973 г. перешел на работу в ИКИ РАН и возглавил отдел космической плазмы. В настоящее время почетный директор института.

Яркий талант и творческая энергия позволили Галееву добиться уникальных результатов в области космической физики. Он разработал теорию взрывного пересоединения силовых линий в магнитосферном хвосте и теорию слабого взаимодействия волн в плазме, а совместно с Сагдеевым — неклассическую теорию переноса в «Токамаках». Альберт Абубакирович также предложил теорию, объясняющую ускорение солнечного ветра из корональных дыр с помощью альфеновских волн.

диометрии (Л.В.Ксанфомалити), масс-спектрометрии (В.Г.Истомин), физико-химических исследований планет (Л.М.Мухин).

Тематика работ отдела первоначально была ограничена лишь физическими исследованиями атмосфер и поверхностей планетных тел. Предполагалось, что геологи и специалисты по телевизионной съемке будут выделены в самостоятельные структурные подразделения, одним из которых, в частности, стал отдел оптико-физических измерений. Костяк этого отдела составил возглавляемый Б.Н.Родионовым коллектив ученых и инженеров, перешедший в 1967 г. из Московского института геофизики, аэрофотосъемки и картографии. К первым работам, проведенным отделом, можно отнести изучение топографии участков лунной поверхности по их изображениям, переданным на Землю с первого и второго луноходов. В основном же работы отдела были сосредоточены на съемках со спутников земной поверхности с целью, с одной стороны, отработать фотографические методы и средства дистанционного зондирования, а с другой — выявить круг задач, которые можно решать по материалам космиче-

ской съемки. После ряда реорганизаций, тематического перенацеливания, изменений названия отдел в итоге сохранил свой профиль оптико-физических измерений.

В 1967 г. на базе части сотрудников, работавших ранее в проблемной радиофизической лаборатории Московского государственного педагогического института им.В.И.Ленина, в институте формируется научное подразделение радиофизических приборов. По мере совершенствования созданных в отделе микроволновых приемников их начали использовать для исследования поверхности суши и океана из космоса, и в 1974 г. было принято решение о создании самостоятельного отдела прикладной космической физики под руководством В.С.Эткина. Приоритетной задачей отдела стало выявление внутриокеанических глубинных процессов по их поверхностным «отголоскам». Однако к началу 1990-х годов в связи с сокращением финансирования «океанического» направления центр тяжести переместился на исследование окружающей среды, а отдел стал называться «Космические исследования Земли как экологической системы».



Лев Матвеевич Зелёный — директор института с 2002 г. Доктор физико-математических наук, профессор Московского физико-технического института. Поступил в институт на должность инженера в 1972 г. после окончания факультета аэрофизики и космических исследований МФТИ. Член-корреспондент (2003), академик (2008), вице-президент РАН (2013), председатель Совета по космосу РАН.

Основное направление научной деятельности Зелёного — физика космической плазмы. Известный специалист в области теории бесстолкновительной плазмы, пересоединения магнитных полей, динамики заряженных частиц, физики магнитосферы. Был научным руководителем одного из самых успешных международных космических проектов — ИНТЕРБОЛ. Научный руководитель с российской стороны международного проекта «ЕхоMars» и отечественной лунной программы, одна из задач которой — использование Луны в качестве естественного исследовательского полигона. Лауреат премии Президента РФ (2005).



Коллектив отдела космической газовой динамики. В центре за столиком руководитель отдела академик Г.И.Петров.

В 1983 г. лаборатория космофизики выделена из отдела Эткина и стала самостоятельным подразделением. На ее базе создан отдел прикладных космических исследований, переименованный в 1995 г. в отдел космогеофизики. Первоначально отдел возглавлял С.С.Моисеев, а после его смерти в 1995 г.— А.С.Ерохин.



Я.Б.Зельдович и И.С.Шкловский.

Кроме отдела Луны и планет самую серьезную реорганизацию претерпел отдел астрофизики (руководитель И.С.Шкловский), созданный в 1967 г. на базе отдела радиоастрономии Государственного астрономического института им.П.К.Штернберга МГУ. Шкловский стремился сосредоточить усилия на «большой» астрономии, т.е. исследованиях Галактики, ее населения и внегалактических объектов, на вопросах космологии. Но реализации этих планов помешала смерть Шкловского в 1985 г.

К тому времени в институте уже более 10 лет существовал отдел теоретической астрофизики, руководство которым принял на себя академик Я.Б.Зельдович. Он проводил теоретические исследования в области космологии.

После разграничения тематики работ этих двух отделов, перевода к Зельдовичу лаборатории рентгеновской астрономии и ряда сотрудников из бывшего отдела Шкловского, отдел теоретической астрофизики был преобразован в отдел высоких энергий под руководством Р.А.Сюняева. Отдел астрофизики во главе с новым руководителем Н.С.Кардашевым и с оставшимися в его составе лабораториями в 1990—1991 гг. перешел в Физический институт АН СССР [4].

Как самостоятельные научные подразделения уже в первые годы существования института были также созданы: лаборатория (затем преобразованная в отдел) прикладной астрофизики и миллиметровой, субмиллиметровой и инфракрасной техники, а также специальные лаборатории для развития дистанционных методов зондирования Земли из космоса, спектрометрии космического гамма-излучения, активной диагностики, сверхдальней радиоинтерферометрии, спектрометрии космического гамма-излучения.

При запусках первых высотных ракет, искусственных спутников Земли, лунных и межпланетных станций получаемая с них телеметрическая информация обрабатывалась в Отделении прикладной математики Математического института им.В.А.Стеклова АН СССР в рамках информационно-расчетного бюро. В 1966 г. коллектив бюро практически в полном составе переводится в институт на правах отдела автоматизированной обработки телеметрической информации. В 1988 г. он был объединен с отделом баллистики. С этого времени все работы по обработке телеметрии с борта космического аппарата проводятся в рамках единого подразделения, одной из главных задач которого стало полное информационное обеспечение научных экспериментов в космосе.

Отдел программно-управляемых систем под руководством Б.Н.Новикова был создан в 1981 г. для решения задач проектирования и реализации научных комплексов межпланетных аппаратов, следящих платформ, бортовых систем, логики управления, сбора и передачи информации и аналогичных работ.

Для проведения испытаний научных приборов, предназначенных для установки на борту космических аппаратов, и исследования их работоспособности в составе бортового комплекса и в условиях космического пространства институт располагает Контрольно-испытательной (КИС) и Лабораторно-испытательной (ЛИС) станциями. Техническое задание на строительство испытательного комплекса, структуру и состав оборудования было разработано под руководством В.М.Ратнера. В мае 1972 г. оно было утверждено М.В.Келдышем. Строительство комплекса завершено в 1976 г. В том же году его возглавил А.Л.Родин. Во многом благодаря его усилиям в институте была создана современная испытательная база космической научной аппаратуры, что дало возможность выполнять все основные виды испытаний. Она оснащена оборудованием, позволяющим проводить испытания на механические (вибрацию, удар, линейные перегрузки), термовакуумные и климатические воздействия, а также на электрическую совместимость, электрические испытания с помощью радиотелеметрических средств и испытания на электрическую прочность изоляции. В ходе таких работ научная аппаратура доводится до заданных технической документацией характеристик.

Наземный испытательный комплекс института аккредитован в качестве испытательного центра Академии наук и входит в федеральную систему сертификации космической техники с правами проведения испытаний научной целевой аппаратуры космических аппаратов.

Институту одно время было подчинено Особое конструкторское бюро в г.Фрунзе (ныне Бишкек) — конструкторская организация со своим опытным производством. После распада СССР бюро оказалось за грани-



Коллектив отдела космических исследований Земли как экологической системы. 1991 г.

цей и взаимодействие с ним стало осуществляться на договорной основе.

При Центре дальней космической связи в Евпатории (Крым) создается терминальная станция с автоматизированным комплексом обработки и передачи научной информации. В Тарусе (Калужская обл.) было организовано опытное производство по созданию научной аппаратуры (СКБ КП ИКИ). Основано оно было по распоряжению Президиума АН СССР от 30 июня 1978 г. о создании опытного производства приборостроительного профиля для научных космических исследований. Последние годы это производство функционирует на правах приборостроительного отделения института [5].



Вакуумная камера с солнечным имитатором.

Сегодняшняя структура института представлена пятнадцатью основными научными, шестнадцатью обслуживающими и двумя производственными подразделениями. К числу научных подразделений относятся отделы: космогеофизики (руководитель Н.С.Ерохин), астрофизики высоких энергий (М.Н.Павлинский), физики планет (О.И.Кораблев), физики космической плазмы (А.А.Петрукович), исследования Земли из космоса (Е.А.Шарков), технологий спутникового мониторинга (Е.А.Лупян), оптико-физических исследований (Р.В.Бессонов), космической динамики и математической обработки информации (Р.Р.Назиров), ядерной планетологии (И.Г.Митрофанов), наблюдательной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии (С.С.Моисеенко), проектирования и экспериментальной отработки бортовой и специализированной аппаратуры и комплексов (И.В.Чулков). К основным отделам относятся также комплексные подразделения патентования и инновационной деятельности, обработки информации, наземных научных комплексов, телекоммуникационных сетей и высокопроизводительных вычислительных комплексов.

В настоящее время в институте работают свыше 1000 человек, в том числе 250 научных сотрудников. В их числе три действительных члена и два члена-корреспондента Российской Академии наук.

В 1986 г. институт за значительный вклад в развитие отечественной науки и техники награжден орденом Ленина. Директору института Сагдееву присвоено звание Героя Социалистического Труда. Многие сотрудники были награждены орденами и медалями.

Достижения и планы

Далеко не все работы ИКИ связаны с космическими экспериментами и проектами, но именно в них концентрируется труд сотен людей и зримо воплощается суть космических исследований. Сотрудники института принимали непосредственное участие в подготовке и проведении научных исследований и экспериментов, в получении и обработке информации с космических аппаратов, запускаемых по национальной космической программе, а также в проектах, осуществляемых в рамках международного сотрудничества, в том числе (особенно активно в последние годы) как соисполнители в зарубежных космических проектах. В общей сложности они участвовали в более чем 100 космических запусках.

В одних зарубежных проектах ученые и специалисты института разрабатывали и испытывали бортовые комплексы научной аппаратуры, а затем проводили исследования с их помощью («Mars Global Surveyor», «Venus Express», «Mars Odyssey») в других — занимались получением и обработкой

научной информации с космических аппаратов, ее анализом и интерпретацией (ИНТЕГРАЛ).

Несомненно, одним из самых замечательных и результативных был международный проект ВЕГА — пролет вблизи кометы Галлея космических аппаратов «Вега-1 и 2», созданных в Научно-производственном объединении им.С.А.Лавочкина. Впервые с их помощью проведены непосредственные измерения и получены данные о составе кометы и ее взаимодействии с магнитным полем и солнечным ветром. Сами межпланетные станции были советскими, но их научное оборудование — международным, изготовленным в девяти странах. Полет станций к комете был совмещен с исследованиями Венеры, последние проводились не только на этапе спуска посадочного аппарата на поверхность планеты, но и в ее атмосфере с помощью дрейфующих аэростатов.

Институт космических исследований РАН выступает как головной институт в области научных космических исследований в нашей стране, составляя, вместе с другими организациями науки и промышленности, предложения к Федеральной космической программе, которая формируется Советом РАН по космосу и его соответствующими секциями совместно с Федеральным космическим агентством (Роскосмос).

Институт участвует в выполнении Федеральной космической программы России, координируя создание научной аппаратуры, совместную работу всех членов кооперации, включая ее международную составляющую. В ряде других проектов, российских и зарубежных, институт выступает как участник научной программы, поставляя часть научной аппаратуры, обрабатывая научную информацию, участвуя в баллистико-навигационной подготовке проекта.

В 2003 г. в институте был создан Научно-образовательный центр, в задачу которого входит сотрудничество с различными вузами, работа с молодыми учеными и школьниками, организация участия сотрудников в выставках и фестивалях науки, пропаганда достижений отечественной космонавтики. Центр проводит экскурсии по выставочному залу, где рассказывается о направлениях деятельности института, демонстрируются приборы и макеты космических аппаратов, а также организует дни открытых дверей, во время которых школьники могут познакомиться с институтом и его работами.

Проводимые сегодня в институте научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы отражают широкий спектр изучения астрофизики и космологии. Отметим такие направления, как происхождение, строение и эволюция Вселенной, природа темной материи и темной энергии, исследование Луны и планет, Солнца и солнечно-земных связей, развитие методов и аппаратуры для внеатмосферной астрономии и изучения космоса, координатно-временное обеспечение фундаментальных исследований и практических задач.

Важным направлением исследований остается изучение пространственного и временного распределения потоков и спектров нейтронов в околоземном космическом пространстве, в том числе во время солнечных вспышек. Начатые еще в феврале 2007 г. на российском сегменте МКС в рамках программы «Наука на МКС» совместные измерения с использованием разработанных в институте приборов БТН-М1 с борта МКС и HEND, установленного на марсианском искусственном спутнике, позволили экспериментально оценить нейтронную компоненту радиационного фона на всех участках межпланетного перелета Земля — Марс и получить синхронные данные о потоках нейтронов на околоземной и околомарсианской орбитах, а также провести мониторинг космических гамма-всплесков для определения координат их источников на небесной сфере. Эти исследования продолжаются.

Работы в институте ведутся и по другим важным направлениям фундаментальных исследований. Это научные основы разработки методов, технологий и средств изучения поверхности и недр Земли, атмосферы (включая ионосферу и магнитосферу), гидросферы и криосферы; численное моделирование и геоинформатика; инфраструктура пространственных данных и ГИС-технологии; эволюция окружающей среды и климата под воздействием природных и антропогенных факторов; научные основы рационального природопользования и устойчивого развития; территориальная организация хозяйства и общества.

И наконец, еще одна группа направлений сегодняшних фундаментальных исследований — общая механика; навигационные системы; динамика космических тел, транспортных средств и управляемых аппаратов; механика живых систем [6].

Запуски спутников серии «Прогноз», реализация проектов ИНТЕРБОЛ и ПЛАЗМА не только сделали доступным изучение природных процессов, происходящих на Солнце, действия механизмов солнечно-земных связей. Они еще более



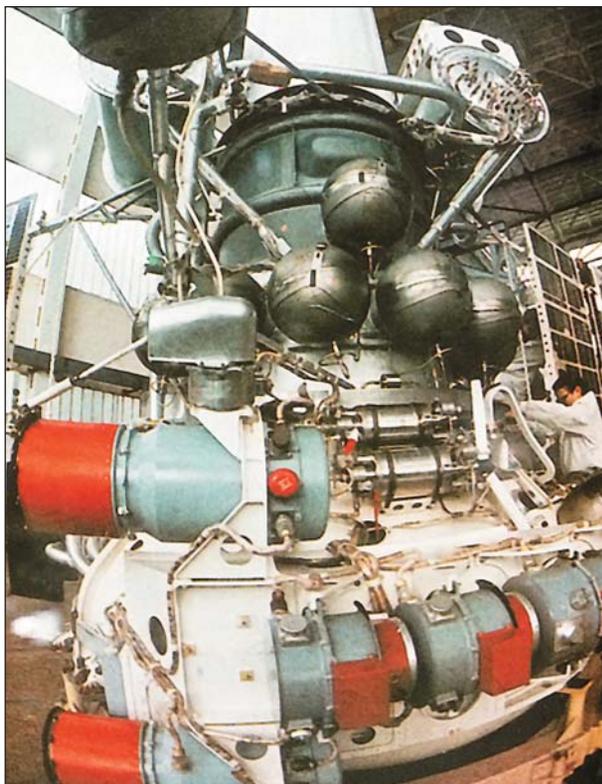
Специалисты института вместе с американскими инженерами на сборке посадочного аппарата «Mars Global Surveyor».

приблизили фундаментальную науку к решению проблематики повседневной жизни людей — появилась возможность сопоставлять и достоверно прогнозировать изменение биологических и технологических процессов на Земле под влиянием циклов солнечной активности.

Тем не менее нерешенных вопросов остается все еще достаточно много. Среди них наибольший интерес представляет процесс образования солнечного ветра и загадка — что нагревает солнечную корону до 2 млн градусов, если температура поверхности светила во много раз ниже. Получить ответы на эти вопросы хотя бы частично ученые надеются с запуском космического аппарата

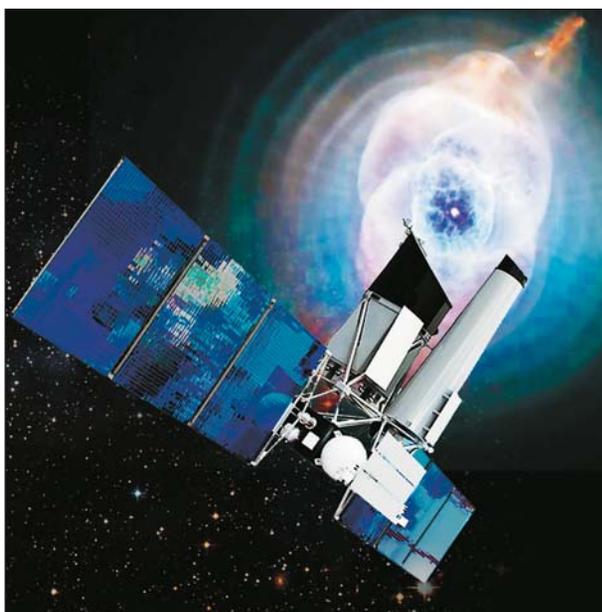


Пресс-центр ИКИ по проекту ВЕГА, на экранах мониторов появились первые изображения кометы Галлея.



Космическая обсерватория «Астрон».

рата «Интергелиозонд», который будет изучать наше светило с минимально безопасного для аппарата расстояния — менее 40 солнечных радиусов. Российский проект заполнит нишу, образовавшуюся в изучении Солнца. Сейчас его исследуют полдесятка космических аппаратов разных



Космическая обсерватория «Спектр-Рентген-Гамма».

стран, но все они работают на околоземных орбитах. Вблизи же Солнца ни одного спутника нет. А с учетом того что орбита «Интергелиозонда» будет немного наклонена к плоскости эклиптики, он сможет «увидеть» и солнечные полюса, качественно рассмотреть которые с Земли и околоземных орбит невозможно.

Работа этого космического аппарата будет интересна и в связи со следующим. Известно, что у поверхности Солнца нет никакого коллективного движения плазмы, которое можно было бы назвать «ветром». Оно проявляется только на расстоянии нескольких солнечных радиусов от светила. Очень важно попасть в эту область и организовать там наблюдение над теми процессами, которые приводят к ускорению солнечного ветра. Также неясно, почему достигающий Земли поток нейтрино вдвое слабее, чем предсказывает теория. В последнее время появилась гипотеза, что часть нейтрино перехватывается скопившимися в недрах Солнца гипотетическими частицами темной материи.

На 2017 и 2018 гг. запланирован запуск четырех спутников «Резонанс» для исследования внешней зоны радиационного пояса Земли, где, в частности, работают геостационарные спутники. Речь идет о так называемых релятивистских электронах — основной составляющей радиационного пояса, которые представляют собой главную угрозу для работы спутников связи на геостационарной орбите. Исследования на спутниках «Резонанс» позволят изучить процессы ускорения этих спутников при взаимодействии с электромагнитными волнами, имеющими высокое временное разрешение.

Первый отечественный специализированный спутник для астрофизических исследований — космическая обсерватория «Астрон» — был запущен в 1983 г. Он успешно функционировал на орбите в течение семи лет, установив в то время рекорд длительности работы в космосе. Еще более совершенная рентгеновская обсерватория «Гранат», выведенная на орбиту в 1989 г., проработала почти 10 лет. Дальнейшее развитие отечественных астрофизических исследований связано с использованием модуля «Навигатор», разработанного в НПО им.С.А.Лавочкина. Он позиционируется как универсальный для космических аппаратов различного назначения. В зависимости от задач базирующихся на нем космических аппаратов они могут функционировать на низких круговых, эллиптических, высоких эллиптических и геостационарных орбитах и в точках либрации. В частности, на его базе была создана космическая обсерватория «Спектр-Радиоастрон» и разрабатывается обсерватория «Спектр-Рентген-Гамма», которую планируется вывести в точку Лагранжа L2. Это совместный проект России и Германии. Основой обсерватории станут два рентгеновских телескопа косого падения — eROSITA (Германия) и ART-XC (Россия),

совместно перекрывающие область энергий 0.2—30 кэВ. Задача обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма» — получение рентгеновского обзора всего неба с чувствительностью, практически в 100 раз превышающей чувствительность существующих обзоров неба, и продление такого обзора в области более жесткого рентгеновского диапазона.

Перспективы ультрафиолетовой астрономии на ближайшее десятилетие связаны с запуском космической обсерватории «Спектр-УФ», также создаваемой НПО им.С.А.Лавочкина на базе «Навигатора» и предназначенной для спектроскопии слабых источников в данном диапазоне.

Вселенная в ультрафиолетовом диапазоне изучена очень слабо, и на ближайшие десятилетия актуальность подобных исследований спектра будет только увеличиваться. Выбранные для обсерватории направления исследований и ее параметры позволят сохранить высокую научную значимость проекта и обеспечить выполнение задач на высочайшем уровне технического решения в течение следующих не менее 10—15 лет [7].

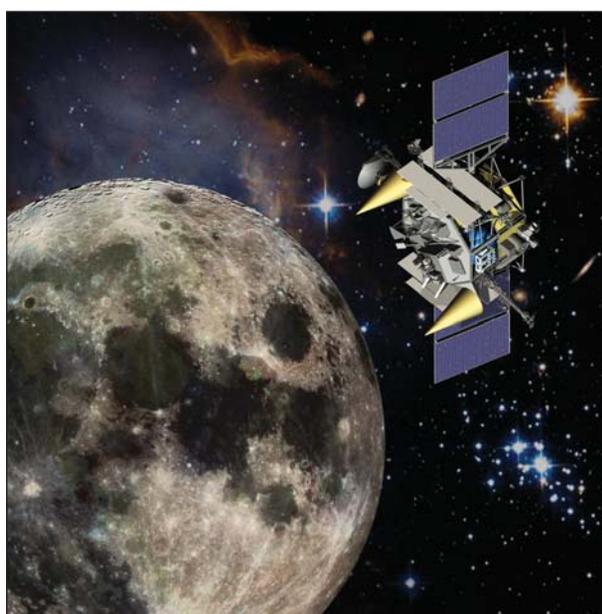
Глобальная цель мировой космонавтики в текущем столетии, как представляется, — это освоение Солнечной системы, достижение более высокого уровня развития земной цивилизации при



Космическая обсерватория «Спектр-УФ».

безусловном обеспечении ее безопасности и выживаемости в условиях возможных природных и техногенных катастроф как наземного, так и космического происхождения.

Собственно, сейчас только два небесных тела претендуют на то, чтобы войти в сферу интересов человечества по освоению. Это Луна и Марс. Если говорить о создании лунной базы с экспедициями посещения и тем более постоянным пребыванием человека, то ему должны предшествовать тщательная разведка Луны, определение наиболее инте-



Лунная орбитальная станция «Луна-26» (слева) и автоматическая станция «Луна-28».



Будущий научный лунный исследовательский полигон.

ресных регионов, выработка задач освоения. Для решения этих предварительных задач необходим запуск серии автоматических станций. Именно это запланировано на 2018—2020-е годы. Кроме изучения самой Луны в ходе реализации программы предстоит отработать ключевые техноло-

гические моменты и будущих планетных экспедиций, прежде всего — марсианских: посадку, забор грунта, управление самоходным аппаратом на поверхности другой планеты, наконец, автоматическую доставку грунта других небесных тел на Землю.

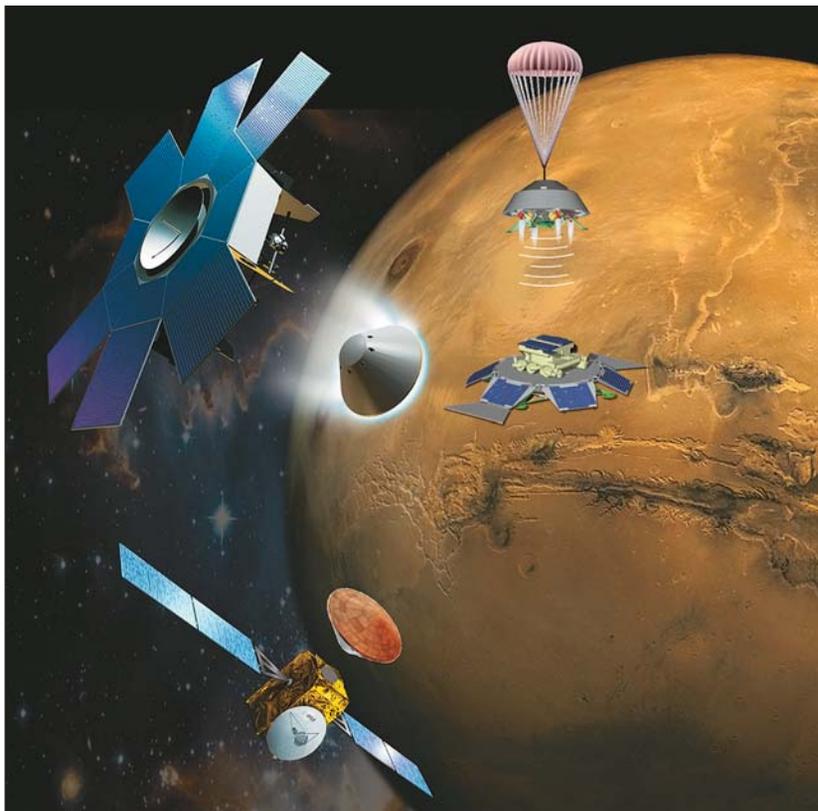
Чтобы подчеркнуть преемственность российской и советской лунных программ, в названиях новых миссий будет продолжена нумерация, начатая советскими «Лунами». Первый аппарат серии — «Луна-25» — планируется посадить в полярной области. Затем к нашему спутнику отправятся лунная орбитальная станция «Луна-26» и еще через год — второй посадочный аппарат «Луна-27» с бурильной установкой (посадка на другой полюс Луны). Вторым шагом

лунной программы станет возврат грунта из полярной области («Луна-28») и доставка туда лунохода на аппарате «Луна-29» (планируются на 2020-е годы).

Ожидается, что срок жизни аппаратов составит около года. Посадочные аппараты будут выполнять исследования в районе лунных полюсов. Основная работа орбитального аппарата по изучению Луны и окололунного пространства пройдет на низкой окололунной орбите высотой порядка 200 км, после чего он будет уведен на более высокую (500—700 км) орбиту, где начнутся эксперименты по изучению космических лучей.

Следует отметить, что исследования, которые будут проводиться в рамках этой программы, — не повторение советских. Современные планы лунных экспедиций [8] нацелены в первую очередь на полярные области Луны, мало похожие на экваториальные районы, которые исследовались в 1969—1970 гг.

Технологии, которые станут отрабатываться в ходе лунных миссий, будут также использоваться в последующих марсианских проектах. Марсианская программа России включает в первую очередь полномасштабное участие в европейском проекте «ЕхоMars», который содержит не только совместное



Межпланетные станции проекта «ЕхоMars».

проведение научных экспериментов, но и создание инфраструктуры, в частности объединенного наземного комплекса приема данных и управления межпланетными миссиями. Проект предполагает запуск с помощью российских носителей «Протон» двух космических аппаратов в 2016 и 2018 гг. На втором аппарате, с помощью разрабатываемого в НПО им.С.А.Лавочкина десантного модуля, будет доставлен на поверхность Марса марсоход Европейского космического агентства. Задача марсохода — геологические исследования и поиск следов жизни в подповерхностном слое грунта около места посадки.

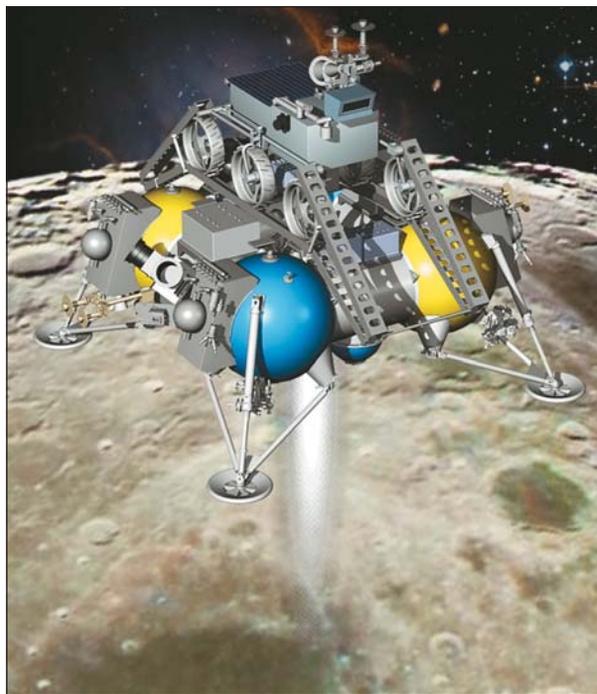
Затем, в 2022 г., планируется вернуться к задаче исследования спутника Марса — Фобоса, которая стояла перед проектом ФОБОС-ГРУНТ. Этот возврат символизирует даже само название нового проекта — БУМЕРАНГ. Доставка грунта с Фобоса остается интересной научной задачей, которую пока не предполагается решать в космических программах других стран. Кроме того, операции по забору вещества с Фобоса и его транспортировке на Землю позволят отработать технологии доставки грунта уже непосредственно с Марса. Такая миссия запланирована на 2020-е годы.

Что касается Марса, то он пока так и останется предметом изучения, а не освоения: планета находится от нас слишком далеко, чтобы сегодня можно было говорить о ее реальной пользе для человека. Да и сами возможности полета туда человека пока под большим вопросом. Проблемы связаны, прежде всего, с обеспечением радиационной безопасности экипажа миссии.

Луна — иное дело. Кроме научного она представляет и практический интерес. В частности, на Луне можно расположить астрономические обсерватории, наблюдениям которых не будут мешать атмосфера и радиоизлучения, как это имеет место на Земле и околоземных орбитах. И безусловно Луна, как наш естественный спутник, может стать источником ресурсов — прежде всего, редких элементов, запасы которых на Земле ограничены. Луна, очевидно, будет и первым этапом подготовки пилотируемой экспедиции на Марс, если трудности ее реализации все-таки удастся преодолеть.

Литература

1. Институт космических исследований РАН: 35 лет / Под ред. А.А.Галева, Г.М.Тамковича. М., 1999.
2. Зеленый Л.М., Зайцев Ю.И. Ради познания Вселенной // Наука в России. 2005. №5. С.24—32.
3. Георгий Иванович Петров: 100 лет со дня рождения первого директора Института космических исследований. М., 2012.
4. Зайцев Ю.И. Центр российской космической науки // Земля и Вселенная. 2005. №4. С.3—17.
5. Добриян М.Б. Дорога к звездам начинается в Тарусе // Русский инженер. 2011. №1. С.27.
6. Зеленый Л.М., Зайцев Ю.И. Автоматы могут всё! // Вестник НПО им.С.А.Лавочкина. 2014. №4. С.16—22.
7. Зеленый Л.М. 50 лет космической эры: некоторые итоги и перспективы исследований // Полет. 2008. №1. С.3—11.
8. Зеленый Л.М. О машинах и людях // Русский инженер. 2011. №1. С.24—26.



Доставка лунохода на лунную поверхность автоматической станцией «Луна-29».

Большой интерес представляет и изучение дальних рубежей Солнечной системы, что важно для понимания ее происхождения и эволюции. После 2020 г. Россия планирует запустить к Юпитеру (точнее к его спутнику Ганимеду) свою первую миссию с посадкой аппарата на его поверхность.

Полет в систему Юпитера займет около восьми лет и будет проходить по комбинированной баллистической схеме, включающей четыре гравитационных маневра у Венеры и Земли на гелиоцентрическом этапе миссии и завершающейся целым каскадом таких маневров около юпитерианских лун. Отдельную сложную задачу представляет и посадка на Ганимед. В целом, как по научным задачам, так и по технической сложности такая миссия может стать лидерским проектом отечественной космонавтики. ■

Две ближайшие сверхновые

Е.М.Чуразов

Взрывы сверхновых (Supernova, SN) — впечатляющие события, знаменующие последний этап в жизни звезд. Физика этих взрывов необычайно богата и интересна сама по себе. Кроме того, сверхновые служат важнейшими поставщиками всех известных нам элементов тяжелее гелия во Вселенной, включая радиоактивные изотопы. Фундаментальную роль играют они и в космологии. В частности, первые убедительные экспериментальные свидетельства ускоряющегося расширения Вселенной были получены именно из наблюдений сверхновых. Хотя в наше время каждый год открываются сотни далеких SN, у нас в ближайшей окрестности это редкое событие. Например, в нашей Галактике последнюю сверхновую видели в 1604 г. Поэтому каждая близкая вспышка становится для астрофизиков настоящим событием, позволяющим в деталях проверить теоретические модели. Отделу астрофизики высоких энергий ИКИ РАН необычайно повезло — удалось исследовать две ближайшие SN в эпоху, когда космические обсерватории позволяли напрямую детектировать рентгеновское и гамма-излучение этих объектов.

Долгая история

Китайские хроники 185 г. (почти двухтысячелетней давности) описывают появление звезды-гостя, оставшейся видимой



Евгений Михайлович Чуразов, член-корреспондент РАН, ведущий научный сотрудник отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН. Область научных интересов — теоретическая астрофизика, рентгеновская астрономия.

в течение нескольких месяцев. Это, вероятно, была первая зарегистрированная сверхновая в нашей Галактике, про которую мы знаем. Последующие почти полторы тысячи лет (вплоть до 1604 г.) дали еще семь похожих вспышек, видимых невооруженным глазом. После 1604 г. надежных записей в летописях о ярких сверхновых нет. Не было таких событий в Млечном Пути и в современную эпоху больших наземных телескопов и орбитальных обсерваторий. Зато колоссальная чувствительность телескопов позволила открыть многочисленные подобные звезды-гости в других галактиках.

Сам термин «сверхновая» был придуман Вальтером Бааде и Фрицом Цвики в 30-х годах прошлого века. Такое броское название было связано с надежными измерениями расстояния до туманности Андромеды, в которой очередная «звезда-гостя» была открыта еще в 1885 г. Стало ясно, что туманность — это другая галактика, далеко за пределами Млечного Пути. Бааде и Цвики осознали, какая колоссальная энергия должна выделиться, чтобы вспышка на таком расстоянии была видна с Земли. Этой энергии с запасом хватит, чтобы разорвать звезду, подобную Солнцу, что, конечно, означает, что звезда претерпевает изменения колоссального масштаба.

Вскоре Рудольф Минковский разработал и схему разделения сверхновых на основе их оптических спектров. Он выделил два главных класса: SN, в спектрах которых присутствуют линии водорода, отнес к классу II, а те, что их не имеют, — к классу I. Современная классификация, учитывающая более тонкие детали спектра и саму природу явления, более сложна, но нас сейчас интересуют только два по-прежнему главных типа сверхновых — II и Ia (подкласс сверхновых без линий водорода). Астрофизика предлагает убедительные физические модели таких звезд.

Заметим, что, хотя последняя вспышка SN в нашей Галактике была зафиксирована более 400 лет назад, прямые следствия этих со-

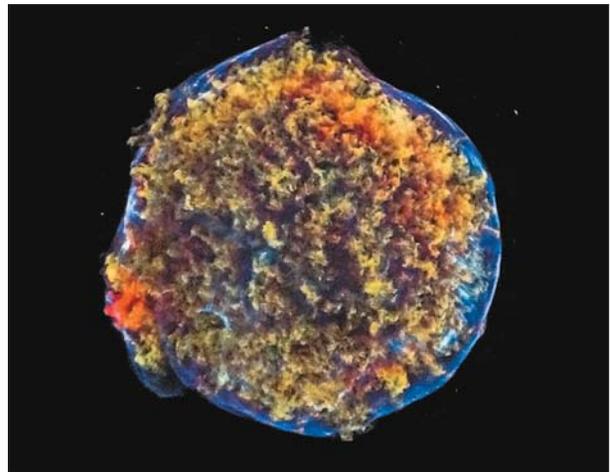
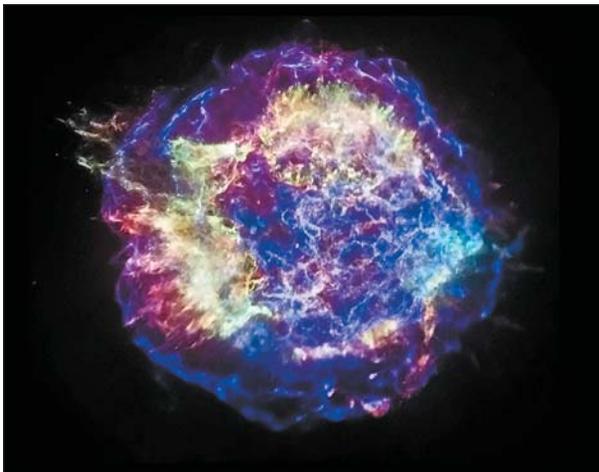


Рис.1. Рентгеновские изображения остатков двух вспышек сверхновых в нашей Галактике (обе в созвездии Кассиопеи): Кассиопея А (слева; вспыхнула примерно в 1650 г. ± 30 лет) и «Тихо Браге» (справа; вспыхнула в 1572 г.). Свечение остатков связано с взаимодействием разлетающегося вещества сверхновой с газом в галактике.

Фото NASA/CXC/SAO

бытий мы можем видеть и сегодня в виде «остатков вспышек сверхновых» на тех местах, где они были заметны сотни лет тому назад (рис.1). Эти наблюдения позволят нам многое узнать о распределении элементов в оболочке сверхновой и ее взаимодействии с газом в Галактике. Однако, чтобы ответить на ряд важных вопросов, необходимы измерения спектров сразу после взрыва, на масштабах месяцев и лет. Именно об этом пойдет речь ниже. Но сначала поясним, что представляют из себя звезды двух упомянутых типов.

Короткая, но яркая жизнь массивной звезды

Сверхновые типа II связаны с массивными звездами, превосходящими массу Солнца M_{\odot} в восемь или более раз. В таких звездах эволюция идет очень быстро, на масштабе десятков миллионов лет, при высочайших температурах (более миллиарда градусов). Сначала в ядре звезды выгорает водород, потом гелий и более тяжелые элементы, вплоть до железа. К моменту взрыва сверхновой звезда имеет слоистую структуру: железное ядро, окруженное слоями кремния, серы, кислорода и т.д., погруженными в массивную водородную оболочку. В железном ядре ни ядерные, ни термоядерные реакции не приводят к выделению энергии. Поэтому, как только железное ядро набирает достаточную массу, оно коллапсирует под действием гравитации и может превратиться в нейтронную звезду или черную дыру. Современные теоретические модели предсказывают, что в процессе коллапса электроны буквально «вдавливаются» в протоны, превращая их в нейтроны. Образующиеся при этом нейтрино выносят энергию из ядра и, несмотря на ничтожно малое сечение

взаимодействия с веществом, передают свою энергию водородной оболочке, приводя к ее разлету со скоростями порядка нескольких тысяч километров в секунду. Это и есть взрыв сверхновой типа II. Линии водорода в спектрах таких сверхновых напрямую связаны с наличием массивной водородной оболочки.

Белый карлик как термоядерная бомба

В отличие от вспышек SN типа II, к которым приводят процессы в массивных звездах, сверхновые типа Ia — порождение меньших звезд, например с массой порядка M_{\odot} . В таких звездах эволюция идет гораздо медленнее, температура в ядре гораздо ниже (сотни миллионов градусов), и термоядерные реакции не приводят к формированию железного ядра. Вместо этого во многих случаях образуется ядро, состоящее из углерода и кислорода. На этапе слоистого горения звезда сбрасывает свою внешнюю оболочку, и на месте звезды остается компактное ядро с массой около $0.5 M_{\odot}$ и диаметром ~ 10 тыс. км и, следовательно, с колоссальной плотностью $\sim 10^6$ г/см³. Температура в таком остатке слишком мала, чтобы запустить ядерные реакции горения углерода или кислорода. Однако остаток не сжимается под действием гравитации, поскольку давление в нем обеспечивается «вырожденными» электронами. Из принципа Паули, запрещающего двум одинаковым частицам с полужелтым спином находиться в одном квантовом состоянии, следует, что при большой плотности электронов их энергия не может быть меньше определенной величины, которая зависит от их плотности (такой электронный газ называется вырожденным). Эта энергия не связана с температурой электронов и не может быть «излуче-

на» остатком. Подобные остатки называются в астрофизике белыми карликами. Поддерживаемые давлением вырожденного электронного газа белые карлики способны существовать вечно. Однако их судьба может измениться, если масса будет возрастать. Например, белый карлик в двойной системе с обычной звездой постепенно «перетянет» вещество со звезды-компаньона. Или два белых карлика в очень тесной двойной системе сольются в один объект. Что будет происходить в этом случае? Сила гравитации в более массивном объекте возрастает, и белый карлик должен сжаться, чтобы увеличить давление и противостоять сжатию. При этом растет плотность электронов и, соответственно, их энергия. В какой-то момент последняя оказывается сравнимой с энергией покоя частицы — и вырожденный электронный газ становится релятивистским. Масса белого карлика, при которой это происходит, составляет $\approx 1.4 M_{\odot}$ и называется пределом Чандрасекара. Звезда, давление которой определяется вырожденным релятивистским газом, оказывается неустойчивой. Небольшое сжатие приводит к усилению гравитации, давление также возрастает, но не достаточно, чтобы остановить сжатие и вернуть звезду к исходному состоянию. Ситуация похожа на катастрофический коллапс железного ядра массивных звезд, когда ядро превращается в нейтронную звезду или черную дыру (сверхновую типа II). Белый карлик, достигший предела Чандрасекара, также мог бы стать нейтронной звездой. Однако есть важнейшее отличие: белый карлик состоит из углерода и кислорода, а не из железа. Углерод и кислород — отличное термоядерное топливо, если температура и плотность достаточно велики. Именно такие условия ожидаются в недрах белого карлика, масса которого приближается к пределу Чандрасекара. В результате вместо коллапса может произойти термоядерный взрыв, при котором углерод и кислород превратятся в более тяжелые элементы и полностью разрушат белый карлик — это и есть взрыв сверхновой типа Ia! Энергия, выделяемая при взрыве, так велика, что внешние слои белого карлика разлетаются со скоростями в десятки тысяч километров в секунду.

Год после взрыва

Итак, источники энергии взрыва в сверхновых этих двух типов различны. Но в обоих случаях свечение, наблюдаемое в течение последующих месяцев, обеспечивается не самой этой энергией, а радиоактивным распадом изотопов, которые синтезировались в процессе взрыва. Не будь его, сверхновые не должны были бы светить вовсе, поскольку разлетающееся вещество очень быстро остывает за счет расширения! В первый год свечения SN самый важный канал — такая цепочка рас-

падов: сначала радиоактивный никель $^{56}\text{Ni}_{28}$ превращается в радиоактивный кобальт $^{56}\text{Co}_{27}$, а тот уже переходит в стабильный изотоп $^{56}\text{Fe}_{26}$ (привычное нам всем железо). Схематично цепочка распадов проиллюстрирована на рис.2.

Энергия, выделяющаяся при распаде в виде гамма-квантов и позитронов, передается разлетающемуся веществу, нагревает его и приводит к появлению свечения в оптическом диапазоне. При этом масса радиоактивного никеля радикально отличается в сверхновых двух типов. Например, в сверхновой типа II SN1987A было синтезировано $0.07 M_{\odot}$ в виде радиоактивного никеля, в то время как в типичных сверхновых типа Ia его синтезируется в 10 раз больше. Это приводит к тому, что сверхновые типа Ia гораздо ярче, чем сверхновые второго типа, и современные оптические телескопы способны наблюдать такие сверхновые с космологических расстояний. Еще один плюс — физика термоядерных сверхновых (типа Ia) гораздо более «однородна». Именно эти обстоятельства позволяют использовать термоядерные сверхновые как «стандартные свечи» (эталонные светимости) в космологии. Наблюдения далеких сверхновых показали [1, 2], что они чуть более тусклые, чем ожидается во Вселенной, расширение которой постепенно замедляется. Результатом данных исследований стал вывод, что наша Вселенная, наоборот, расширяется с ускорением — феномен, получивший название «темная энергия». Эти работы в 2011 г. были удостоены Нобелевской премии.

С течением времени плотность разлетающегося вещества падает, гамма-кванты уже слабее задерживаются веществом и имеют шанс выйти наружу. В этот момент сверхновая должна превратиться в мощный источник гамма-излучения. Однако зафиксировать данное излучение совсем не просто. Несмотря на то, что где-то во Вселенной каждую секунду взрываются десятки сверхновых и каждый год сотни открываются в оптическом

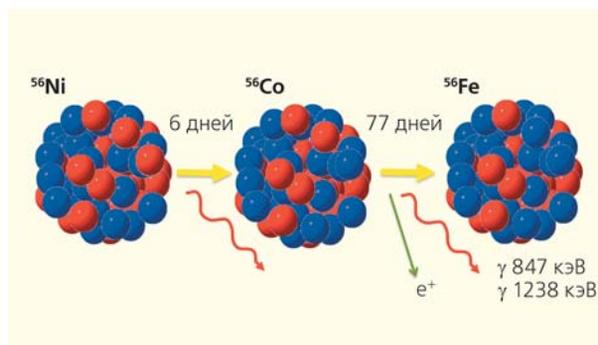


Рис.2. Упрощенная схема распада радиоактивного никеля $^{56}\text{Ni}_{28}$ в кобальт $^{56}\text{Co}_{27}$ (также радиоактивный), а затем в стабильный изотоп $^{56}\text{Fe}_{26}$. Энергия, выделяющаяся при распаде в виде гамма-квантов и позитронов, обеспечивает свечение сверхновой на масштабе месяцев и лет после взрыва.

диапазоне, большинство из них слишком слабы, чтобы их поток в гамма-диапазоне мог быть зарегистрирован. Причина проста — из-за высокой проникающей способности гамма-квантов требуется детектор большого размера, а из-за веса такой детектор не вывести на орбиту.

Таким образом, узнать что-то о гамма-излучении сверхновых с помощью современных обсерваторий можно, только если сверхновая вспыхнет в ближайшей окрестности. Поскольку в нашей Галактике сверхновые взрываются редко (примерно раз в 100 или 200 лет — термоядерные SN и в несколько раз чаще — SN типа II), основная надежда на область размером в несколько миллионов световых лет, в которую попадает несколько галактик, и где темп взрывов, соответственно, выше. Каждый взрыв сверхновой в этой области становится событием в жизни астрономов, и лучшие наземные и космические телескопы начинают интенсивные наблюдения близких сверхновых, чтобы не упустить столь редкий шанс. Удивительно, но сотрудники отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН оказались на редкость везучими: удалось исследовать две ближайшие сверхновые, имея на вооружении космические обсерватории, позволяющие напрямую измерять рентгеновское и гамма-излучение от этих объектов. По традиции каждая открытая сверхновая получает название, которое состоит из года открытия и одной или нескольких букв, обозначающих, какой по счету в этом году была открыта эта сверхновая. Например, сверхновая SN1987A — первая сверхновая, открытая в 1987 г., а SN2014J — десятая в 2014 г. Именно об этих сверхновых мы подробно и расскажем.

Гостя из Большого Магелланова Облака

Ближайшая к нам (в современную эпоху) сверхновая типа II вспыхнула 23 февраля 1987 г. в галактике Большое Магелланово Облако (рис.3), на расстоянии примерно 180 тыс. св. лет [3]. Масса взорвавшейся звезды составляла около $20 M_{\odot}$. Замечательно, что с такого небольшого по астрономическим меркам расстояния можно ожидать детектирования нейтрино, возникающих при коллапсе ядра. И нейтрино действительно были открыты установками «Kamiokande II» в Японии, IMB в США и на Баксанской нейтринной обсерватории в Приэльбрусье.

Следующим важнейшим этапом стал поиск рентгеновского

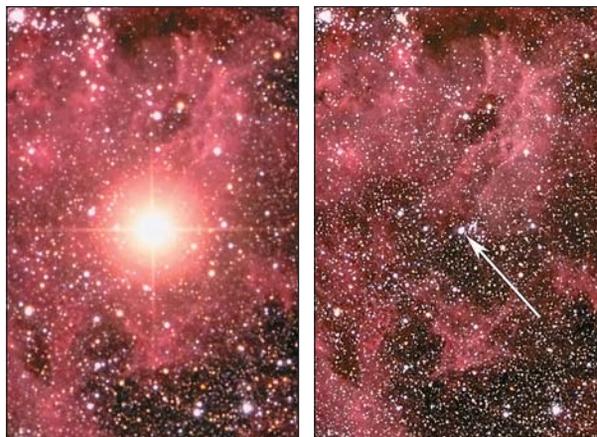


Рис.3. Изображение участка близкой галактики Большое Магелланово Облако в оптическом диапазоне после взрыва сверхновой 1987A. Справа показан тот же участок неба до взрыва.

Фото Anglo-Australian Observatory

и гамма-излучения, для чего необходимы орбитальные обсерватории, так как это излучение поглощается атмосферой Земли. По удачному стечению обстоятельств 31 марта 1987 г. с космодрома Байконур ракетой «Протон» был запущен на орбиту модуль «Квант» с рентгеновской обсерваторией на борту (рис.4). Эта обсерватория была результатом совместной работы ученых России, Германии, Нидерландов и Великобритании. Приборы обсерватории позволяли строить изображения

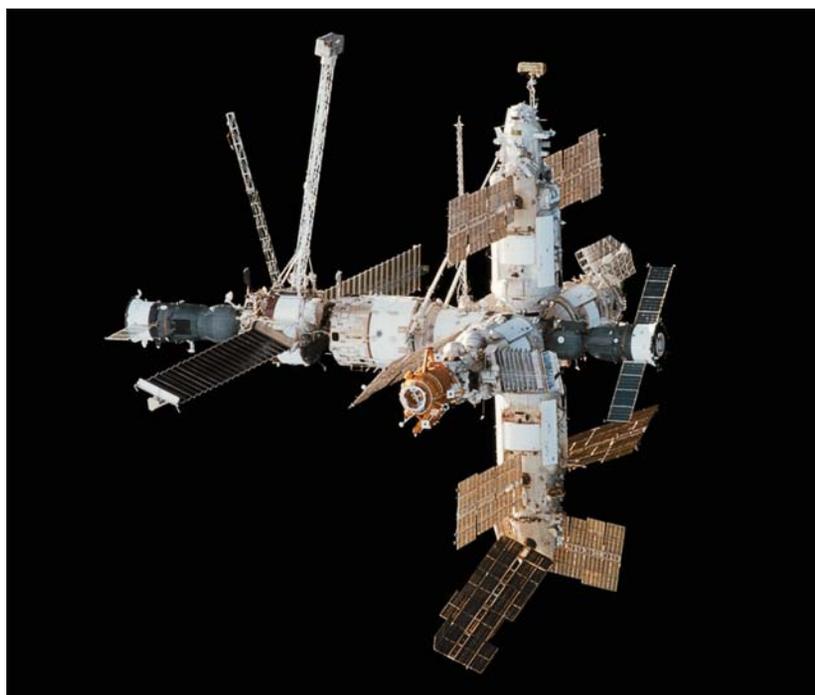


Рис.4. Модуль «Квант».

<http://wikimedia.org>

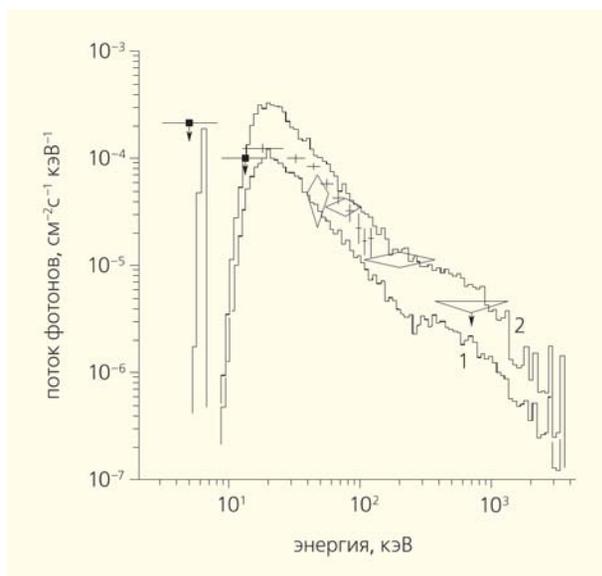


Рис.5. Спектр сверхновой SN1987A, зарегистрированный телескопами на модуле «Квант» [4]. Линиями показаны теоретические расчеты выходящих спектров.

и измерять спектры в диапазоне энергий от нескольких до 800 кэВ (подробнее результаты обсерватории описаны на странице отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН*).

Поскольку в сверхновых типа II масса оболочки очень велика, а скорость расширения умеренная (по сравнению с термоядерными сверхновыми), требуется заметное время, прежде чем уменьшающаяся толща оболочки позволит гамма-излучению выйти наружу. Тем не менее практически сразу после запуска модуля «Квант» его телескопы начали систематические наблюдения сверхновой в надежде увидеть ее рентгеновское излучение. В августе 1987 г. обсерватория впервые обнаружила необычный сигнал в направлении на сверхновую 1987A. Источник был виден на энергиях, превышавших 20 кэВ, и имел очень жесткий спектр (рис.5). Основная светимость приходилась на фотоны самых высоких энергий, доступных «Кванту», а при более низких энергиях излучение не наблюдалось. Подобная форма спектра характерна для жесткого гамма-излучения, проходящего через рассеивающую и поглощающую среду. Для фотонов высоких энергий (в сотни килоэлектронвольт) главную роль играет рассеяние на электронах в разлетающейся оболочке. При каждом рассеянии фотон теряет часть своей энергии (передает ее электрону) и сдвигается в сторону низких энергий. На достаточно низких энергиях (десятках килоэлектронвольт) фотопоглощение начинает доминировать и полностью подавляет излучение. Именно такой спектр и был обнаружен телескопами

модуля «Квант». Эти измерения позволили оценить массу радиоактивного никеля — уже упоминавшиеся 7% массы Солнца — и получить ограничения на распределение никеля в оболочке, который оказался в значительной степени перемешанным с ее веществом.

Взрыв в галактике M82

Сверхновая 1987A была сверхновой второго типа. Сверхновые типа Ia (термоядерные) взрываются в несколько раз реже, и пришлось ждать еще 27 лет, пока природа не предоставила нам шанс наблюдать другой тип сверхновых в нашей окрестности. И наконец 15 января 2014 г. сверхновая типа Ia взорвалась в галактике M82 (рис.6). Новость об (случайном!) открытии близкой сверхновой пришла 21 января 2014 г. Астрономом Стивом Фосси с группой студентов из Университетского колледжа Лондона, наблюдая M82 в небольшой телескоп, заметил новую яркую звезду, характеристики которой говорили о том, что мы имеем дело со сверхновой типа Ia. Она получила название SN2014J. Галактика M82 находится на расстоянии в 11 млн св.лет от нашей, что сразу сделало SN2014J кандидатом на ближайшую SNIa за последние несколько десятков лет. Такое редкое событие инициировало многочисленные наблюдения телескопов и обсерваторий во всем мире, включая обсерваторию ИНТЕГРАЛ (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory — INTEGRAL).

Эта международная астрофизическая лаборатория гамма-лучей — проект Европейского космического агентства (ЕКА) совместно с Роскосмосом и НАСА. Она была запущена 17 октября 2002 г. с космодрома Байконур ракетой-носителем «Протон» и продолжает свою работу. В проекте рос-



Рис.6. Галактика M82 со Сверхновой SN2014J. Снимок получен на 1.5-метровом Российско-турецком телескопе РТТ-150 сотрудниками Казанского федерального университета (И.Ф.Бикмаевым, И.М.Хамитовым, Э.Н.Иртугановым). Сверхновая — голубой объект чуть правее и ниже центра рисунка.

* <http://hea.iki.rssi.ru/ru/index.php?page=rentgen>



Рис.7. Обсерватория ИНТЕГРАЛ.

<http://sci.esa.int/integral>

сийские ученые имеют права на 25% наблюдательного времени миссии.

ИНТЕГРАЛ — первый в нашей стране астрофизический спутник, который работает как обсерватория (рис.7). Это означает, что исследователь из любого российского научного института или университета может подать заявку на проведение конкретного наблюдения на конкурс, проводимый раз в год. В случае успешного прохождения заявки ученый получает исключительное право на данные наблюдения, их анализ и публикацию полученных результатов в течение года с момента поступления данных. По данным обсерватории российскими учеными уже опубликовано в ведущих журналах около 300 работ, на которые уже получено более 4000 ссылок. Краткую сводку наиболее интересных результатов можно найти на нашей web-странице*.

Несмотря на то, что сверхновая SN2014J в 60 раз дальше, чем сверхновая 1987A, большая ожидаемая масса радиоактивного никеля и меньшая масса оболочки давали шанс на обнаружение гамма-излучения. Российский научный комитет проекта ИНТЕГРАЛ решил прервать регулярную программу и потратить миллион секунд из нашей кво-

ты наблюдательного времени на мониторинг этой сверхновой. Именно в ходе этой работы (примерно через 50 дней после взрыва) были обнаружены первые признаки распада радиоактивных элементов в спектре гамма-излучения SN.

Хотя оболочка термоядерной сверхновой гораздо менее массивна, чем у SN типа II, а расширяется она быстрее, ожидается, что и в таких сверхновых к моменту, когда оболочка станет достаточно прозрачной для гамма-излучения (40–60 дней после взрыва), большая часть радиоактивного никеля полностью распадется. Действительно, период полураспада никеля составляет всего 6 дней. Гораздо дольше живет радиоактивный кобальт — его период полураспада равен 77 дням. Таким образом, простые теоретические аргументы предсказывают, что главным признаком наличия синтезированных радиоактивных элементов должны быть яркие линии, характерные для распада кобальта-56. Таких линий две: на энергиях 847 и 1238 кэВ (мы знаем эти энергии из наземных экспериментов). Наблюдения обсерватории ИНТЕГРАЛ обнаружили излучение от сверхновой 2014J именно на этих энергиях (рис.8)! Зафиксированный поток свидетельствует, что $\approx 0.6 M_{\odot}$ радиоактивного никеля было синтезировано в процессе термоядерного взрыва звезды. Кроме того, быстрое расши-

* <http://hea.iki.rssi.ru/ru/index.php?page=integral>

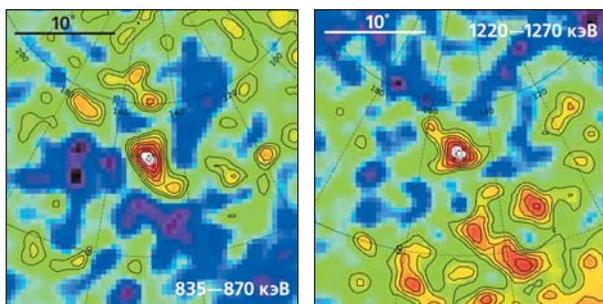


Рис.8. Изображения в гамма-лучах участка неба вокруг галактики M82, в которой в январе 2014 г. взорвалась сверхновая 2014J, полученные обсерваторией ИНТЕГРАЛ [5]. При распаде радиоактивного кобальта-56 основная энергия выделяется в виде гамма-квантов с энергией 847 (слева) и 1238 кэВ (справа). Именно на этих энергиях обсерватория «увидела» сверхновую.

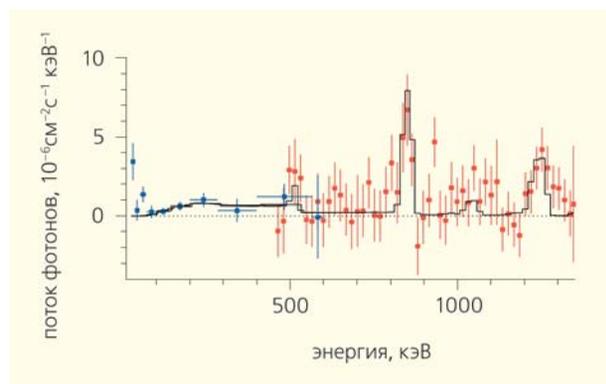


Рис.9. Спектр сверхновой SN2014J в галактике M82, измеренный обсерваторией ИНТЕГРАЛ [5]. Черной линией показан теоретический расчет выходящего излучения после термоядерного взрыва белого карлика.

рение остатков взрыва должно приводить к уширению линий, которое также удалось измерить, — характерная скорость оказалась близка к 10 тыс. км/с. Наряду с гамма-фотонами, распад кобальта-56 в 19% случаев должен приводить к образованию позитронов. Теоретические расчеты показы-

вают, что большая часть этих позитронов должна аннигилировать внутри разлетающейся оболочки, приводя к характерным особенностям в спектре сверхновой — линии на энергии 511 кэВ (энергия покоя электрона и позитрона) и широкому континууму при более низких энергиях. Именно такую картину и дали измерения спектра сверхновой (рис.9). В целом наблюдения ИНТЕГРАЛА хорошо согласуются с предсказаниями канонических моделей термоядерных взрывов [6] белых карликов с массой, близкой к пределу Чандрасекара. Такое совпадение полностью подтверждает теоретическую концепцию сверхновых Ia и позволяет предположить, что по крайней мере в гамма-лучах SN2014J выступает типичным представителем класса сверхновых типа Ia.

Ждем подарка от Млечного Пути!

Несмотря на долгую историю наблюдений и численных экспериментов, детальная физика взрывов сверхновых обоих типов и эволюция компактной звезды-предшественника сверхновой типа Ia до взрыва остаются предметом горячих споров. Наблюдения в рентгеновском и гамма-диапазонах стали блестящим подтверждением теоретической концепции взрывов сверхновых, но многие детали еще предстоит выяснить. Хотя обе SN — самые близкие сверхновые в нашу эпоху, в гамма-лучах это необычайно слабые объекты, которые сложно изучать. По сравнению с SN2014J последняя сверхновая в нашей Галактике (датированная, как уже говорилось, 1604 г.) должна была быть в 300 тыс. раз ярче! Со времени ее вспышки прошло уже больше 410 лет... при ожидаемом темпе примерно одна термоядерная сверхновая в столетие. Можно сказать, что Галактика «задолжала» нам по-настоящему яркую звезду-гостью. Конечно, отсутствие сверхновых в течение 400 лет не влияет на вероятность появления такой звезды завтра. Тем не менее есть шанс, что в ближайшие десятилетия Природа подарит нам еще одну возможность исследовать эти интереснейшие объекты во всех деталях. ■

Литература

1. Riess A.G., Filippenko A.V., Challis P. et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating Universe and a cosmological constant, 1998 // The Astronomical Journal. 1998. V.116. Iss.3. P.1009—1038.
2. Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al. Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae // The Astrophysical Journal. 1999. V.517. Iss.2. P.565—586.
3. Имшенник В.С., Надёжин Д.К. Сверхновая 1987А в Большом Магеллановом Облаке: наблюдения и теория // УФН.1988. Т.156. С.561—651.
4. Sunyaev R., Kaniouky A., Efremov V. et al. Discovery of hard X-ray emission from supernova 1987A // Nature. 1987. V.330. P.227—229.
5. Churazov E., Sunyaev R., Isern J. et al. ^{56}CO γ -ray emission lines from the type Ia supernova SN2014J // Nature. 2014. V.512. P.406—408.
6. Hillebrandt W., Niemeyer J. // Type Ia supernova explosion models // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 2000. V.38. P.191—230.

Магнитный «мотор» сверхновых

Г.С.Бисноватый-Коган, С.Г.Моисеенко

Одно из самых мощных и ярких явлений во Вселенной — вспышка (взрыв) сверхновой — для наблюдателя выглядит как резкий (в 10^8 – 10^{10} раз) рост светимости звезды. Сильное свечение продолжается от нескольких до десятков дней, а затем яркость звезды убывает. Сам термин «сверхновая» может ввести в заблуждение, поскольку с физической точки зрения взрыв такой звезды представляет собой конечную стадию ее эволюции. Как показывают наблюдения, энергия взрыва сверхновой, выделяемая в виде излучения и (в основном) в виде кинетической энергии выброшенного вещества, составляет $\sim 10^{50}$ – 10^{52} эрг. Исторически сложившаяся классификация этих звезд по типам I и II — по отсутствию или наличию в их спектрах линий водорода — довольно формальна. Более содержательно их разделение на две больших группы по физическому механизму вспышки: термоядерные сверхновые (тип Ia) и сверхновые с коллапсирующим ядром (типы II и Ib,c). Взрыв первых представляет собой термоядерный взрыв белого карлика с массой, превышающей чандрасекаровский предел. Многомерные численные расчеты для этого случая позволяют получить количественные характеристики, более или менее соответствующие наблюдательным данным. Природа же взры-



Геннадий Семенович Бисноватый-Коган, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела прикладной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии ИКИ РАН. Область научных интересов — сверхновые, аккреция, нейтронные звезды и черные дыры, астрофизика высоких энергий, темная материя.



Сергей Григорьевич Моисеенко, доктор физико-математических наук, заведующий тем же отделом. Занимается физикой сверхновых, магнитной гидродинамикой, численным моделированием.

вов сверхновых с коллапсирующим ядром все еще до конца не ясна. В попытках объяснить ее современная астрофизика предлагает несколько механизмов, однако, как показывают многомерные численные расчеты, большинство из них либо вообще не приводят к взрыву, либо дают слишком малую его энергию. Какие идеи здесь наиболее перспективны?

Эволюция в цифрах

Вещество во Вселенной состоит в основном из водорода (~70% по массе) и гелия (~30%). Когда звезда конденсируется из межзвездного вещества, она начинает интенсивно излучать энергию, черпая ее в реакции превращения водорода в гелий ^4He , при которой выделяется $6 \cdot 10^{18}$ эрг/г. Процесс горения водорода занимает основную долю времени эволюции звезды. После его выгорания начинается реакция превращения гелия в углерод ^{12}C и кислород ^{16}O , затем — образование

© Бисноватый-Коган Г.С.,
Моисеенко С.Г., 2015

магния ^{24}Mg , кремния ^{28}Si , серы ^{32}S и т.д., пока не образуется железо ^{56}Fe — элемент с самой большой энергией связи. Энергия, выделяющаяся при превращении ^4He в ^{56}Fe , в четыре раза меньше, чем при реакции, порождающей гелий ($1.6 \cdot 10^{18}$ эрг/г). После истощения водородных ресурсов звезда продолжает сжатие, что приводит к росту температуры и давления, светимость увеличивается на 1–3 порядка. Термоядерные реакции с участием гелия начинаются при температуре $\sim 10^8$ К. На самых поздних этапах горения происходит огромная потеря энергии за счет излучения нейтрино. Последняя может на много порядков превышать обусловленную фотонной светимостью.

После образования в центре звезды железного ядра энергия продолжает расходоваться на излучение фотонов и (большой частью) нейтрино. Ее источником на этом этапе служит гравитационное сжатие, при котором температура в центре звезды увеличивается. Когда та достигает величины $\sim 5 \cdot 10^9$ К, начинается реакция распада железа на нейтроны, протоны и ядра гелия (n , p , ^4He), при которой энергия, наоборот, поглощается. Теперь уже рост внутреннего давления звезды при сжатии не может скомпенсировать роста сил гравитации — происходит потеря устойчивости, и начинается быстрое сжатие со скоростью свободного падения (коллапс). Коллапс останавливается, когда плотность вещества в центральных областях сжимается до значений $\sim 10^{14}$ г/см 3 . При таких параметрах уравнение состояния вещества становится «жестким», т.е. для дальнейшего роста плотности требуется гораздо большее увеличение давления. В результате коллапса, как правило, происходит формирование нейтронной звезды. При коллапсе более массивных ядер должна образоваться черная дыра, но возможность взрыва сверхновой при этом остается под вопросом. Почти вся энергия связи образующейся нейтронной звезды, достигающая 20% ее массы, передается слабо взаимодействующим

нейтрино. Последние уносят энергию $\sim 6 \cdot 10^{53}$ эрг, значительно превышающую наблюдаемую кинетическую энергию выброса и тем более энергию электромагнитного излучения.

Такая схема эволюции звезды, вплоть до вспышки сверхновой, была предложена в 1960 г. английским астрофизиком Ф.Хойлом и американским физиком У.Фаулером. После коллапса происходит расширение внешней оболочки с огромным увеличением светимости. Это и есть вспышка (т.е. взрыв) сверхновой, пример которой представлен на рис. 1.

Возможные механизмы взрыва

Одним из первых механизмов взрыва сверхновых с коллапсирующим ядром был нейтринный механизм, предложенный С.Колгейтом и Р.Уайтом в 1966 г. [1]. Идея состояла в том, что при коллапсе происходит переход части гравитационной энергии связи в энергию нейтрино, поток которых вылетает, проходя через внешние слои падающего и выбрасываемого вещества. При образовании нейтронной звезды после остановки коллапса ядра на некотором расстоянии от него формируется ударная волна, встречая которую, падающее вещество звезды останавливается. При больших плотностях ($\sim 10^{14}$ г/см 3) вещество практически непрозрачно для нейтрино, но, если плотность немного меньше, нейтрино уходят почти свободно, покидая поверхность нейтриносферы (аналог фотосферы звезды для излучения). Происходит нагревание вещества за счет взаимодействия с ним нейтрино (так называемая депозиция нейтрино). Предполагалось, что нейтринная вспышка должна привести к «выталкиванию» ударной волны наружу и взрыву сверхновой. Однако дальнейшие более точные расчеты показали низкую эффективность такого взрыва, энергия которого оказалась существенно меньше наблюдаемой.

В 1977 г. Р.Эпштейн показал, что горячее вещество в ядре с мощным нейтринным потоком конвективно неустойчиво, и предложил для объяснения взрыва коллапсирующих сверхновых использовать «нейтринную конвекцию» [2]. Конвекция будет выносить высокоэнергичные нейтрино из внутренних областей и (за счет роста сечения взаимодействия с энергией) усилит процесс «выталкивания» вещества наружу, что могло бы привести к взрыву сверхновой. Но, когда были проведены одномерные, а затем двух- и трехмерные численные расчеты, выяснилось, что учет нейтринной конвекции не решает проблему. В результате коллапса железного ядра происходит формирование ударной волны на расстоянии 10–20 км от центра звезды. Нейтринная вспышка продвигает ударную волну наружу, однако волна либо останавливается на расстоянии 100–200 км от центра (и взрыва сверхновой вообще не происходит), либо продолжает

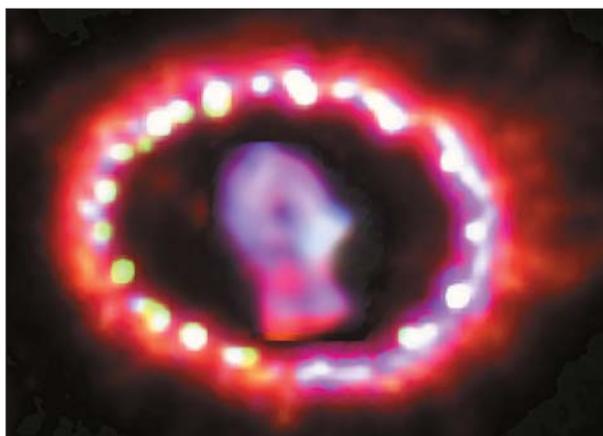


Рис. 1. Сверхновая 1987А, вспыхнувшая 23 февраля 1987 г. в Большом Магеллановом Облаке.

двигаться наружу, что приводит к выбросу энергии, но опять недостаточной для объяснения взрыва — не более 10^{49} эрг.

Разработка представлений о нейтринном механизме взрыва сверхновых продолжается с привлечением различных дополнительных эффектов, чему посвящены публикации В.М.Чечеткина с коллегами, Т.Янки и др.

Другой возможный механизм взрыва сверхновой связан с неустойчивостью стоячей аккреционной ударной волны (Standing Accretion Shock Instability, SASI). Впервые SASI применили в физике коллапсирующих сверхновых Дж.Блондин, А.Мецакаппа и С.ДеМарино, затем ее использовал Т.Фоглиццо. Подход предполагает развитие нерадиальных возмущений аккрецирующей ударной волны, что может привести к выходу ударной волны во внешние слои звезды и взрыву сверхновой. Но увы — многочисленные численные расчеты механизма SASI также не позволяют получить взрыв сверхновой с достаточной энергией.

В 1992 г. В.С.Имшенник предложил механизм взрыва коллапсирующих сверхновых, основанный на делении коллапсирующего ядра на две части, одна из которых — нейтронная звезда [3]. Благодаря гравитационному излучению части разделившегося ядра сближаются, возникает перетекание вещества. Когда масса менее массивной компоненты достигнет нижнего предела масс нейтронных звезд, может произойти выделение энергии, связанное с бета-распадами нейтронов и ядер маломассивной нейтронной звезды. Прямое трехмерное численное моделирование такого процесса осуществить в настоящее время сложно. Упомянем лишь, что для реализации этого механизма требуется очень быстрое вращение звезды перед вспышкой (предсверхновой).

Магниторотационные сверхновые

В 1970 г. один из авторов настоящей статьи (Г.С.Бисноватый-Коган) выдвинул идею, что при анализе механизма взрыва сверхновых надо учитывать начальное магнитное поле и вращение предсверхновой [4].

Вращение — важная характеристика звезды. Скорость вращения звезды не может превышать критической величины, при которой центробежная сила уравновешивает гравитационную; в противном случае вещество «прессуется» в диск. Реально у наиболее быстро вращающихся звезд скорость на поверхности не превышает 1/4 от критической, а энергия вращения не больше 1% от гравитационной. При медленном сжатии момент вращения успевает передаваться наружу, например, за счет истечения вещества, и влияние вращения остается малым. После потери устойчивости начинается быстрое сжатие, в процессе которого обмен моментом вращения между различны-

ми слоями звезды произойти не успевает. В ходе сжатия еще и часть гравитационной энергии переходит в энергию вращения (в основном в энергию вращения ядра).

Во вращающейся звезде есть большой запас энергии, который нейтрино в силу закона сохранения момента вращения унести не могут — это как раз энергия вращения. Ее запас (в звезде, вращающейся твердотельно с критической скоростью) равен примерно $3 \cdot 10^{52}$ эрг и вполне достаточен для объяснения выхода энергии в сверхновой.

Итак, энергия взрыва при магниторотационном его механизме берется из вращательной энергии предсверхновой. Магнитное поле позволяет трансформировать энергию вращения в радиальную кинетическую энергию. Неоднородный коллапс железного ядра приводит к дифференциальному вращению. Если есть полоидальное магнитное поле, то в условиях такого неоднородного вращения должно возникнуть и тороидальное поле, усиливающееся со временем. Сильное тороидальное поле позволяет преобразовать часть кинетической энергии вращения в радиальную кинетическую энергию (энергию взрыва).

Результаты одномерного численного моделирования магниторотационного механизма взрыва сверхновой с коллапсирующим ядром были представлены уже в работе [5]. Звезда рассматривалась там как вращающийся гравитирующий бесконечный цилиндр (рис.2). Центральная часть нейтронной звезды (вплоть до радиуса R_0), предполагалась несжимаемой.

Как показали дальнейшие одномерные расчеты, дифференциальное вращение при наличии начального полоидального магнитного поля действительно приводит к возникновению и линейному росту со временем тороидальной компонен-

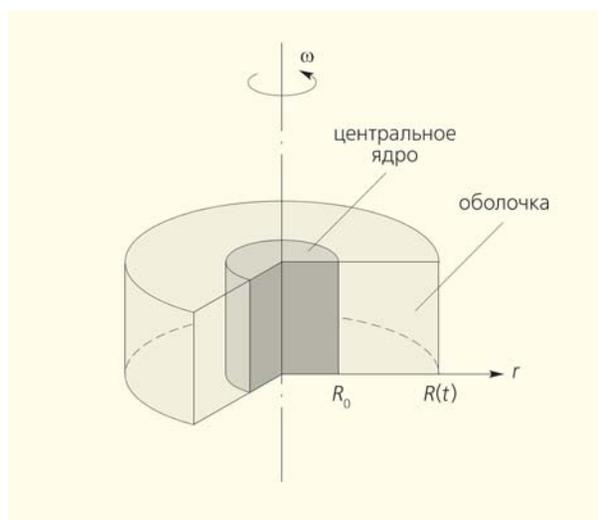


Рис.2. Одномерная модель магниторотационной сверхновой в виде цилиндра, вращающегося вокруг оси с угловой скоростью ω [4].

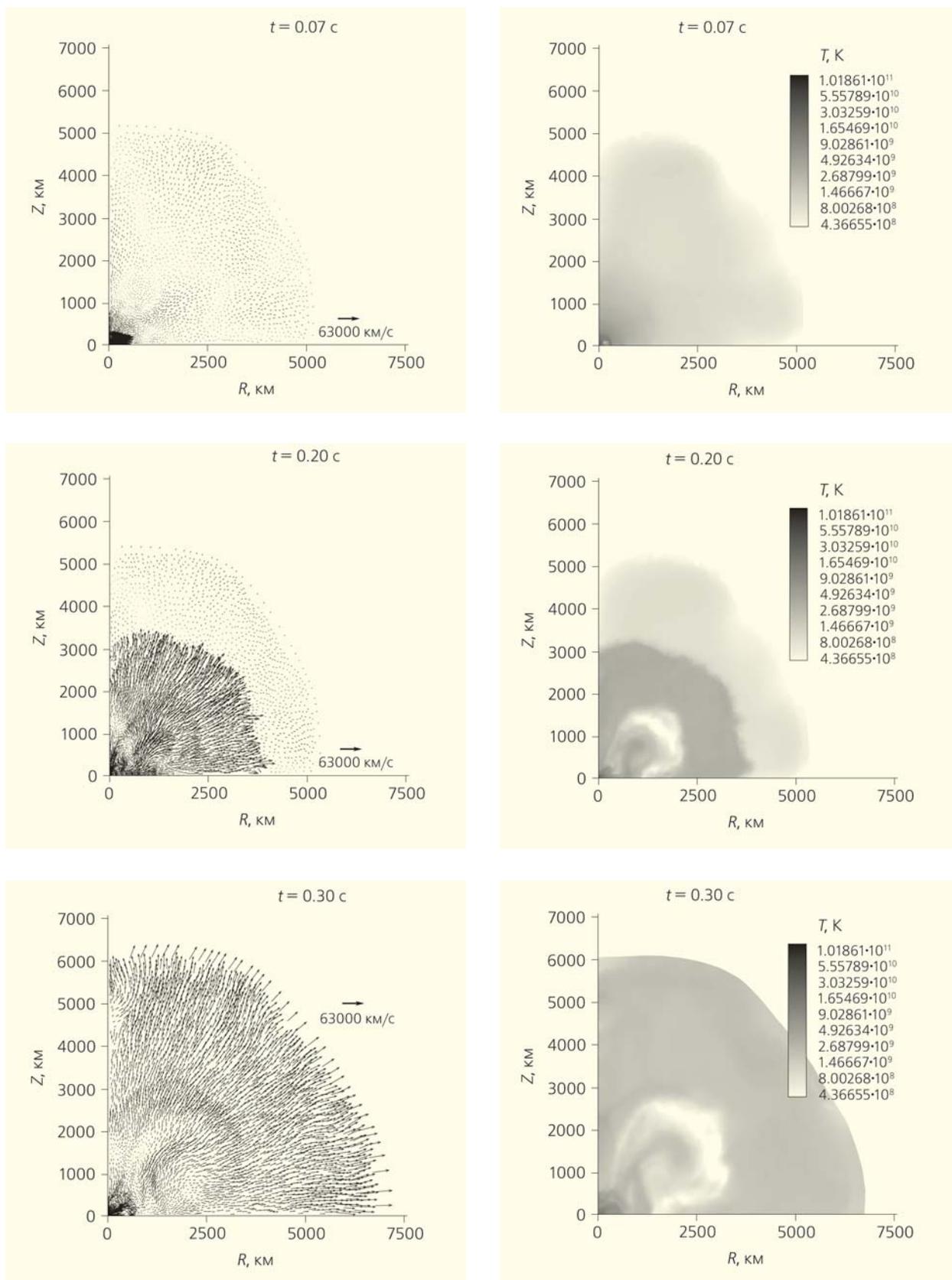


Рис.3. Результаты двумерных расчетов магниторотационной сверхновой. Временная эволюция поля скоростей (левый столбец) и поля температур (правый столбец) для указанных моментов времени t . Начальное магнитное поле — квадруполь.

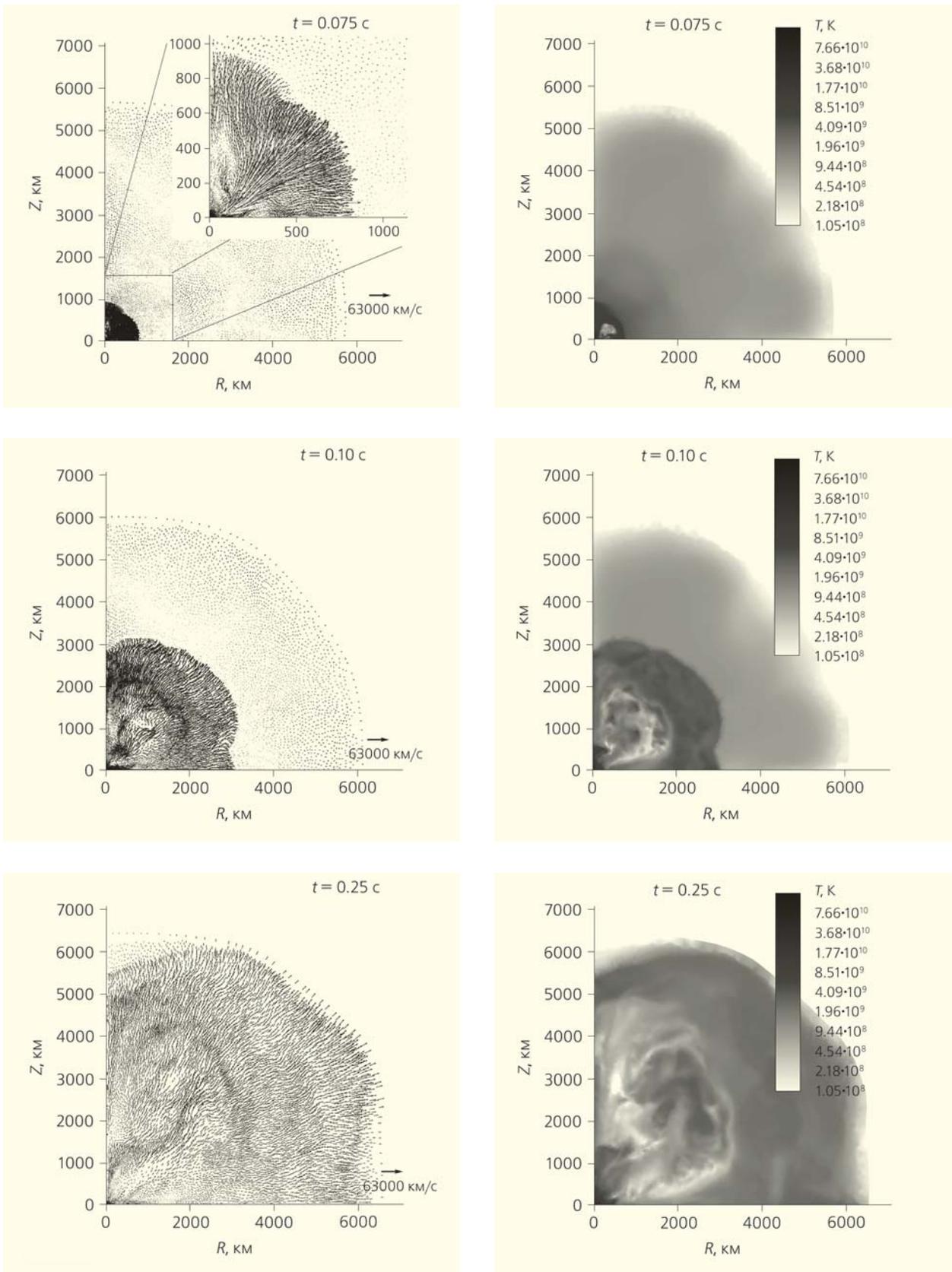


Рис.4. Результаты двумерных расчетов магниторотационной сверхновой. Временная эволюция поля скоростей (левый столбец) и поля температур (правый столбец) для указанных моментов времени t . Начальное магнитное поле — диполь.

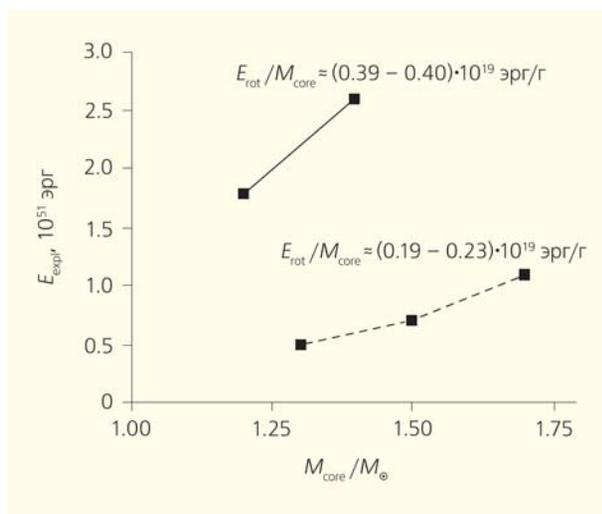


Рис.5. Зависимость энергии взрыва магниторотационной сверхновой от массы ядра при различных значениях удельной энергии вращения перед началом эволюции магнитного поля $E_{\text{rot}}/M_{\text{core}}$ (т.е. перед коллапсом).

ты магнитного поля [6]. Возникает волна уплотнения, движущаяся по спадающему фону плотности. Амплитуда этой волны растет со временем. Волна трансформируется в ударную магнитогидродинамическую волну. Выход ударной волны в наружные слои оболочки предсверхновой и приводит к взрыву сверхновой. Время развития процесса зависит от отношения начальной магнитной энергии к начальной гравитационной. Из данных наблюдений следует, что отношение этих энергий в предсверхновой составляет $10^{-6} - 10^{-8}$. Наличие такого малого параметра в магнитогидродинамических уравнениях, описывающих магниторотационный механизм взрыва сверхновой, представляет трудность для численного моделирования этой задачи.

Литература

1. Calgate S.A., White R.H. The hydrodynamic behavior of supernovae explosions // *Astrophysical Journal*. 1966. V.143. P.626—681.
2. Epstein R.I. Mechanisms for supernova explosions // *Astrophysics and Space Science Library*. 1977. V.66. P.183.
3. Имшенник В.С. Возможный сценарий взрыва сверхновой в условиях гравитационного коллапса массивного звездного ядра // *Письма в «Астрономический журнал»*. 1992. Т.18. С.489—504.
4. Бисноватый-Коган Г.С. О механизме взрыва вращающейся звезды как сверхновой // *Астрономический журнал*. 1970. Т.47. С.813—816.
5. Бисноватый-Коган Г.С., Попов Ю.П., Самохин А.А. Магнитогидродинамическая ротационная модель взрыва сверхновой // *Astrophysics and Space Science*. 1976. V.41. P.321—356.
6. Арделян Н.В., Бисноватый-Коган Г.С., Попов Ю.П. Исследование магниторотационного взрыва в цилиндрической модели // *Астрономический журнал*. 1979. Т.56. С.1244—1255.
7. Ardeljan N.V., Bisnovatyi-Kogan G.S., Moiseenko S.G. Magnetorotational supernovae // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2005. V.359. P.333—344.
8. Moiseenko S.G., Bisnovatyi-Kogan G.S., Ardeljan N.V. A magnetorotational core-collapse model with jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2006. V.370. P.501—512.
9. Бисноватый-Коган Г.С., Моисеенко С.Г., Арделян Н.В. Различные магниторотационные сверхновые // *Астрономический журнал*. 2008. Т.85. С.1109—1121.

Как впервые показали наши двумерные численные расчеты, форма взрыва магниторотационной сверхновой существенно зависит от начальной конфигурации магнитного поля [7, 8] (рис.3, 4). Для начального магнитного поля дипольного типа взрыв происходит преимущественно вдоль оси вращения, что может в процессе его развития привести к формированию слабоколлимированного направленного струйного выброса — джета. В случае когда начальное магнитное поле представляет собой квадруполь, подобный взрыв распространяется в основном вблизи экваториальной плоскости. Из наших расчетов следует, что энергия взрыва сверхновой зависит от массы ядра и начальной энергии вращения и может достигать $2.6 \cdot 10^{51}$ эрг [9] (рис.5).

На начальной стадии эволюции магнитного поля его тороидальная компонента увеличивается линейно, затем происходит экспоненциальный рост тороидальной и полоидальных компонент магнитного поля. Возникает магниторотационная неустойчивость, что приводит к сокращению времени развития такого взрыва.

Как видим, магниторотационный механизм взрыва сверхновой позволяет получить в расчетах энергию вспышки, соответствующую наблюдениям. Форма взрыва качественно зависит от начальной конфигурации магнитного поля.

* * *

Несмотря на наличие нескольких возможных механизмов взрыва сверхновых с коллапсирующим ядром, пока при многомерном численном моделировании лишь магниторотационный дает энергию взрыва, сопоставимую с наблюдениями. Кроме того, у этого механизма есть еще один «бонус» — при подобном взрыве сверхновых возможно формирование узконаправленных струйных выбросов — коллимированных джетов, которые могут быть причиной гамма-всплесков. ■

Арктика. Космическая погода

Л.М.Зеленый, А.А.Петрукович

Арктический регион в последние годы находится в центре особого внимания. Для России, помимо очевидных ресурсного и транспортного факторов, действует еще один — освоение Арктики становится и одной из основных движущих сил развития страны в XXI в. За советское время в Арктике были построены не только отдельные поселки и заводы, но и созданы два промышленных района — кольский и норильский, с сотнями тысяч населения и соответствующей инфраструктурой, без которых сегодня трудно представить себе отечественную экономику. И в этом состоит ключевое отличие российского подхода к освоению от американского и канадского, где постоянных структур такого масштаба нет. На рубеже веков начато создание еще одного района — на севере западной Сибири и на Ямале. Помимо развития нефтегазового комплекса здесь в перспективе планируется и прямой выход к арктическим портам из уральского региона. Если сегодняшняя тенденция на потепление климата сохранится, значение этого нового транспортного коридора будет трудно переоценить.

Советское освоение Арктики опиралось на солидную научную основу — открывались новые обсерватории, проводились экспедиции. Изучались не только полезные ископаемые, климат и льды, но и факторы воздействия космической среды. Хотя сейчас и принимаются ме-



Лев Матвеевич Зеленый, вице-президент РАН, академик, доктор физико-математических наук, директор ИКИ РАН, профессор Московского физико-технического института. Научные интересы связаны с плазменными процессами в космической среде, физикой и эволюцией Солнечной системы. Член ряда международных научных организаций. Член редколлегии «Природы».



Анатолий Алексеевич Петрукович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий отделом физики космической плазмы ИКИ РАН. Лауреат медали им.Я.Б.Зельдовича РАН для молодых ученых. Занимается изучением солнечно-земных связей, динамики магнитосферы Земли, практических аспектов космической погоды.

ры к восстановлению научной сети, объем современных наблюдений все еще сильно отстает от масштабов имевшегося, например, во время Международного геофизического года в 1957—1958 гг. В результате актуальной становится задача оптимизировать эту научную поддержку, нацелить ее на реальные потребности.

Во время прошедшей в декабре 2014 г. сессии РАН по Арктике большинство докладчиков показывали фотографии белых медведей и полярных сияний — двух традиционных символов региона. Но никто не говорил, что оба эти символа могут быть весьма опасны — особенно те явления, видимой частью которых становятся полярные сияния. Это не просто замечательное, потрясающее воображение световое шоу, которое дарит нам арктическая (и антарктическая) природа и которое надо увидеть хотя бы раз в жизни, а последнее звено в сложной цепочке плазменных процессов, связывающих Солнце и Землю и объединяемых термином «космическая погода». Все живые организмы находящиеся в Арктике, а также все расположенные здесь технические системы подвержены ее влиянию. Именно этой теме и посвящена данная статья. Сначала мы

объясним вкратце общую физическую схему связи космической погоды с полярной зоной, а затем остановимся на нескольких основных нерешенных научных проблемах.

Посланники Солнца

Главный фактор, действующий на Землю из космоса, — это поток солнечного света и тепла, он постоянен с точностью до десятых долей процента (составляя после некоторых коррекций на эллиптичность орбиты Земли $1366\text{--}1367\text{ Вт/м}^2$) и даже так и называется — «солнечная постоянная». (Что не противоречит многообразию климатических зон и смене времен года — за них отвечает угол падения излучения на земную поверхность.) Основное переменное во времени воздействие на Землю тоже связано с Солнцем, но по переносимой энергии оно в тысячу раз слабее потока солнечного света. Это поток плазмы (протонов и электронов относительно небольшой энергии — $10\text{--}1000\text{ эВ}$) и магнитного поля, исходящий из короны Солнца. Поток этот, движущийся со сверхзвуковой скоростью, получил романтическое название «солнечный ветер». Ветер в том или ином виде растекается от Солнца всегда, но после солнечных вспышек происходят выбросы плазмы, приводящие к аномальному усилению этого потока. От него (и от космической радиации) нас более или менее успешно защищает магнитное поле Земли, имеющее сейчас достаточно большую величину. Более подробно о солнечном ветре и космической погоде можно прочитать в одной из предыдущих статей в журнале*.

В достаточно разреженной межпланетной среде ионы и электроны свободнее всего движут-

ся вдоль вектора магнитного поля, но их поперечное смещение затруднено — частицы, подчиняясь силе Лоренца, как бы навиваются на условное направление поля. Поэтому удобно говорить о вымышленных объектах — силовых линиях магнитного поля, выделяемых плазмой. Магнитное поле Земли можно представить себе как магнитный диполь. Магнитные полюса Земли (полюса диполя) почти совпадают с географическими, а ось вращения почти перпендикулярна направлению на Солнце. В такой схеме Земля встречает солнечный ветер «самым защищенным боком», поперек собственного магнитного поля. Поэтому прямое воздействие солнечного ветра на Землю минимизировано. Данная конфигурация, кстати говоря, вовсе не предопределена: магнитная ось, например, Нептуна лежит почти в плоскости эклиптики. В результате поток плазмы солнечного ветра в целом обтекает магнитное поле Земли, формируя своим давлением магнитосферу (рис.1), похожую по форме на комету с длинным магнитным хвостом [1].

Исключением из этой схемы остаются полярные и приполярные области Земли, иногда соединяющиеся магнитным полем с межпланетным пространством и приграничными зонами магнитосферы. Только здесь плазма имеет возможность проникнуть к Земле вдоль магнитного поля. «Высыпаясь» в атмосферу, она возбуждает при столкновениях атомы и молекулы нейтральной атмосферы, вызывая полярные сияния — самое яркое из многочисленных свечений атмосферы Земли.

Зона полярных сияний в глобальном масштабе формирует так называемый авроральный овал — своеобразное светящееся кольцо вокруг полюса. Его хорошо видно со спутника в ультрафиолетовом диапазоне длин волн (рис.2). Магнитное поле из аврорального овала уходит во внешнюю магнитосферу на расстояния, часто большие 50 тыс. км. Более темная зона внутри овала соответствует

* Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М. «Ветер, ветер, ты могуч...» Солнечный ветер и космическая погода // Природа. 2005. №9. С.4—14.

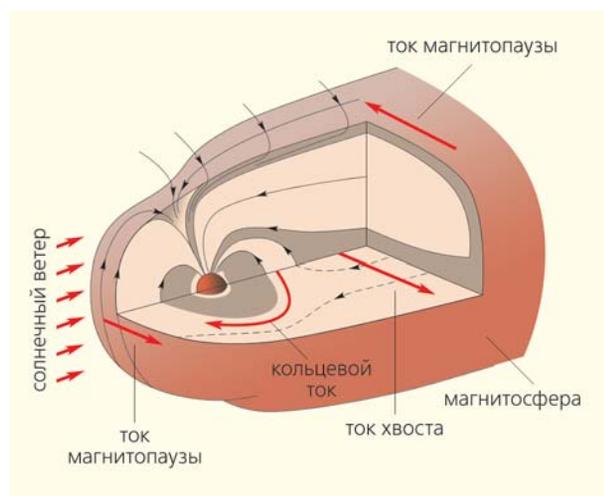


Рис.1. Магнитосфера Земли.

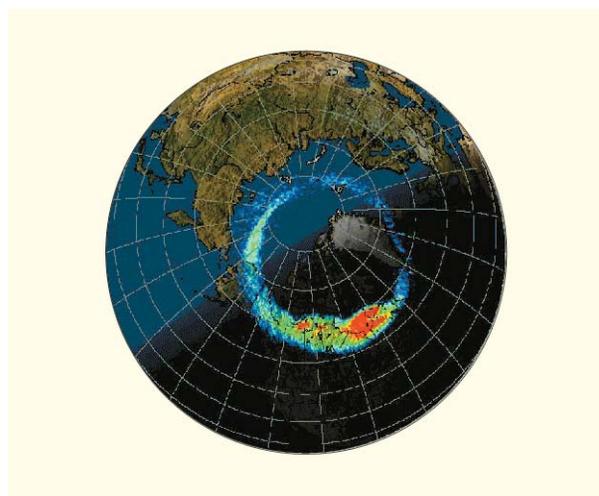


Рис.2. Авроральный овал (наблюдения со спутника «Polar»).

магнитному полю, уходящему за пределы магнитосферы — в солнечный ветер. Наибольшая яркость свечений — на ночной стороне, соответствующей хвосту магнитосферы. Уже одна эта иллюстрация четко свидетельствует о том, что источник полярных сияний — не только солнечный ветер, как это часто говорят, но и магнитосфера. Авроральная зона в обычных условиях расположена примерно на $65\text{--}75^\circ$ магнитной широты, отсчитываемой относительно магнитного экватора (широта магнитного полюса при этом равна 90°).

В результате полярная область оказывается своеобразным экраном, на который проецируются все основные проявления космической погоды в магнитосфере. Только наблюдая за полярными сияниями из космоса, можно увидеть картину целиком. Ни со спутника, проводящего измерения плазмы и магнитного поля где-то в магнитосфере, ни с наземной станции это сделать невозможно — они видят только происходящее в данной точке.

Такая сложная структура магнитосферы должна самосогласованно поддерживаться локальными (космическими) электрическими токами, создаваемыми магнитосферной плазмой («самосогласованно» означает взаимозависимость — магнитное поле определяет свойства плазмы, а плазма в свою очередь создает электрический ток, поддерживающий поле). Энергия, поступающая из солнечного ветра, не расходуется равномерно, а может накапливаться в виде энергии магнитного поля (или, что то же самое, в виде энергии электрических токов) в хвосте. И это тот самый случай, когда хвост «крутит собакой». Магнитный поток, заключенный в хвосте, при накоплении энергии увеличивается, хвост как бы набухает и удлиняется. Через некоторое время происходит внезапная разрядка, энергия сбрасывается частично обратно в солнечный ветер, частично в атмосферу, хвост «сдувается». Это так называемый цикл геомагнитной суббури (термин исторически означает: «маленькая, элементарная буря»), он порождает при разрядке всплеск полярных сияний и геомагнитных вариаций в полярных районах и происходит каждые несколько часов. На рис.3 приведен пример наблюдений аврорального овала со спутника во время начала достаточно крупной суббури. В течение 10 мин существенно увеличилась яркость свечения, оно распространилось из небольшой зоны в нижней правой части овала на почти всю полярную зону.

Во время аномальных возрастаний давления солнечного ветра, после солнечных вспышек, зона активности распространяется «глубже» в магнитосферу, в результате чего авроральный овал — ее отражение — спускается на более низкие широты. Геомагнитные вариации наблюдаются по всей Земле. Такое событие называется магнитной бурей. Суббури тоже становятся особенно сильными, полярные сияния могут наблюдаться на низких широтах, в частности, в Москве.

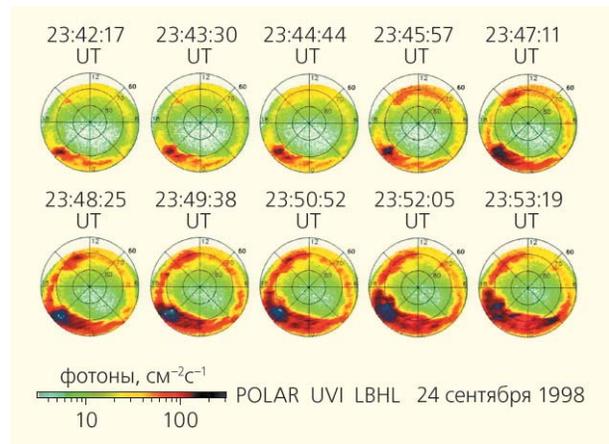


Рис.3. Наблюдения авроральных свечений в УФ-диапазоне со спутника «Polar». Система координат центрирована на магнитный полюс. Дневная сторона расположена сверху. Яркость обозначена цветом от зеленого до темно-красного.

Авроральный ускоритель

Возможно, это покажется удивительным, но механизм полярных сияний — самого известного проявления космической погоды — до сих пор до конца не ясен, и, более того, эта проблема считается одной из самых значимых в космической физике (наряду, например, с ускорением солнечного ветра) [2]. Оценки показывают, что даже если «вытряхнуть» всю плазму магнитосферы в атмосферу, поток и энергия электронов все равно будут недостаточны, чтобы обеспечить видимую яркость сияния (в ярких дугах она доходит до сотен килоэрлеев при визуальном пороге обнаружения около одного килоэрлея) и наблюдаемую глубину проникновения электронов в атмосферу до высоты 100 км. Электроны в хвосте магнитосферы имеют энергию $100\text{--}1000$ эВ, а для возбуждения полярных свечений она должна быть на порядок больше, около $1\text{--}10$ кэВ. И действительно, электроны с такой энергией наблюдаются на спутниках, пролетающих непосредственно над полярными сияниями. За доускорение электронов отвечает так называемый авроральный ускоритель — зона в магнитосфере на высотах в несколько тысяч километров над авроральным овалом, где магнитное поле уже достаточно сильно, а плазма еще разрежена и можно эффективно разогнать электроны без тормозящего эффекта от столкновений с ионами.

Ускоряются электроны, летящие вниз практически вдоль магнитного поля, «продольным» (параллельным магнитному) электростатическим полем.

Как раз механизм появления такого электрического поля и неизвестен. Дело в том, что теория вполне уверенно описывает формирование электрического поля, поперечного магнитному, — так называемого дрейфового. Движение же плазмы вдоль магнитного поля в отсутствие столкновений

не имеет очевидных ограничений (проводимость бесконечно велика), значит, появление продольного электрического поля должно приводить практически к взрывному ускорению и к пробое. Поэтому из общих соображений о стабильности системы такое электрическое поле может существовать только в очень ограниченной области пространства и в импульсном режиме. Сейчас наиболее популярны гипотезы, которые рассматривают различные нелинейные волны большой амплитуды, приходящие из магнитосферы и внезапно увеличивающие амплитуду продольного электрического поля на определенной высоте. На рис.4 изображена условная схема такого ускорителя, расположенного над дугой сияния.

Ускорение происходит в достаточно малых пространственных зонах — поперечный размер одной дуги сияния может составлять ~1 км (и иногда дуга расслаивается даже на более мелкие слои толщиной порядка сотни метров). Проекция дуги в хвост магнитосферы, где зарождаются потоки электронов и волны, ответственные за их ускорение, достигает величины ~1000 км. Подобная детализация измерений в хвосте магнитосферы стала возможной только 10 лет назад — с запуском многоспутниковых миссий («Интербол», «Cluster»)*, достигших времен-

* Зеленый Л.М., Григоренко Е.Е. Миссия «Cluster», восставшая из огня подобно Фениксу // Природа. 2005. №5. С.46—54; Квартет «Cluster» исследует тайны магнитосферы // Там же. №6. С.31—41.

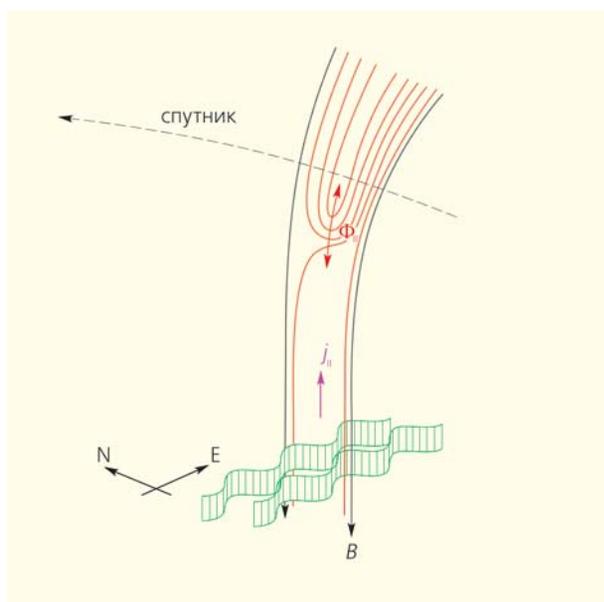


Рис.4. Дуга полярного сияния и авроральный ускоритель над ней. Красным цветом показаны линии электрического потенциала. Штриховая линия — траектория спутника. В левом углу — направления на страны света (север N и восток E). Черные сплошные линии — направление магнитного поля, $j_{||}$ — продольный ток, $\Phi_{||}$ — продольный перепад потенциала.

ного разрешения измерений порядка нескольких секунд (что при характерных скоростях плазмы в несколько сотен километров в секунду как раз и соответствует тысяче километров). Наличие нескольких близко летящих спутников позволяет надежно определить размер плазменных объектов, сравнивая их наблюдения в нескольких соседних точках [3]. В марте 2015 г. стартовала американская четырехспутниковая миссия MMS, временное разрешение измерений которой достигает 10 мс. Поэтому есть основания надеяться, что в скором времени эта проблема будет решена.

Авроральный электроджет

Электроны, вторгающиеся в атмосферу, не только возбуждают на высотах ~100—200 км свечение нейтральных атомов и молекул, но и дополнительно ионизируют их. На освещенной стороне Земли основную роль в ионизации атмосферы и создании ионосферы (верхнего слоя атмосферы с существенным содержанием ионов и электронов) играет ультрафиолетовое излучение Солнца. Однако на ночной стороне, где полярные сияния самые яркие, этот источник отсутствует, и преобладают именно высыпания из магнитосферы. Так как они неоднородны, структура ионосферы здесь тоже неоднородна и очень быстро (и практически непредсказуемо) меняется. Именно эти неоднородности ионизации и создают проблемы для радиосвязи.

Концентрация электронов в ионосфере (появляющихся в результате такой ионизации) определяет проводимость ионосферы. Так сложилось, что высота около 100 км характерна не только для полярных сияний, но и для ионосферных токов (так называемых электроджетов). Здесь электроны уже замагничены (т.е. успевают совершить несколько вращений вокруг магнитного поля между столкновениями), а ионы — уже нет, их более медленное вращение разрушается столкновениями. В результате электроны и ионы при наложении внешнего электрического поля движутся по-разному, и возможно эффективное формирование электрического тока. Эта возможность оказывается в высшей степени востребованной: в момент внезапного начала суббури часть токов магнитосферы (тока хвоста) ответвляется вдоль силовых линий в ионосферу, происходит своего рода «закорачивание» электрической цепи, которое позволяет уменьшить полный ток, текущий поперек хвоста, и, соответственно, сбросить часть накопленного магнитного потока.

Наконец, авроральный ускоритель не только ускоряет электроны,двигающиеся вниз, но, благодаря тому же электрическому полю, вытягивает вверх положительные ионы, заполняя магнитосферу плазмой из земной ионосферы. Наиболее четко это видно по иону O^+ — однократно заря-

женному кислороду. Других источников такого иона в окрестности Земли нет — в солнечном ветре присутствует только малая доля пяти-шестикратно ионизованных ионов кислорода. Во время магнитных бурь доля ионосферного кислорода в хвосте магнитосферы может достигать до 50%, и именно эти ионы из-за своей значительной по сравнению с протонами массы становятся наиболее эффективными переносчиками энергии.

Ключевым моментом оказывается то, что все вышеперечисленные эффекты авроральной активности (сияния, создание проводящих слоев и замыкание электрического тока) не независимы. Без включения аврорального ускорителя нельзя создать достаточной проводимости, эти же высыпания из магнитосферы как раз и переносят электрический ток, замыкающий магнитосферные цепи. Более того, чем выше токи, текущие через ионосферу, тем более интенсивна динамика хвоста магнитосферы, тем больше плазмы и энергии попадает в ионосферу, подпитывая авроральный ускоритель. Получается классическая схема с положительной обратной связью, которая потенциально и может объяснить наличие некоторого порога, обеспечивающего реализацию суббурового цикла накопления и сброса энергии. Однако начало суббури и ее интенсивность практически малопредсказуемы [4]. Более того, иногда происходит и прямо противоположное: магнитосфера переключается в альтернативный режим постоянной диссипации, без циклов накопления и сброса магнитной энергии.

Пример такой смены режимов приведен на рис.5 [5]. Вполне обычная магнитная буря 22—23 ноября 1997 г. характеризовалась постепенным увеличением магнитных возмущений в экваториальных широтах по магнитному индексу $SYM-H$ (современный аналог более известного индекса Dst) до величины примерно -100 нТл (верхний график). Однако ситуация в хвосте магнитосферы и в полярных широтах была более изменчива: магнитное давление в хвосте (средний график) периодически то росло, то падало (это и есть суббури), а в промежутках между пиками, на интервалах порядка 1—2 ч, давление было более или менее постоянным (эти интервалы постоянной диссипации отмечены прямоугольниками). В моменты максимумов давления геомагнитные вариации на полярных станциях (нижний график) резко усиливались до -1000 нТл (в 10 раз сильнее, чем на экваторе!). Почему магнитосфера так переключается из режима в режим, остается неизвестным. Возможно, все дело именно в работе обратной связи через авроральную ионосферу. Ясно одно: без аврорального ускорения магнитосфера Земли была бы другой — не только лишившейся полярных сияний, но и более пассивной и вязкой, без яркой собственной динамики.

Интересную иллюстрацию этой проблемы мы имели возможность наблюдать недавно, весной

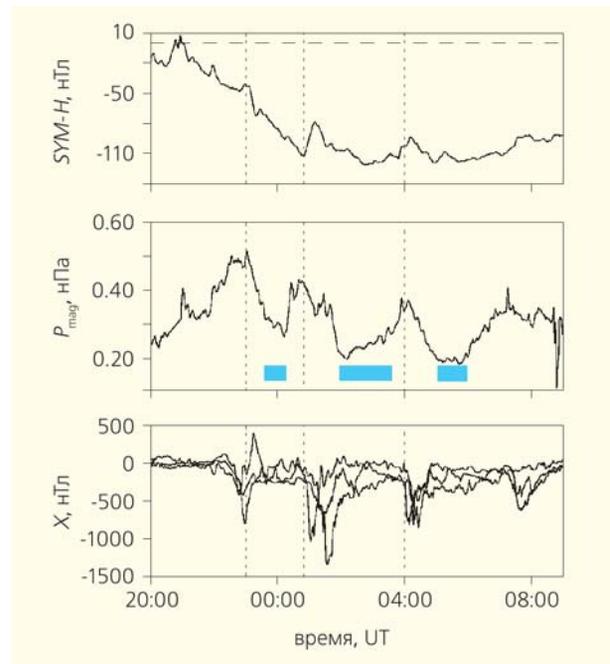


Рис.5. Динамика состояния магнитосферы Земли во время магнитной бури 22—23 ноября 1997 г. Верхний график — индекс экваториальных геомагнитных вариаций $SYM-H$; средний — магнитное давление в хвосте магнитосферы по данным спутника Интербол-1 (P_{mag}); нижний — геомагнитные вариации в полярной зоне (горизонтальный компонент поля X). Вертикальный пунктир отмечает моменты начала суббури. Синие прямоугольники показывают интервалы постоянной диссипации.

2015 г. 17—18 марта разыгралась магнитная буря с амплитудой чуть сильнее, чем -200 нТл по экваториальному индексу. В текущем цикле солнечной активности это стало уникальным событием, однако этот цикл сам по себе весьма слаб: в прошлом таких бурь было не менее 16. Неожиданной чертой данной бури стало появление полярного сияния над Москвой. Ранее сияния были видны в Москве только во время самых сильных бурь, последний раз — в 2003 г. А в марте условия были настолько удачны, что видны были не только светлые пятна на небе, но и характерные формы (занавеска) и цвета (зеленый внизу и красный сверху). Отличную запись сделали автоматические камеры ГАИШ МГУ*. Однако авроральный овал (например, по американской модели на рис.6) в среднем ожидался для таких условий примерно на 10° севернее, и, соответственно, сияний в Москве не ожидалось. Что же произошло? Для динамики магнитосферы важен не только текущий солнечный ветер, но и внутренний цикл накопления и сброса энергии. Согласно индексу полярной геомагнитной активности AL и AU (рис.7), в интересующем нас временном интервале было

* www.facebook.com/video.php?v=669079686530621&pnref=story

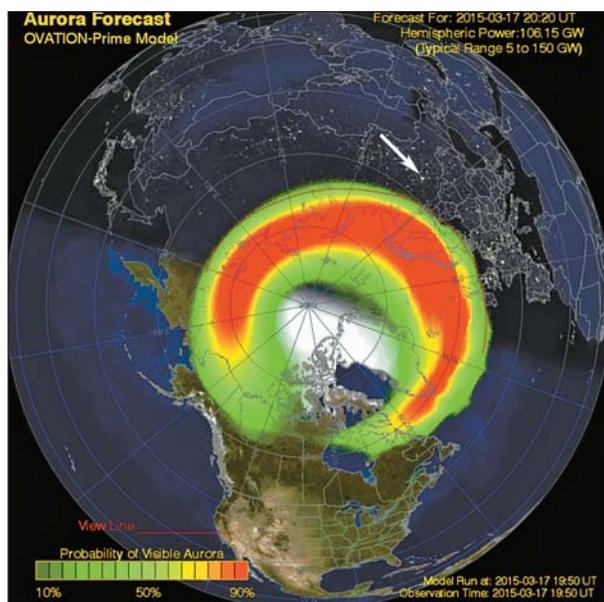


Рис.6. Модель аврорального овала для вечера 17 марта 2015 г. по данным лаборатории Университета Джона Гопкинса (США). Положение Москвы отмечено стрелкой. Зелено-красная шкала показывает вероятность наблюдения полярных сияний. Модель представлена на сайте:

<http://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>



Рис.7. Индексы геомагнитной активности северной авроральной зоны AL и AU (в нТл) для 17 марта 2015 г. с сайта Мирового центра данных по геомагнетизму, Киото (Япония). <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>

несколько очень четких и мощных суббурь с амплитудой почти до -1500 нТл — примерно в 21, 23 и 2 ч московского времени (18, 20, 23 всемирного). Именно это мощные волны накопления и сброса энергии и заставили зону возмущений опуститься ближе к экватору. Предсказать такие движения овала для конкретного события заранее пока совершенно невозможно.

Движение магнитного полюса

В связи с проблематикой космической погоды активно обсуждается и еще один важный именно для Арктики вопрос — движение магнитного полюса. Нетрудно заметить, например, на рис.2, что

авроральный овал как бы сдвинут на Канаду и авроральная зона на «той стороне» спускается до вполне умеренных, плотно заселенных широт. В российской же части она, наоборот, смещена к полюсу (рис.8), что несколько снижает уровень опасности на нашей стороне (так как авроральные явления разыгрываются в основном над районами, освоение которых еще впереди). Этот эффект связан с тем, что магнитные полюса немного (на $10-15^\circ$) не совпадают с географическими. В частности, «северный» магнитный полюс находится в канадской части Арктики (с точки зрения направления магнитного поля этот полюс — южный, и северным его можно называть лишь условно, что мы и будем здесь делать). В последнее время много говорят о том, что магнитный полюс начал быстрое движение в сторону России (рис.9). Это значит, что в среднесрочной перспективе (десятилетия) весь замечательный букет проявлений солнечной активности начнет сильнее влиять на активно осваиваемые сейчас северные регионы нашей страны. В прессе пугают и другими катастрофическими последствиями от сдвига полюса.

Однако тревоги эти выглядят немного преувеличенными. Относительно катастрофичности последствий необходимо прежде всего отметить, что при таких обсуждениях часто путают магнитные полюса и географические. Географический полюс — это точка, через которую проходит ось вращения Земли. Поворот данной оси действительно привел бы к катастрофическим последствиям, однако это может произойти только в результате столкновения с весьма крупным небесным телом (даже большой метеорит подобного действия не окажет), но в таком случае проблема сдвига именно полюса показалась бы будущим обитателям Земли мелочью.

Тем не менее ось вращения Земли действительно немного колеблется относительно эклиптики и направления на Солнце — на несколько градусов за десятки тысяч лет. Эти колебания, называемые циклами Миланковича (по имени первооткрывателя) и связанные с воздействием других планет Солнечной системы и Луны, приводят лишь к малым вариациям освещенности Земли и, соответственно, небольшим изменениям климата. Луна — самый массивный (относительно основного объекта) спутник в Солнечной системе — амплитуду этих колебаний существенно уменьшает. Момент инерции (аналог массы для вращающегося тела) системы Земля—Луна почти в 100 раз больше момента инерции планеты, и, соответственно, отклонить нашу общую ось вращения становится в 100 раз сложнее. Этим мы выгодно отличаемся, например, от Марса, ось вращения которого на интервалах около сотен тысяч лет смещается относительно эклиптики на десятки градусов, что приводит к существенным изменениям климата. Хотя повороты оси вращения и оказывают некоторое влияние на магнит-

ное поле, для Земли это далеко не главная проблема.

С магнитными полюсами, однако, все не так просто, они действительно движутся относительно географических полюсов и даже могут сменить полушарие. Последнее, впрочем, в ближайшие несколько тысяч лет нам наверняка не грозит, и эту тему, хотя и очень интересную, здесь мы обойдем. Остановимся только на движениях полюса в масштабе ближайших ста лет, тенденция которых уже определилась, — это и есть сдвиг полюса и авроральной зоны в сторону России. Насколько проблема актуальна?

Прежде всего, даже определения термина «магнитный полюс» могут быть даны по-разному. «Геомагнитный» полюс — это точка выхода оси магнитного диполя (см. ниже). Есть еще «магнитный полюс» — точка, в которой магнитное поле направлено точно по вертикали по отношению к поверхности Земли. Эти точки разные, потому что магнитное поле Земли имеет весьма сложную конфигурацию.

Уильям Гильберт в конце XVI в. первым предположил, что Земля представляет собой большой магнит, а, следовательно, геомагнитное поле аналогично полю такого магнита. Конфигурация поля обычного магнита уже была изучена, это так назы-

ваемый магнитный диполь — структура с двумя полюсами, напоминающая сферическую. Диполь соответствует простейшему источнику магнитного поля — кольцу с электрическим током. Однако структура источников геомагнитного поля внутри Земли более сложна (здесь, говоря о постоянном поле планеты, мы пока временно забудем о магнитосферных токах). Есть сложная комбинация течений в жидком ядре Земли, есть и магнитные аномалии в земной коре у ее поверхности [6]. В ре-

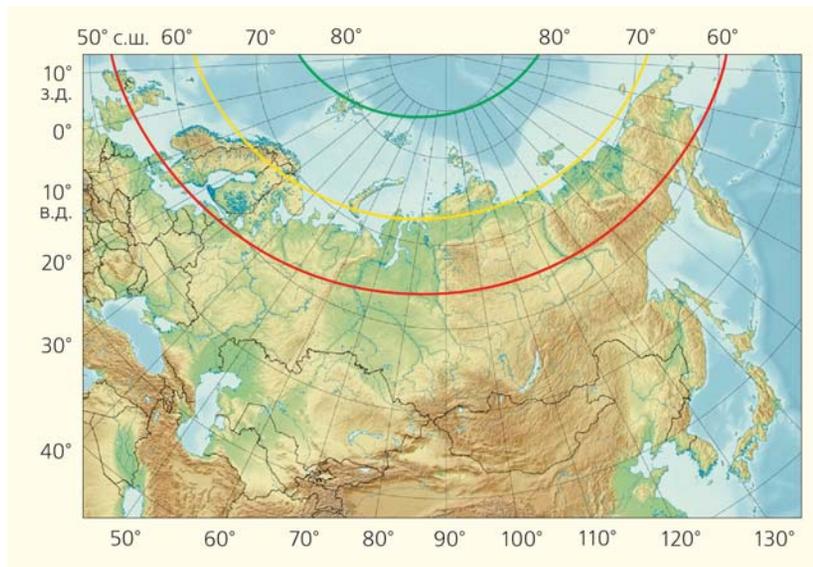


Рис.8. Экваториальная граница авроральной зоны в России для очень спокойных (зеленая дуга), средних (желтая дуга) и возмущенных (красная дуга) условий.

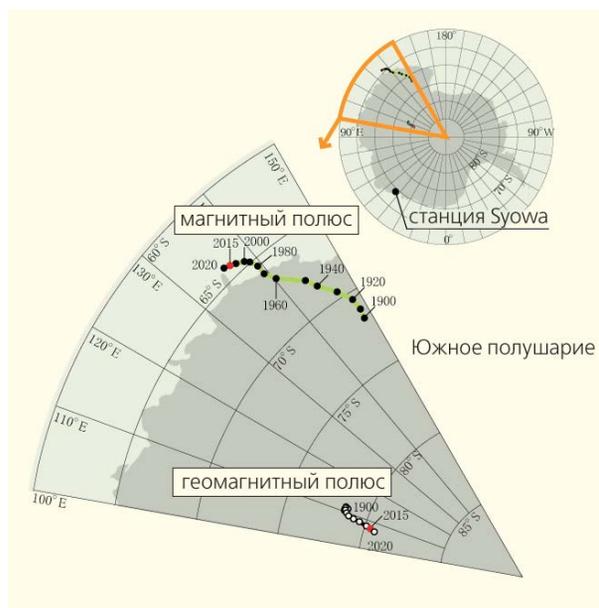
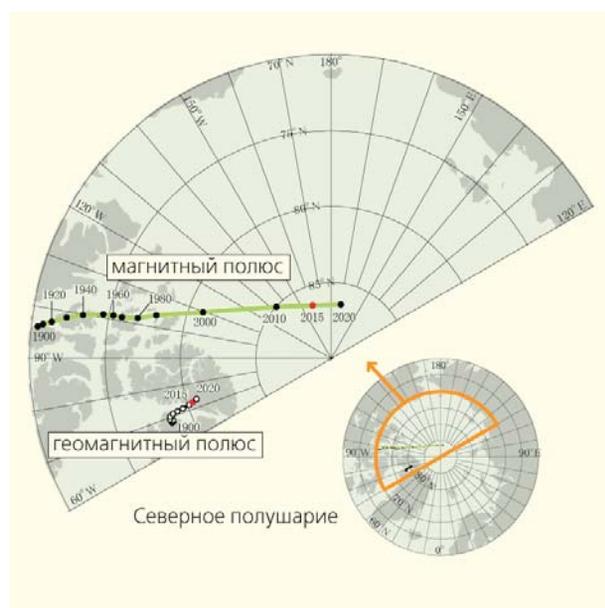


Рис.9. Дрейф магнитного полюса (местной магнитной вертикали) и геомагнитного полюса (полюса магнитного диполя) за последний век.

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>

зультате геомагнитное поле не точно дипольное, хотя и близко к нему. Остаток (после вычитания диполя) удобно разложить на сумму более сложных магнитных конфигураций с четырьмя, восьмью и т.д. полюсами (так называемые квадруполь, октуполь и др.). Всего современная модель геомагнитного поля IGRF включает 13 таких членов с постепенно спадающей амплитудой [7]. Именно эти члены определяют отличие местного поля от дипольного, и, соответственно, положение местной магнитной вертикали — т.е. и координаты магнитного полюса.

Если мы посмотрим на дрейф северных полюсов (а его четко удастся зафиксировать магнитной съемкой, рис.8), то наиболее быстро — на десяток градусов за десяток лет — сдвинулся к российской стороне именно магнитный полюс, а геомагнитный (дипольный) ушел максимум на пару градусов. Это означает, что меняется прежде всего местная картина поля, малые члены в разложении, а не основной дипольный компонент. Однако взаимодействие Земли с солнечным ветром и положение аврорального овала определяет именно дипольная часть геомагнитного поля, так как она спадает при удалении от Земли гораздо медленнее, чем все остальные. Интересно, что южный магнитный полюс движется в противоположную сторону (северный — к географическому полюсу, а южный — к экватору), подтверждая таким образом чисто местный характер явления. Геомагнитные же полюса движутся синхронно (и гораздо медленнее магнитных), так что, несмотря на то что поворот магнитного диполя действительно происходит, говорить о каком-либо быстром сдвиге авроральной активности к Российской Арктике пока не приходится, хотя тенденция такая несомненно есть.

Опасности и их прогноз

Несмотря на свое название, «космическая погода» кардинальным образом влияет не только на космические аппараты и работающих на орбите космонавтов, но и на совершенно земные технические системы и земную биосферу, особенно в обсуждавшихся полярных и приполярных областях. В сумме энергия магнитной бури может достигать 10^{16} – 10^{17} Дж, типичной суббури — 10^{14} – 10^{15} Дж, и от одного до десяти процентов этой энергии попадает в полярную ионосферу [8, 9]. В результате суммарная мощность возмущений аврорального овала в ходе бури составляет десятки гигаватт, а авроральные токи — электроджеты — достигают интенсивности в миллионы ампер. Ясно, что если у вас над головой появится электрическая система с мощностью в несколько раз больше мощности какой-нибудь очень крупной электростанции (например, Саяно-Шушенской ГЭС), бесследно это не пройдет, прежде всего в смысле возбуждения мощных электромагнитных помех. Первым

исторически замеченным следствием магнитных бурь были отказы магнитных компасов. Становится затрудненной и коротковолновая радиосвязь. Причина понятна — для дальней радиосвязи необходимо отражение радиоволн от ионосферы, и если размывается четкая слоистая структура распределения электронов по высоте, то разрушаются и зеркала, от которых могло бы происходить отражение радиоволн. Во время сильных бурь радиосвязь в КВ-диапазоне пропадает на всей планете. В полярных же регионах это происходит во время «зажигания» полярных сияний практически всегда, ведь высыпания из магнитосферы создают очень неоднородную структуру ионизации.

Кажется, что все это уже в прошлом, ведь сейчас мы используем спутниковую навигацию вместо компаса. Спутниковая и мобильная радиосвязь работает в диапазоне гораздо более высоких частот (около 1 ГГц), где влияние ионосферы заметно ослабевает. Но не все так просто. На коротких волнах работают радары оборонных систем дальнего обнаружения. Магнитный компас до сих пор используют, например, для определения ориентации при горизонтальном бурении. Да и высокочастотные, гигагерцевые, радиосигналы, хоть и проходят через ионосферу насквозь, рассеиваются на неоднородностях, что приводит к потере непрерывности получаемых данных. Найти дорогу домой с навигатором такой сбой не помешает, а вот посадить самолет или провести точную геодезическую привязку может помешать вполне.

Еще один новый блок проблем возник в связи с развитием арктических коммуникаций — трубопроводов, электросетей и железных дорог. Все эти объекты представляют собой длинные проводники, идеальные антенны для восприятия относительно медленных геомагнитных и геоэлектрических вариаций (имеющих периоды 10–1000 с). В них наводятся паразитные токи (по опыту наблюдений, достигающие сотен ампер), которые способны вызвать отказ систем автоматики трубопроводов, железнодорожной сигнализации и др. При попадании в высоковольтные линии электропередачи такие почти постоянные помехи могут сдвинуть режим работы трансформаторов в зону насыщения, что приводит к их перегреву и поломке. На востоке Канады и США (где из-за сдвига магнитного полюса авроральная зона спускается ниже к экватору, в достаточно умеренные географические широты до 50–60°) накоплен целый список таких аварий региональных электросистем. После самой печально известной из них, произошедшей в 1989 г. и оставившей несколько миллионов человек без света, был принят ряд мер для стабилизации энергосистем. Техническая защита от всех таких проблем, конечно, существует (например, резервирование), но стоит она слишком дорого, и тут как раз могут помочь надежные прогнозы космической погоды.

Здесь необходимо отметить несколько обстоятельств. Во-первых, такой прогноз невозможно сделать с применением лишь наземных средств наблюдения. Данные по солнечным вспышкам, потокам солнечного ветра, динамике магнитосферы, глобальным полярным сияниям можно получить только с помощью космических аппаратов. Во-вторых, для мониторинга и прогноза необходимо использовать специализированные спутники, отличающиеся от спутников для фундаментальных исследований Солнца и околоземной среды наличием каналов связи (которые обеспечивают мгновенную передачу информации на Землю) и расположением в особых ключевых точках (где можно вести постоянные однородные наблюдения — например, для слежения за солнечным ветром удобны точки либрации). Наконец, данные по мониторингу и прогнозу в глобальном охвате, в том, что касается наблюдений Солнца и магнитных бурь в целом, хоть и выполняются в основном зарубежными спутниками и обсерваториями, доступны через Интернет и остаются пока практически всеобщим достоянием (сейчас ни одна страна не может обеспечить весь комплекс измерений). Однако данные мониторинга и прогноза с региональной привязкой обычно закрыты из-за их оборонного и коммерческого значения. Кроме того, необходимо и размещение достаточного количества обсерваторий именно в зоне интереса. Поэтому здесь можно рассчитывать только на себя.

В Академии наук разработана серьезная программа исследований солнечной активности. Ученые из Иркутского института солнечно-земной физики создают сейчас многофункциональный наземный комплекс для изучения космической погоды, в том числе в Арктическом регионе. Вместе с Росгидрометом институты РАН реализуют многоспутниковую программу под названием

«Геофизика» для мониторинга ионосферы. Остается установить наблюдения за полярными сияниями, наиболее информативным признаком активности в полярном регионе. Для этого разрабатывается специальный ультрафиолетовый телескоп «Авровизор» [10]. Вероятно, к следующему максимуму солнечной активности (после 2020 г.) российская наука будет готова лучше.

* * *

В заключение хочется вспомнить стихотворение А.Л.Чижевского, посвященное солнечной активности и Галилею. Сегодня мы знаем, в чем Чижевский был прав (в том, что солнечная активность влияет на Землю) и в чем неправ (в ее влиянии на ход истории). Самое главное же — это то, что мы можем предсказать и предотвратить большинство неприятностей.

*И вновь и вновь взошли на Солнце пятна,
И омрачились трезвые умы,
И пал престол, и были неотвратны
Голодный мор и ужасы чумы.*

*И вал морской вскипел от колебаний,
И норд сверкал, и двигались смерчи,
И родились на ниве состязаний
Фанатики, герои, палачи.*

*И жизни лик подернулся гримасой;
Метался компас — буйствовал народ,
А над Землей и над людскою массой
Свершало Солнце свой законный ход.*

*О ты, узревший солнечные пятна
С великолепной дерзостью своей, —
Не ведал ты, как будут мне понятны
И близки твои скорби, Галилей! ■*

Литература

1. Маленькая энциклопедия «Физика космоса». М, 1986.
2. Paschmann G, Haaland S, Treumann R. Introduction to auroral plasma physics // Space Science Reviews. 2002. V.103. Iss.1—4. P.1—19.
3. Зеленый Л.М., Малова Х.В., Артемьев А.В. и др. Тонкие токовые слои в бесстолкновительной плазме: равновесная структура, плазменные неустойчивости и ускорение частиц // Физика плазмы. 2011. Т.37. №2. 137—182.
4. Petrukovich A.A. The elusive onset of geomagnetic substorms // Science. 2008. V.321. P.920—921.
5. Petrukovich A.A. Storm-time and quiet-time substorms in the magnetotail // Disturbances in geospace: the storm-substorm relationship / Eds A.S.Sharma, Y.Kamide, and G.S.Lakhina // Geophysical Monograph Series. American Geophysical Union. 2004. V.142. P.37—43.
6. Короновский Н.В. Магнитное поле геологического прошлого Земли // Соросовский образовательный журнал. 1996. №5. С.56—63.
7. Лукьянова Р.Ю. Магнитный переполох // Наука и жизнь. 2014. №8. С.2—9.
8. Петрукович А.А., Зеленый Л.М. Прогноз погоды XXI века // Наука и жизнь. 2002. №5. С.2—8.
9. Солнечно-земные связи и космическая погода // Плазменная гелиогеофизика / Ред. А.А.Петрукович, Л.М.Зеленый, И.С.Веселовский. М., 2008. С.175—257.
10. Кузьмин А.К., Мерзлый А.М. Перспективный эксперимент по контролю состояния ионосферы Земли с помощью оптического комплекса «Авровизор-ВУФ» в составе группировок высокоапогейных и низкоорбитальных космических аппаратов // Вопросы электромеханики. 2014. Т.142. С.3—18.

Новости о солнечном ветре

Г.Н.Застенкер

Солнечный ветер, постоянно существующий в межпланетной среде поток плазмы из короны Солнца, весьма изменчив во времени и очень важен по своему значению — это один из основных агентов, переносящих к Земле многие возмущения, которые возникают на Солнце. Он служит объектом систематического изучения уже более полувека, однако до сих пор в этой теме можно найти много нового и интересного.

В ИКИ РАН первые измерения характеристик солнечного ветра были выполнены «по дороге» на нескольких советских планетных миссиях, направлявшихся к Венере и Марсу. Регулярными такие эксперименты стали начиная с 1972 г. — с запуска высокоэллиптических спутников серии «Прогноз», имевших апогей орбиты на расстоянии от Земли более 170–200 тыс. км. Что же важного мы смогли узнать о предмете?

Портрет явления

К началу наших систематических исследований солнечного ветра уже были известны некоторые результаты подобных измерений, полученных на американском аппарате «Mariner-2» в 1962 г. Однако нам «повезло»: наши эксперименты 1972 г. столкнулись с экстремальными, ранее не наблюдавшимися условиями в межпланетной среде. Но прежде всего надо напомнить, о каких, собственно, условиях пойдет речь.



Георгий Наумович Застенкер, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экспериментального исследования солнечного ветра ИКИ РАН. Область научных интересов — физика космической плазмы и солнечно-земные связи.

Поток солнечного ветра состоит из электронов, протонов и двукратно ионизованных ионов гелия (альфа-частиц); примесь ионов более тяжелых элементов совсем невелика (на уровне 0.01% и менее).

Состояние плазмы описывается целым набором параметров: плотностью (обычно это 1–20 част./см³), переносной скоростью (как правило, она лежит в пределах 300–600 км/с), температурой (в энергетических единицах она составляет 1–10 эВ для ионов и в три-четыре раза больше для электронов). В ней могут возбуждаться разного вида волны — звуковые и сверхзвуковые (в частности, ударные волны, взаимодействие которых с магнитосферой Земли становится причиной различных возмущений). Надо еще подчеркнуть, что плазма солнечного ветра несет с собой межпланетное магнитное поле (как остаток солнечного поля).

Чтобы зарегистрировать необходимый объем физической информации, спутник должен быть снабжен разнообразным оборудованием. Например, в комплекс научных приборов спутника «Прогноз-10-Интеркосмос» (рис.1) входили:

- плазменный спектрометр с быстрым анализом энергетических спектров и угловых распределений протонов, альфа-частиц и электронов;
- анализатор низкочастотных (от 0.5 Гц до 30 кГц) колебаний электрического и магнитного полей и потока ионов плазмы с обработкой спектров на борту;
- трехкомпонентный магнитометр;
- комплекс приборов для измерения потоков, энергетических спектров и анизотропии ускоренных ионов и электронов в диапазоне энергий от десятков килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт;
- рентгеновский фотометр для измерения всплесков солнечного излучения;

© Застенкер Г.Н., 2015



Рис.1. Спутник «Прогноз-10-Интеркосмос» с установленной на нем аппаратурой проекта «Интершок» (она видна вместе с солнечными батареями на верхней плоскости спутника).

- анализатор километрового радиоизлучения Солнца;
- бортовая вычислительная машина с большой кольцевой памятью для организации быстрых измерений при пересечении спутником резких границ (например, ударной волны).

Пример экстремальной ситуации

Но вернемся в 1972 г. Волею случая в августе на Солнце произошли последовательно четыре экстремальные вспышки, составлявшие в баллах от двух до четырех (две вспышки 2 августа, затем по одной 4 августа и 7 августа) и давшие начало сильным межпланетным ударным волнам (МУВ), которые достигли орбиты Земли 4 и 8 августа [1].

Эти межпланетные ударные волны (и параметры плазмы солнечного ветра после их прохождения) были успешно зарегистрированы аппаратурой отечественных высокоапогейных спутников «Прогноз» и «Прогноз-2» [1, 2], запущенных как раз в 1972 г., а также американских космических аппаратов «Pioneer-9» и «Pioneer-10». Что же показали измерения?

Прежде всего отметим заметные различия в средней скорости движения этих ударных волн. Если для первой эта скорость составляла около 900 км/с, а для второй и четвертой — ~1300 км/с, то для третьей она достигла 2900 км/с (это, по-видимому, связано с тем, что данная МУВ двигалась по межпланетной среде, плотность которой заметно снизилась после пролегания первой и второй МУВ).

На рис.2 представлена картина изменения переносной скорости, температуры и плотности ионов солнечного ветра в виде среднечасовых значений этих параметров для периода 4—12 ав-

густа 1972 г. Обращают на себя внимание экстремальные значения параметров ветра:

- увеличение плотности до 150 см^{-3} вскоре после прихода ударных волн от первой и второй вспышек;
- возрастание температуры ионов выше 10^6 К на очень узком интервале времени после прихода ударной волны от третьей вспышки;
- рост переносной скорости ветра выше 1700 км/с (это среднечасовое значение, а на отдельных временных интервалах в течение этих четырех часов она достигала почти 2000 км/с — величины, никогда ранее не наблюдавшейся) также после прихода ударной волны от третьей вспышки.

Анализ полученных данных говорит о довольно сложной детальной структуре вспышечного потока плазмы (включающей в себя ударный слой, «магнитную» область, плазменный поршень с обратной ударной волной и хвостовую часть потока) и о своеобразии его энергетических характеристик [1, 2]. По нашим измерениям были сделаны оценки энергии и массы, переносимых за ударными волнами. Для энергии были получены значения $(3-26) \cdot 10^{32}$ эрг (минимальное для четвертой, а максимальное для суммы волн от первой и второй вспышек), а для массы, соответственно, $(4-60) \cdot 10^{16}$ г. Эти оценки значительно превосходили максимальные значения для всех прежних наблюдений.

Таким образом, сильные солнечные вспышки в августе 1972 г. отметились рекордными значениями параметров солнечного ветра, превышающими и наблюдавшимися ранее, и зарегистрированные позднее, вплоть до настоящего времени.

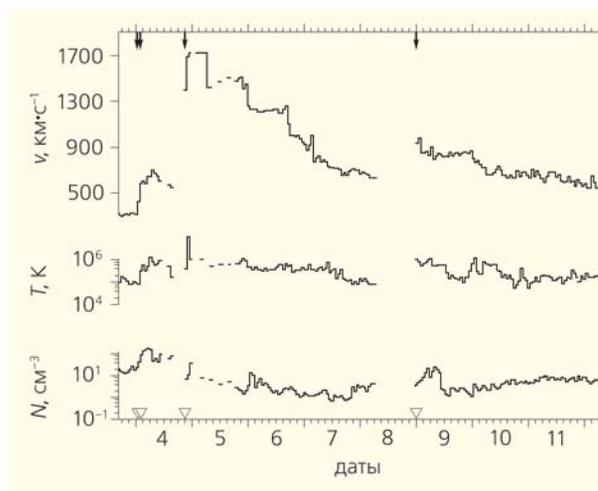


Рис.2. Среднечасовые значения параметров солнечного ветра (сверху вниз: скорость, температура, концентрация) в период 4—12 августа 1972 г. по данным спутников «Прогноз» и «Прогноз-2». Стрелками вверху отмечены моменты прихода межпланетных ударных волн от четырех сильных солнечных вспышек.

Ударные волны на границе магнитосферы

После успешно проведенного изучения событий в солнечном ветре, связанных с экстремальными солнечными вспышками, сотрудники ИКИ РАН и их чехословацкие коллеги подготовили и осуществили большой совместный проект «Интершок». Он был нацелен на исследование тонкой структуры околоземной ударной волны, образующейся при взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой Земли (так называемом «набегании»). Методически эту задачу было решить нелегко, так как требовалось детально измерить как можно большее количество физических параметров плазмы, магнитного поля и энергичных частиц при весьма быстром (за несколько минут или даже за доли минуты) пересечении спутником фронта околоземной ударной волны. Предпринятые усилия помогли справиться с трудностями, и проект «Интершок» был успешно осуществлен сначала в виде подготовительных экспериментов на спутнике «Прогноз-8» (1981), а затем и в полномасштабном качестве на уже упоминавшемся спутнике «Прогноз-10-Интеркосмос» (1985) [3].

Плазменный комплекс этой аппаратуры с помощью широкого набора электростатических анализаторов позволял измерять с высокими временным, энергетическим и угловым разрешениями различные сечения функции распределения ионов по скоростям. Так, на рис.3 показано, какие динамические спектрограммы потока ионов солнечного ветра зарегистрировали три разнонаправленных анализатора, когда спутник пересек околоземную ударную волну. Здесь степень почернения линий пропорциональна плотности потока ионов, и весь интервал графика занимает примерно одну минуту. Показаны энергетические спектры потока протонов, а над ними — спектры

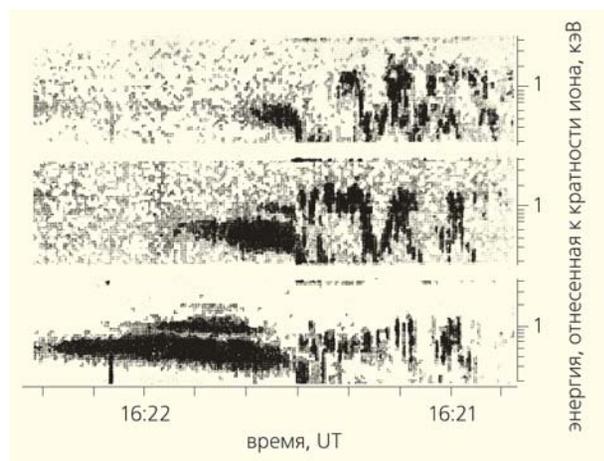


Рис.3. Энергоспектрограммы показаний трех разнонаправленных анализаторов потоков ионов при пересечении околоземной ударной волны (около 16:21:30 UT). Степень почернения линий пропорциональна величине потока.

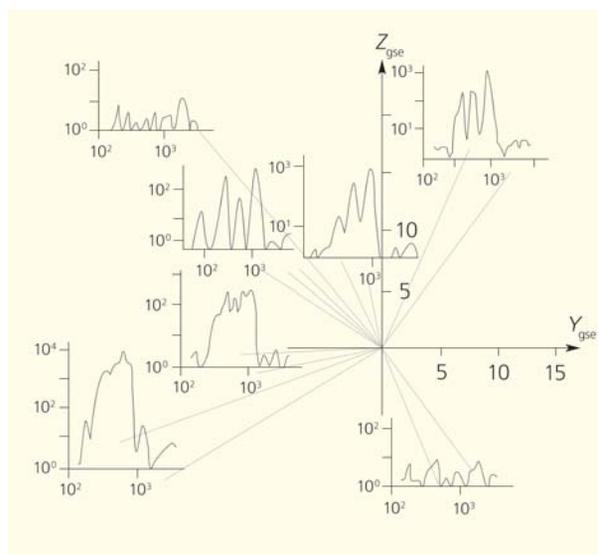


Рис.4. Энергетические спектры потока ионов, наблюдаемые в разных направлениях сразу же за фронтом ударной волны.

альфа-частиц. Фронт ударной волны пересекается примерно в 16:21:30 UT. Видны торможение потока ионов перед фронтом и дискретные пучки ионов в широкой области энергий сразу за фронтом. Это необычное явление — разбиение функции распределения при прохождении фронта на отдельные пучки — было обнаружено впервые именно в данном эксперименте. При дальнейшем продвижении потока ионов по магнитослою функция распределения через 40–50 с сглаживается, и наблюдается более-менее гладкое ее ядро. Пространственная картина потока плазмы также полностью меняется. Пример наблюдения энергетических спектров ионов в семи различных направлениях (т.е. семью разнонаправленными анализаторами) сразу же за фронтом ударной волны приведен на рис.4. Здесь проявляется весьма сложная картина многопиковых энергетических спектров, различных в разных направлениях и существенно отличающихся от типичного двухпикового (протоны и альфа-частицы) спектра невозмущенного солнечного ветра.

По данным плазменных измерений и детектирования вариаций магнитного поля в структуре околоземной ударной волны можно выделить следующую последовательность областей (двигаясь со стороны солнечного ветра):

- область развития сравнительно высокочастотных колебаний потока плазмы и магнитного поля;
- более протяженная область низкочастотных колебаний плазмы и поля, в которой происходит постепенный разогрев электронной компоненты, возрастание магнитного поля и (в конце области) резкий и большой поворот потока ионов;
- узкий (порядка 1 с) участок резкого скачка магнитного поля («рампа»), где функция распре-

ления ионов разбивается на отдельные пучки или сгустки во всем диапазоне углов и энергий;

— весьма протяженная (несколько минут) зона постепенной релаксации пучков и сглаживания функции распределения ионов.

Такая картина структуры околоземной ударной волны была получена впервые именно в проекте «Интершок» и может считаться его основным результатом.

Характеристики компонент

Перейдем теперь к детальному рассмотрению поведения частиц. Селективная регистрация протонов и альфа-частиц была осуществлена на спутнике «Прогноз-7» (1978), что позволяло определять их энергетические спектры при любых значениях параметров [4]. По этим данным были изучены соотношения между скоростями и температурами отдельных компонент. Зависимость отношения температур T_α/T_p от разности скоростей $v_\alpha - v_p$ по новым результатам заметно дополнила данные предыдущих измерений (рис.5): отношение температур возрастает при увеличении модуля разности скоростей независимо от знака этой разности, что, очевидно, свидетельствует о преимущественном нагреве альфа-частиц при их смещении относительно протонов.

Особый интерес представляют наблюдения ионов более тяжелых элементов, так как они позволяют самым прямым методом определить химический состав и оценить физическое состояние солнечной короны. При этом, в отличие от основных кинетических параметров солнечного ветра, которые существенно изменяются при его движении от Солнца до орбиты Земли, относительное содержание тяжелых ионов «замораживается» в нижней ко-

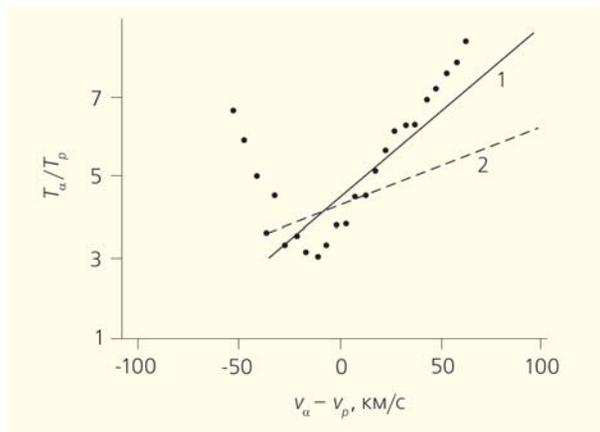


Рис.5. Зависимость отношения температур альфа-частиц и протонов солнечного ветра от разности их скоростей. Приведены данные, полученные на нашем спутнике «Прогноз-7» (точки), американских спутниках IMP6—8 (линия 1) и американском спутникеOGO-5 (линия 2).

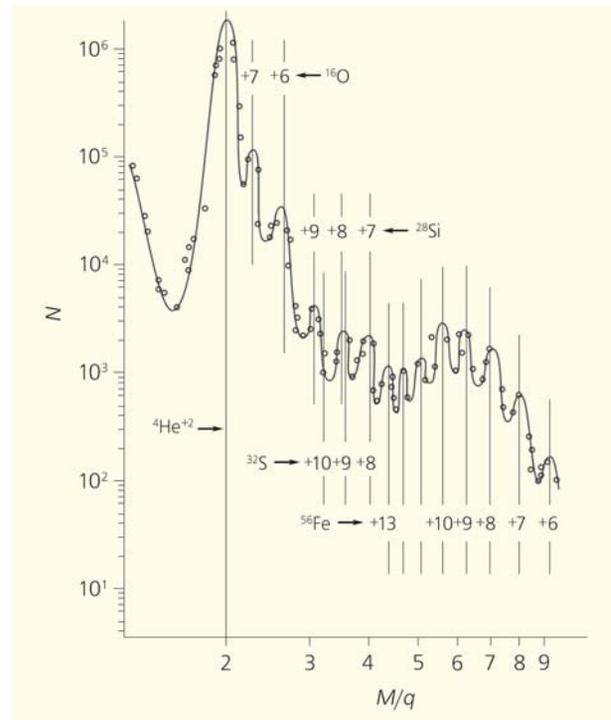


Рис.6. «Массовый» (по отношению массы к заряду) спектр ионов солнечного ветра, синтезированный из шести спектров, которые были измерены за интервал в 40 мин 11 декабря 1978 г. при заметно изменяющейся скорости солнечного ветра. N — число частиц, зарегистрированных за 10 с. Цифры со знаками «+» обозначают заряд иона.

роне Солнца на том уровне, где еще происходят неупругие соударения, и далее при движении в разреженной межпланетной среде остается неизменным. Наиболее информативные данные об этих ионах получают сейчас с помощью масс-анализа. Но уже в наших ранних измерениях энергетических спектров ионов благодаря высокому разрешению и хорошей чувствительности спектрометра на спутнике «Прогноз-7» удалось в событиях с небольшой скоростью и низкой температурой протонов впервые четко выделить множество дополнительных пиков, принадлежащих ионам более тяжелых, чем водород и гелий, элементов (с различной степенью ионизации) [5]. В предположении (подтвержденном в последующих экспериментах), что все тяжелые ионы движутся с той же переносной скоростью, что и ионы гелия, такие энергетические спектры можно преобразовать в массовые спектры ионов солнечного ветра (точнее — в спектры по отношению массы к заряду).

Пример такого очень богатого спектра (рис.6) дает самосогласованную картину содержания в солнечном ветре тяжелых ионов, которые с большой вероятностью были идентифицированы как ионы кислорода ^{16}O с ионизацией +7 и +6, ионы кремния ^{28}Si с ионизацией +9, +8 и +7, ионы серы ^{32}S с ионизацией +9, +8 и +7 и многочисленные ионы

железа ^{56}Fe с ионизациями от +13 до +6. При этом относительное (т.е. по отношению к протонам) содержание тяжелых ионов, полученное нами в том событии, составляло около $5 \cdot 10^{-3}$ для кислорода и около 10^{-4} для кремния и железа, что превышало ранее найденные значения.

Высота пиков ионов разной массы и степени ионизации была использована для оценки температуры солнечной короны. В соответствии с имевшимися модельными расчетами из наших данных были получены средние значения этой температуры для разных пар ионов от железа до кислорода: $(0.8-2.8) \cdot 10^6$ К. Они неплохо соответствуют другим результатам и отражают то существенное обстоятельство, что разные ионы действительно «замораживаются» на разных высотах в солнечной короне.

Было получено большое количество таких спектров для периода спокойного солнечного ветра с низкой переносной скоростью (260–310 км/с), низкой температурой протонов и альфа-частиц (2–4 эВ) и высокой концентрацией ионов ($10-30 \text{ см}^{-3}$) в течение четырех суток в декабре 1978 г. Динамика среднечасовых значений плотности тяжелых элементов за этот период обнаруживает их вариации в пределах порядка величины, что не было достаточно четко выявлено в прежних наблюдениях. Однако конкретно связать эти вариации с процессами на Солнце (образованием активных областей или выбросами корональной массы и т.д.) пока не удается. Отметим, что в активных областях с весьма высоким содержанием тяжелых ионов их суммарная энергия может составлять значительную часть (до 30%) от кинетической энергии солнечного ветра.

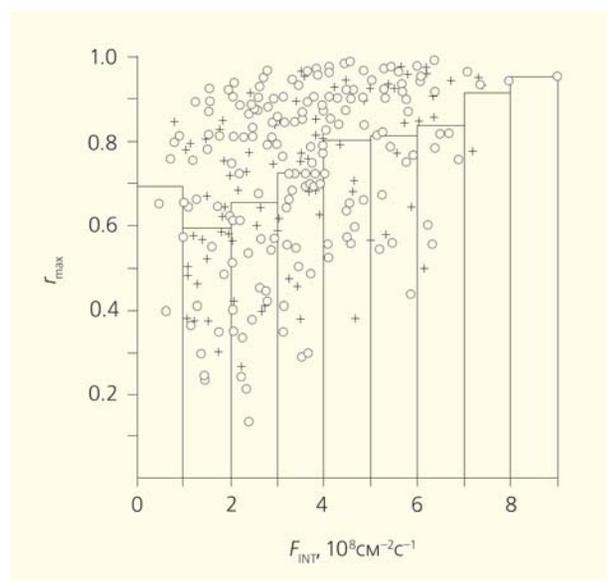


Рис. 7. Коэффициент корреляции r_{\max} потоков ионов солнечного ветра F_{INTV} измеренных на аппаратах «Интербол-1» и IMP-8 (крестики) и «Интербол-1» и WIND (кружки).

А насколько масштабны эти вариации в пространственном выражении? Результаты систематических измерений на нашем высокоапогейном спутнике «Интербол-1» в 1995–1996 гг. были сопоставлены с одновременными данными по солнечному ветру, полученными на двух американских космических аппаратах — WIND и IMP-8 (Interplanetary Monitoring Platform, платформа для мониторингирования межпланетной среды). В качестве количественного критерия соответствия различных измерений на разных аппаратах, сильно разнесенных в пространстве, использовался коэффициент их кросс-корреляции на шестичасовых интервалах [6]. При этом расстояния между аппаратами за рассматриваемый период варьировались от 20 до $200 R_E$ по оси X_{gsc} и от +35 до $-25 R_E$ по оси Y_{gsc} (напомним, что радиус Земли R_E равен примерно 6370 км; ось X_{gsc} направлена на Солнце, а ось Y_{gsc} перпендикулярна к ней и лежит в плоскости эклиптики).

Конечно, прежде всего была проверена интеркалибровка всех приборов и было показано, что между их показаниями имеется весьма хорошее соответствие.

Усредненная по довольно большому ансамблю (более 1400 ч измерений) величина коэффициента кросс-корреляции потоков ионов составила 0.73. Было проанализировано влияние различных факторов на эту корреляцию (скорости и величины потока, расстояния между аппаратами вдоль осей X_{gsc} и Y_{gsc} , величины относительных вариаций потока), и оказалось, что сильнее всего воздействует последний фактор. Корреляция временных рядов измерений скорости солнечного ветра получилась значительно более высокой — до 0.88. Для иллюстрации на рис. 7 показана зависимость коэффициентов кросс-корреляции потоков ионов для пар «Интербол-1»–IMP-8 (крестики) и «Интербол-1»–WIND (кружки) от средней по сегменту величины потоков ионов солнечного ветра. Видно, что с ростом средней величины потока корреляция заметно увеличивается. Можно сделать вывод, что большие вариации потоков ионов солнечного ветра отражают наличие достаточно крупномасштабных структур, которые коррелируют и на довольно больших расстояниях между аппаратами.

Солнечный ветер и магнитные бури

Конечно, для жителей нашей планеты важнее всего, как связаны характеристики солнечного ветра с магнитными бурями на Земле. В ИКИ РАН были предприняты систематические исследования такого рода, ведь приходящая к Земле солнечная плазма играет ключевую роль в возбуждении магнитных бурь и суббурь. Последние обычно приписывают появлению в ветре южной ($B_z < 0$) компоненты межпланетного магнитного поля, так как

в этом случае магнитосфера становится открытой для поступления энергии потока частиц внутрь нее. Обычный стационарный солнечный ветер содержит магнитное поле, лежащее в плоскости солнечного экватора, и поэтому не является геоэффективным, только возмущенные типы солнечного ветра могут содержать заметную B_z -компоненту, включая и южную.

Очень выразительна картина, показывающая зависимость интенсивности магнитосферного возмущения (описываемой Dst -индексом) от амплитуды отрицательной компоненты B_z межпланетного магнитного поля для солнечного ветра различных типов, полученная в работе [7] (рис.8). Не вдаваясь в детали этих типов (медленный ветер, быстрый ветер, область сжатия, плазменный поршень за МУВ и т.д.), отметим, что для всех них интенсивность магнитной бури (или суббури) сильнейшим образом (но в разных пределах) возрастает при увеличении амплитуды компоненты $B_z < 0$.

Проведенные исследования показали, что выброс корональной массы из Солнца на орбите Земли представляет собой скрученный жгут магнитных силовых линий (магнитное облако), который может содержать южную компоненту межпланетного магнитного поля. Кроме того, такая компонента может присутствовать и в области сжатия, образующейся при взаимодействии быстрого потока солнечного ветра с ранее испущенным медленным потоком.

Раздельное изучение влияния солнечного ветра различных типов [7] привело к важным следствиям. Во-первых, стало возможным более надежно предсказывать появление магнитосферных возмущений, так как различные структуры ветра обладают южной компонентой магнитного поля с разной вероятностью (т.е. имеют неодинаковую «геоэффективность»). Во-вторых, это позволило исследовать особенности механизмов генерации

бурь и суббурь разными источниками, так как при одной и той же $B_z < 0$ отклик магнитосферы («эффективность процесса») оказывается тем или иным в зависимости от типа источника.

Указанные исследования демонстрируют, что «геоэффективность» выше в магнитных облаках, а «эффективность процесса» оказывается более сильной в слоях сжатия или при взаимодействии быстрого и медленного потоков. Вероятность процесса генерации магнитной бури для корональных выбросов массы и вспышек составляет 40–60%, т.е. лишь немного превышает вероятность случайных процессов. Из этого следует, что прогноз геомагнитных бурь на основании солнечных наблюдений недостаточно надежен, так как может содержать большой процент ложных тревог.

Развитие экспериментов

Новая страница в исследовании солнечного ветра была открыта экспериментом «Плазма-Ф» на спутнике «Спектр-Р», запущенном в 2011 г. Во всех предыдущих наших экспериментах (и в ныне функционирующих зарубежных миссиях) временное разрешение измерений параметров солнечного ветра составляло от нескольких десятков секунд до нескольких секунд. С помощью же нашего плазменного спектрометра БМСВ (быстрый монитор солнечного ветра) [8] на спутнике «Спектр-Р» оно было уменьшено вплоть до 30 мс (!). Другое преимущество этого прибора — способность непрерывно регистрировать направление вектора потока ионов. Это позволило получить качественно новые и важные результаты [9].

Прежде всего был показан струйный характер солнечного ветра: поток ионов на самом деле не однороден, а состоит из отдельных струек с постоянно меняющимся направлением движения. На приведенном графике (рис.9) хорошо видны вариации не только величины, но и полярного и азимутального углов потока с временными изменениями в масштабах примерно от 1 до 5 с. В работе [9] было впервые показано, что частотные спектры флуктуаций потока ионов (рис.10) как для величины потока, так и для его полярного угла имеют две ветви с разными наклонами — низкочастотную (показатель наклона p_1) и высокочастотную (показатель наклона p_2) — и граница между этими ветвями находится на частоте примерно 1–3 Гц.

Существенное продвижение было достигнуто в вопросе о толщине фронтов уже знакомых нам межпланетных ударных волн. В прежних экспериментах эта толщина не могла быть измерена из-за недостаточного временного разрешения, так как вследствие высокой скорости движения ударной волны (300–600 км/с) ее фронт пробегает мимо космического аппарата за доли секунды. На примере регистрации фронта МУВ прибором БМСВ

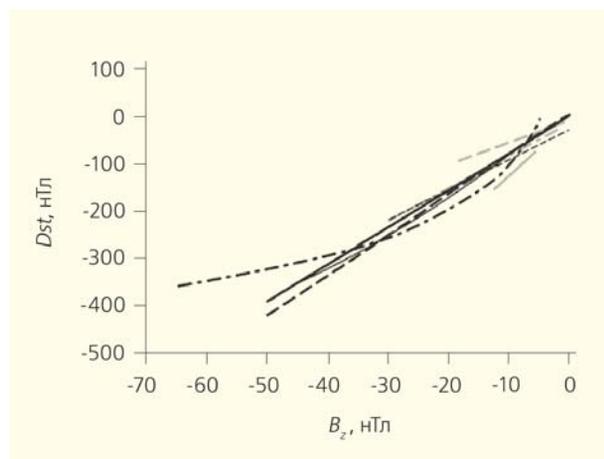


Рис.8. Усредненная зависимость интенсивности магнитосферного возмущения от величины B_z -компоненты межпланетного магнитного поля по данным разных экспериментов.

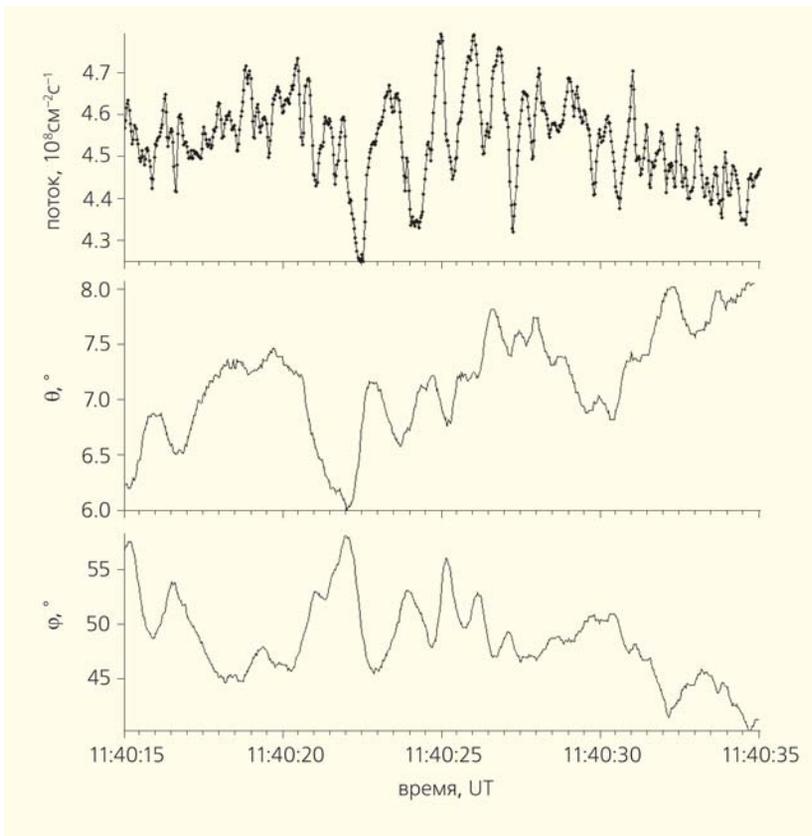


Рис.9. Изменение величины и направления потока ионов солнечного ветра (приведены полярный θ и азимутальный ϕ углы вектора потока).

(рис.11) видно быстрое изменение величины потока ионов и полярного угла его направления: скачкообразное возрастание потока ионов солнечного ветра и резкий поворот этого потока происходят за время около 0.2 с. Прибор также фикси-

рует большие и постепенно затухающие квазигармонические колебания и величины потока, и полярного угла с периодом около 0.4 с. за фронтом МУВ, что, по нашим данным, весьма типично.

На основе довольно высокой статистики (несколько десятков МУВ, зарегистрированных прибором БМСВ), впервые была проведена оценка толщины фронтов МУВ, которая составила от 50 до 500 км при средней их величине около 200 км. Эта величина близка по порядку к значению гирорадиуса (радиуса вращения протонов в магнитном поле солнечного ветра), вычисленного для тепловой скорости ионов перед фронтом МУВ.

Еще одним интересным обстоятельством, выявленным в наших измерениях [9], стало обнаружение довольно быстрых вариаций относительного содержания альфа-частиц — второй по обилию после протонов ионной компоненты в солнечном ветре. Прибор БМСВ благодаря своему высокому энергетическому разрешению мог выделять ионы гелия, используя селекцию частиц по энергии на единицу заряда (у альфа-частиц это отношение в два раза больше, чем у протонов). Оценки содержания ионов гелия проводились во множестве прежних экспериментов, но временное разрешение этих оценок было,

еще одним интересным обстоятельством, выявленным в наших измерениях [9], стало обнаружение довольно быстрых вариаций относительного содержания альфа-частиц — второй по обилию после протонов ионной компоненты в солнечном ветре. Прибор БМСВ благодаря своему высокому энергетическому разрешению мог выделять ионы гелия, используя селекцию частиц по энергии на единицу заряда (у альфа-частиц это отношение в два раза больше, чем у протонов). Оценки содержания ионов гелия проводились во множестве прежних экспериментов, но временное разрешение этих оценок было,

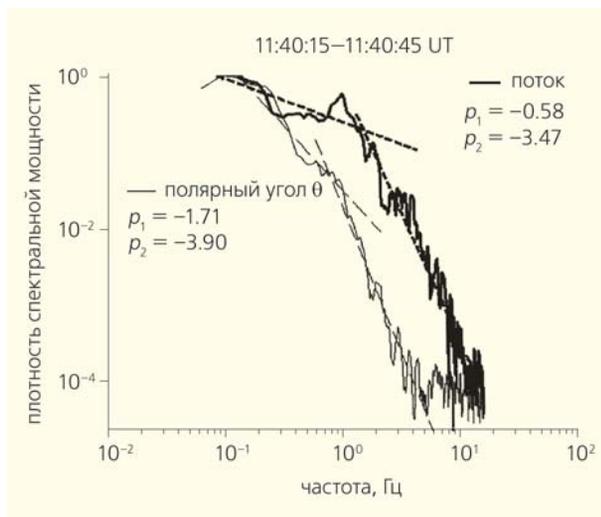


Рис.10. Частотные спектры величины и полярного угла вектора потока ионов солнечного ветра.

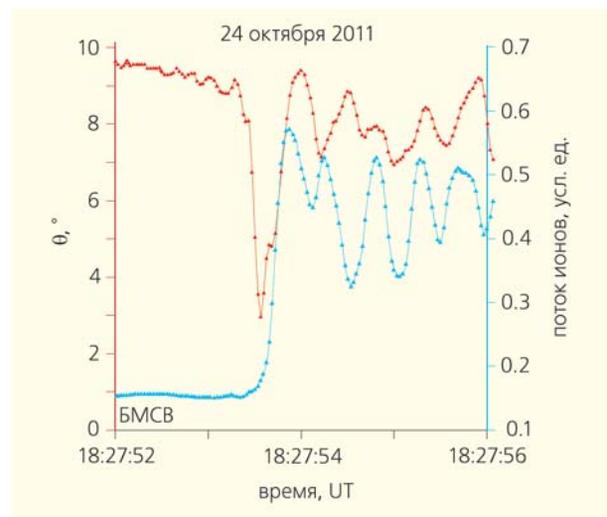


Рис.11. Регистрация изменений величины вектора потока ионов и его полярного угла при прохождении фронта МУВ.

как правило, не лучше нескольких минут. В наших же измерениях величина содержания ионов гелия в солнечном ветре определялась постоянно с периодичностью в 3 с.

На рис.12 приведен довольно типичный пример результатов, полученных за 40-минутный интервал измерений в солнечном ветре, на котором относительное содержание ионов гелия менялось очень сильно — от 2.5 до 8%. Точки на этом графике стоят через 3 с. Видно, что весьма существенные вариации содержания гелия временами могут происходить очень быстро — всего лишь за несколько (3–10) секунд.

Если предположить, что эти изменения суть следствие перехода спутника от наблюдения одной струи солнечного ветра, испущенной в одном участке солнечной короны, к другой струе, испущенной уже иным ее участком, то мы приходим к заключению: сильно различающиеся содержанием ионов гелия участки короны могут иметь столь малый размер, как ≈ 1000 км (в масштабах Солнца это, конечно, очень малая величина).

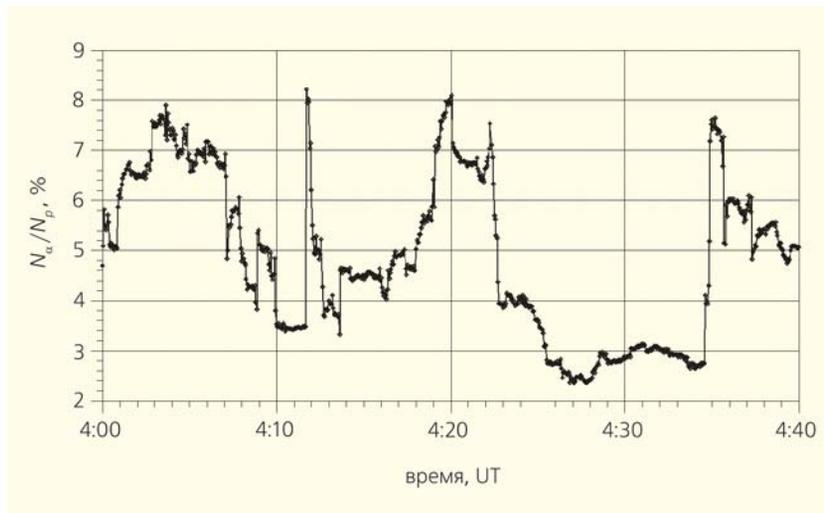


Рис.12. Временные вариации содержания альфа-частиц по отношению к протонам в солнечном ветре.

Здесь мы смогли коснуться лишь небольшой части новых и важных сведений, которые получены в ИКИ РАН на протяжении последних четырех десятилетий. Интенсивное экспериментальное изучение солнечного ветра с борта различных отечественных космических аппаратов, обработка и интерпретация полученных данных успешно продолжаются и сейчас. ■

Литература

1. Вайсберг Л., Камбу Ф., Застенкер Г. и др. Регистрация на орбите Земли плазмы от солнечных вспышек в августе 1972 г. // Проблемы солнечной активности и космическая система «Прогноз». М., 1977. С.155–174.
2. Cambou F., Vaisberg O., Espagne H. et al. Characteristics of interplanetary plasma near the Earth observed during the solar events of August 1972 // Space Research. 1975. V.15. P.461.
3. Застенкер Г.Н., Вайсберг О.Л., Немечек З. и др. Изучение тонкой структуры ударных волн с помощью комплекса плазменных спектрометров БИФРАМ // Космич. исслед. 1986. Т.24. №2. С.151–165.
4. Ермолаев Ю.И., Ступин В.В., Застенкер Г.Н. и др. Вариации гидродинамических параметров протонов и альфа-частиц солнечного ветра по измерениям на спутнике «Прогноз-7» // Космич. исслед. 1990. Т.28. №5. С.218–225.
5. Вайсберг О.Л., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н. и др. Потоки тяжелых ионов в солнечном ветре и их использование для диагностики солнечной короны // Исследования солнечной активности и космическая система «Прогноз». М., 1984. С.73–80.
6. Застенкер Г.Н., Далин П.А., Лазарус А. Дж. и др. Сопоставление параметров солнечного ветра, измеренных одновременно на нескольких космических аппаратах // Космич. исслед. 1998. Т.36. №3. С.228–240.
7. Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лоджина И.Г. и др. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям // Космич. исслед. 2007. Т.45. №1. С.3–11; №6. С.489–498.
8. Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др. Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ // Космич. исслед. 2013. Т.51. №2. С.1–12.
9. Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н., Петрукович А.А. и др. Эксперимент «Плазма-Ф» на спутнике «Спектр-Р» // Космич.исслед. 2013. Т.51. №2. С.83–87.

Пыль и пылевая плазма в Солнечной системе

С.И.Попель

Трудно представить себе заполненную плазмой область Солнечной системы, свободную от мелкодисперсных пылевых частиц. Нано- и микро-масштабные пылевые частицы обнаруживаются в межпланетном космическом пространстве, в плазме ионосфер и магнитосфер планет Солнечной системы, в планетарных кольцах, в окрестностях космических тел, не имеющих собственной атмосферы — таких как Луна, Меркурий, астероиды, кометы и др. Пожалуй, есть лишь одно исключение из этого правила — собственно Солнце и область в непосредственной близости от него, где из-за высоких температур пыль существовать не может. Рассеяние солнечного излучения на частицах межпланетной пыли формирует F-компоненту спектра солнечной короны.

В результате взаимодействия с электронами и ионами окружающей плазмы, а также под действием солнечного излучения пылевые частицы приобретают электрический заряд и становятся одним из важных компонентов среды, существенно влияющим на ее свойства и динамику [1]. Плазму, содержащую электроны, ионы, нейтральные частицы, а также заряженные твердые частицы и/или жидкие капли, которые либо самопроизвольно образуются в плазме в результате различных процессов, либо вводятся туда извне,



Сергей Игоревич Попель, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией плазменно-пылевых процессов в космических объектах ИКИ РАН. Область научных интересов — космическая плазма, комплексная (пылевая) плазма, нано- и микроструктурные объекты и пыль в природе, явления самоорганизации, волновые процессы, сильные возмущения в природе и лаборатории, включая ударные волны.

принято называть пылевой. Для обозначения плазменно-пылевых систем пользуются и другими терминами: «комплексная плазма», «коллоидная плазма», «плазма с конденсированной дисперсной фазой», а также «плазма мелкодисперсных частиц». Первые два наименования употребляются наиболее часто. Применительно к космической плазме, которая содержит заряженные пылевые частицы, приводящие к тем или иным физическим и/или динамическим последствиям, в основном употребляют понятие «пылевая плазма».

Что интересно и почему?

В планетологии нано- и микро-размерные компоненты выступают в качестве основных элементов структуры космических тел, поэтому исследования природных нано- и микро-размерных пылевых объектов могут привести к расширению наших представлений о фундаментальных процессах геологии и планетообразования [2]. Так, например, протопланетная пыль имеет размеры от 10 нм до 150 нм. Она относится к хондритам класса C1. Если проанализировать состав углистых хондритов, получаются минералы, входящие в состав мантии Земли. Можно сделать вывод, что по крайней мере планеты земной группы произошли из наномасштабных частиц, состав которых отвечает углистым хондритам. Есть серьезные аргументы в пользу предположения, что Солнечная система в свое время сформировалась из плазмы, содержащей заряженные пылевые частицы [3]. Таким образом, изучение мелкодисперсных пылевых частиц и пылевой

плазмы в Солнечной системе, ионосферах и магнитосферах Земли и других планет может дать новую информацию о межзвездном веществе, механизмах планетообразования и т.д.

Интерес к описанию пылевой космической плазмы резко возрос в конце 1990-х годов, что было связано с разработкой к тому времени теоретических методов исследования пылевой плазмы, в том числе и в природных системах [1]. Важная ее особенность — быстрая зарядка пылевых частиц, идущая за счет ряда процессов, среди которых можно выделить рекомбинацию электронов и ионов на поверхности пылевых частиц, фотоэффект и др. Наличие заряженной пыли существенным образом сказывается на коллективных процессах, т.е. процессах, связанных с наличием колебаний или шумов конечной амплитуды (взаимодействие которых с частицами заметно влияет на макроскопические свойства плазмы), на процессах самоорганизации в среде, а также на ее диссипативных свойствах. Присутствие массивных (по сравнению с ионами и электронами) заряженных пылевых частиц изменяет характерные пространственные и временные масштабы в плазме, а в ряде ситуаций даже порождает новую физику тех или иных явлений. Изменяемость (в зависимости от текущих параметров плазмы) зарядов пылевых частиц модифицирует спектры волн, распространяющихся в среде, влияет на эффекты затухания волн, определяет характер развития неустойчивостей и нелинейных процессов и т.д. Процессы самоорганизации в пылевой плазме приводят к формированию капель, облаков, разного рода структур, плазменно-пылевых кристаллов и т.д.

В последние годы существенно усилился интерес и к непосредственному изучению космических пылевых частиц. Была организована миссия НАСА «Stardust» («Звездная пыль»), одна из основных целей которой — сбор и доставка на Землю частиц из окрестностей ядра кометы 81P/Wild 2 — была успешно реализована 15 января 2006 г., когда капсула с образцами кометного вещества вернулась на Землю [4]. В недавней американской миссии LADEE («Lunar Atmosphere and Dust

Environment Explorer» — «Исследователь лунной атмосферы и пылевой среды») [5] лунная пыль изучалась с помощью наблюдений с орбиты. В России готовятся миссии «Луна-25» и «Луна-27». На посадочных модулях станций «Луна-25 и -27» предполагается разместить аппаратуру [6], которая будет исследовать свойства пылевой плазмы над поверхностью Луны (рис.1). Посадка спускаемых аппаратов планируется в области высоких широт в южной полусфере Луны, что существенным образом отличает эти миссии от всех более ранних миссий, когда прилунения осуществлялись недалеко от экватора.

Поэтому, рассказывая о свойствах пыли/пылевой плазмы в пространстве вокруг Солнца, особое внимание уделим ее состоянию над поверхностью Луны, важному для успешного осуществления экспериментов в рамках будущих проектов «Луна-25 и -27».

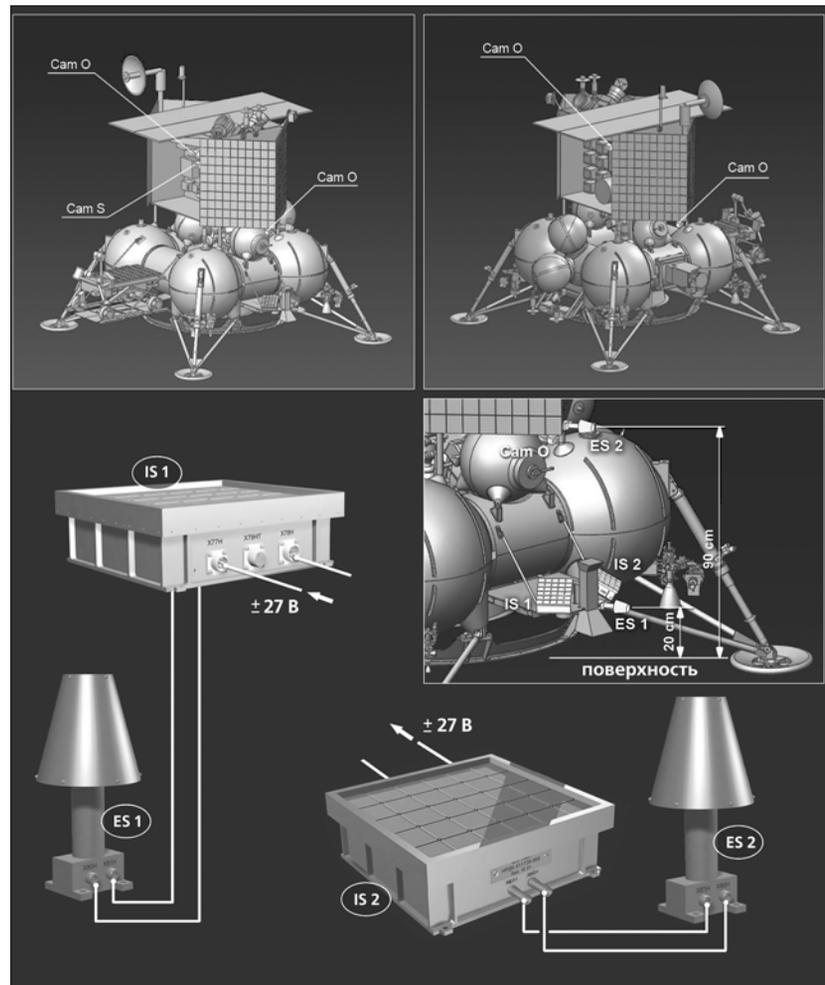


Рис.1. Схема расположения аппаратуры для исследования пылевой плазмы у поверхности Луны на станциях «Луна-25 и -27». Отмечены инструменты регистрации пылевой плазмы: пьезоэлектрические ударные сенсоры IS; выносные датчики электрического поля ES; камеры для оптических наблюдений (стереокамера Cam S и обзорные камеры Cam O).

Зодиакальное пылевое облако

Межпланетная пыль распределена по Солнечной системе неравномерно: основное ее количество концентрируется в плоскости эклиптики. Это скопление пыли, заполняющей межпланетное пространство между Землей и Солнцем, называется зодиакальным пылевым облаком. Содержание пыли в нем падает по мере удаления от Солнца и от плоскости эклиптики. Солнечное излучение, рассеиваясь на частицах этого облака, дает зодиакальный свет. На основе наблюдений последнего космическими зондами «Helios-1 и -2» на расстояниях от 0.3 до 1 а.е. до Солнца были выполнены измерения концентраций пыли n в зависимости от расстояний r до Солнца. Оказалось, что в плоскости эклиптики $n \propto r^{-1.3}$. Результаты наблюдений указывают на существенный вклад в зодиакальный свет на расстояниях 1 а.е. от Солнца рассеяния на микромасштабных частицах размерами 1–100 мкм [7].

Источником мелких частиц, заполняющих Солнечную систему, служат разрушающиеся ядра комет и столкновения тел в поясе астероидов. Самые мелкие частицы постепенно приближаются к Солнцу в результате эффекта Пойнтинга—Робертсона. Этот эффект заключается в том, что давление солнечного света на движущуюся частицу направлено не точно по линии Солнце—частица, а из-за абберации света отклонено назад по отношению к ее скорости и потому тормозит ее движение. Хотя пылевые частицы, как правило, и состоят из тугоплавких материалов, при приближении к Солнцу до расстояний в несколько солнечных радиусов R_{\odot} важным становится процесс сублимации. Он происходит на разных расстояниях от Солнца для частиц различных размеров, что обусловлено сильной зависимостью температуры частицы от ее размера. В результате сублимации при уменьшении радиуса частицы до ~500 нм отношение силы давления солнечного света к силе солнечной гравитации увеличивается. Увеличение этого отношения уравнивает силу дрейфа Пойнтинга—Робертсона, и, таким образом, происходит накопление субмикронных и микромасштабных частиц в зоне их сублимации. Вертикальная структура пылевого облака на расстояниях от Солнца, не превосходящих $10R_{\odot}$, имеет следующий вид [7]: частицы с размерами, превышающими 10 мкм, находятся в диске с типичной толщиной в десятки градусов; частицы размером не-

сколько микрометров заполняют более широкий объем, имеющий также форму диска; субмикронные частицы формируют вокруг Солнца гало почти сферической формы с радиусом, большим $10R_{\odot}$.

Кометная пыль

Высвобождение пыли при разрушении ядер комет происходит следующим образом. Приближаясь к Солнцу, комета обычно приобретает характерную структуру: видимый гигантский хвост, ядро (как правило, невидимое) очень маленького размера по сравнению с хвостом, а также атмосферу, окружающую ядро, — ее называют комой кометы. Кома и хвост формируются как следствие истечения вещества из ядра кометы. В ядре ледяные слои из замороженных газов чередуются с пылевыми слоями. По мере прогревания солнечным излучением образующиеся в результате возгонки газы вытекают наружу, увлекая за собой облака пыли. В результате ядро кометы становится источником газопылевого потока, движущегося (вслед за ядром) навстречу солнечному ветру.

На рис.2 представлена фотография кометы Хейла—Боппа. На ней видны два хвоста, четко разделенные в плоскости неба. Верхний, направленный в противоположную от Солнца сторону, образуют главным образом увлекаемые солнечным ветром ионы CO^+ , которые и придают голубой оттенок цвету этого хвоста. В нижнем (белом) хвосте летят пылевые частицы размером около 1 мкм. Пыль из



Рис.2. Фотография кометы Хейла—Боппа, снятая 14 марта 1997 г. в Европейской южной обсерватории. Верхний хвост кометы состоит в основном из ионов CO^+ , нижний — из пылевых частиц размером ~1 мкм.

www.eso.org

Таблица

Размеры и плотности микрочастиц космической пыли

Радиус, см	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$1.44 \cdot 10^{-5}$	$1.77 \cdot 10^{-5}$	$2.04 \cdot 10^{-5}$	$2.98 \cdot 10^{-5}$	$4.51 \cdot 10^{-5}$	$6.63 \cdot 10^{-5}$	$1.02 \cdot 10^{-4}$	$2.36 \cdot 10^{-4}$	$5.57 \cdot 10^{-4}$
Плотность, г/см ³	2.9	2.85	2.82	2.8	2.72	2.59	2.45	2.26	1.8	1.38

ядра и комы кометы отбрасывается назад силой светового давления Солнца. Однако из-за достаточно больших масс пылевых частиц на их движении существенным образом сказываются инерция и солнечная гравитация. Поэтому нижний (пылевой) хвост кометы отклонен в сторону от верхнего (ионного) хвоста. Во время съемки комета выделяла газа и пыли около 200 т в секунду.

Соотношение пыль/газ, характеризующее отношение масс тугоплавких и летучих компонент в ядре, которое было определено из наблюдений комы различных комет, находится в диапазоне от 0.1 до 1 [8]. Распределение пыли по размерам представляет собой степенную функцию размера частицы с показателем, близким к -4 [9]. На примере кометы Галлея в рамках проекта «Вега» было показано [10], что минимальный размер частиц в указанном распределении ~ 10 нм.

Исследования пылевых частиц вблизи кометы Галлея, а также частиц из микрократеров на Луне, потоков метеоров, межпланетных пылевых частиц, собранных космическими аппаратами, позволили получить [11] параметры, которые широко используются для исследования зарядки и динамики пылевых частиц в магнитосфере Земли и Солнечной системе (см., например, [9]). Размеры и плотности микромасштабных пылевых частиц по данным работы [11] приведены в таблице.

Впервые исследование частиц пыли кометного происхождения в земных условиях удалось провести в рамках уже упоминавшейся миссии «Stardust». Основной целью миссии был сбор кометной пыли с последующей доставкой образцов на Землю. На некоторых участках траектории космического аппарата «Stardust» собирались также образцы межпланетной пыли. Она захватывалась коллектором, заполненным аэрогелем и установленным на космическом аппарате. Когда последний находился в окрестностях ядра кометы 81P/Wild 2 (точка максимального сближения «Stardust» была примерно в 236 км от ядра), в коллекторе оседали пылевые частицы. Затем он был герметично закрыт и спрятан в возвращаемую капсулу, которая в январе 2006 г. вернулась на Землю. После вскрытия капсулы стало ясно: миссия выполнена успешно — аэрогель содержал крупные и мелкие частицы кометного вещества (рис.3). Исследование частиц показало, что их размеры варьировались от десятков нанометров до десятых долей миллиметра. В среднем они оказались крупнее частиц кометы Галлея.

Выводы, которые последовали после изучения образцов частиц, содержащихся в аэрогеле аппарата «Stardust», стали довольно неожиданными. Дело в том, что, хотя в настоящее время орбита кометы 81P/Wild 2 располагается между орбитами

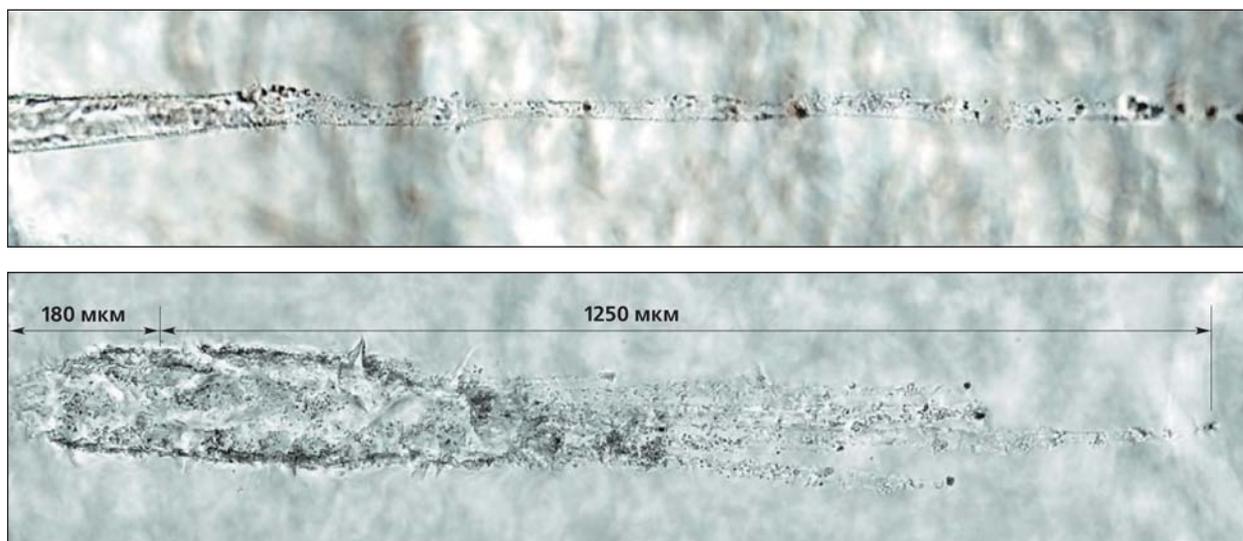


Рис.3. Фотографии треков от пылевых частиц кометного происхождения в аэрогеле аппарата «Stardust» [4]. Движение частиц происходило слева направо. На верхнем рисунке видно, что твердая частица перемещается без дальнейшей фрагментации. На нижнем рисунке изображена эволюция первоначально слабосвязанного скопления частиц, каждая из которых имеет размер в несколько микрометров.

Марса и Юпитера, согласно имеющимся представлениям, большую часть своей истории (продолжающейся около 4.5 млрд лет) эта комета имела более отдаленную орбиту и в основном странствовала за пределами орбиты Нептуна. В 1974 г. комета прошла вблизи Юпитера, мощное гравитационное поле которого изменило ее орбиту — перенесло ее во внутреннюю часть Солнечной системы. Таким образом, ожидалось, что частицы, собранные аппаратом «Stardust», должны представлять собой примеры твердого вещества с окраин Солнечной системы [4]. И действительно, исследование минералогического состава частиц показало: большая их часть состоит из явно холодного материала с дальней периферии. Однако около 10% сформировалось в условиях высоких температур (больших 1100°C)! Среди этих 10% — микрокристаллы оливина, состоящие из железа, марганца и других элементов, кристаллы осборнита, включающего в себя сернистый кальций и сернистый титан, и др. Как видно на примере этих данных, изучение свойств космических пылевых частиц ставит перед исследователями ряд вопросов о формировании исходного материала комет и в конечном итоге может внести уточнения в понимание процессов, происходивших при образовании Солнечной системы.

Ключевой момент взаимодействия солнечного ветра с комой кометы — формирование головной ударной волны. Оказывается, протоны солнечного ветра сильнее взаимодействуют с ионами кометы, чем заряженные и нейтральные частицы, содержащиеся в плазме комы кометы, между собой. Этот факт зачастую позволяет трактовать головную ударную волну как разновидность ионно-звуковой ударной волны. Присутствие заряженной пыли приводит к еще одному важному виду взаимодействия — взаимодействию протонов солнечного ветра с пылевыми частицами в коме кометы. Для типичного ядра кометы с радиусом ~1 км и для относительно плотной комы (с концентрацией пыли, превосходящей 10^6 см^{-3}) при формировании головной ударной волны важную роль играет аномальная диссипация, обусловленная зарядкой пылевых частиц [12]. Такая головная ударная волна, по-видимому, имеет природу, которая аналогична природе пылевых ионно-звуковых ударных волн, свойственных пылевой плазме.

Пыль в магнитосфере Земли

Несмотря на достигнутые успехи в изучении межпланетной пыли в рамках описанных выше удаленных миссий, основные исследования ее свойств все же проводятся по данным наблюдений в магнитосфере Земли. Элементарный состав пылевых частиц естественного происхождения в земной магнитосфере и микрометеороидов ча-

сто похож на состав углеродистых метеоритов хондритных классов C1 и C2 и включает в себя такие элементы, как Mg, Al, Si, S, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni [13]. Вместе с тем часто встречающиеся среди частиц межпланетной пыли нано- и микромасштабные оливиновые скопления, а также сферулы металла (или его производных) диаметром от 100 нм до 500 нм, впаянные в силикатное стекло (так называемые частицы GEMS — Glass with Embedded Metal and Sulphides — стекло с включенными металлами и сульфидами), не наблюдались в качестве вещества микрометеороидов. Следует отметить, что определенная роль может принадлежать антропогенным частицам. На рис.4 приведена фотография, на которой изображена хондритная частица межпланетной пыли, прикрепленная к сферуле техногенного происхождения из оксида алюминия [14].

Приобрести заряд пылевые частицы в космосе могут различными путями. Что касается частиц межпланетной пыли, механизмы зарядки здесь — поглощение пылевыми частицами электронов и ионов окружающей плазмы, эмиссия электронов, вызванная электронным или ионным ударом, а также поглощением света (фотоэффект), и, наконец, столкновения пылевых частиц между собой. Основным эффектом, связанным с процессом зарядки пылевых частиц (и, как следствие, их

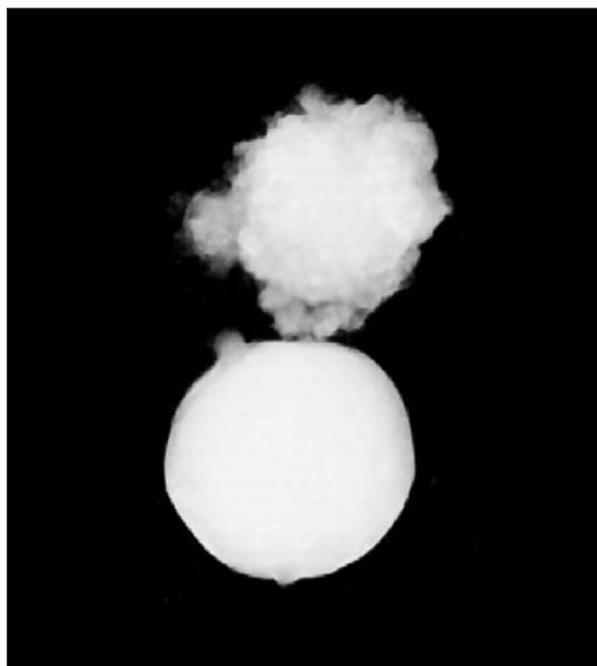


Рис.4. Фотография хондритной частицы межпланетной пыли (номер по каталогу «Johnson Space Center» U2015D8), прикрепленной к сферуле техногенного происхождения, которая состоит из оксида алюминия (U2015D9) [14]. Каждая частица имеет диаметр, приблизительно равный 6 мкм. Фотография доказывает, что частицы межпланетной пыли могут загрязняться техногенным веществом.

переменными зарядами), становится диффузия орбит пылевых частиц. Систематические вариации заряда, обусловленные градиентами параметров плазмы, а также модуляция токов плазмы, возникающая вследствие изменения скоростей пылевых частиц относительно потоков плазмы, могут приводить для разных условий к процессам переноса частиц внутри магнитосферы, выбросам частиц из нее, а также к захвату магнитосферой пылевых частиц из окружающего пространства. На процесс переноса пылевых частиц в магнитосфере может влиять также большая величина их заряда, достигающая $4 \cdot 10^5$ зарядов электрона. При этом продольная (вдоль магнитного поля) диффузия пылевых частиц способна существенно (в десятки раз) превосходить обычную диффузию броуновской частицы, тогда как диффузия поперек магнитного поля, как правило, проходит так же, как и в обычной замагниченной электронно-ионной плазме [13].

Лунная пыль

Наблюдения лунной пыли имеют довольно давнюю историю. Астронавты, побывавшие на Луне, выяснили, что слой пыли на ее поверхности составляет несколько сантиметров. За счет адгезии эта пыль прилипает к скафандрам (рис.5), поверхностям космических аппаратов, приборам и т.д., что может угрожать работе систем. Так, в частности, на поверхности приборов, покрытых пылью, резко возрастает поглощение солнечного излучения, что может привести к их перегреву. На скафандрах пыль заносится внутрь лунного модуля, и весь трехдневный обратный путь на Землю астронавты могут вдыхать ее частицы, присутствующие в состоянии невесомости в воздухе. Таким образом, лунная пыль представляет собой существенный фактор риска и для здоровья астронавтов.

Во время космических миссий кораблей «Apollo» к Луне было замечено, что солнечный свет рассеивается в области терминатора, а это в свою очередь приводит к формированию лунных зорь и стримеров над поверхностью [15]. Последующие наблюдения показали, что рассеяние света наиболее вероятно происходит на заряженных пылевых частицах, источником которых служит поверхность Луны [16]. На основе данных спускаемых космических аппаратов «Surveyor» был сделан вывод, что пылевые частицы с размерами около 5 мкм могут парить над поверхностью Луны приблизительно в 10 см от поверхности. В миссиях «Apollo» проводились наблюдения субмикронной пыли в лунной экзосфере на высотах вплоть до примерно 100 км. Выводы о существовании пыли на больших высотах (от 30 до 110 км) можно сделать из недавних наблюдений лунного орбитального аппарата LADEE [5].



Рис.5. Астронавт «Apollo-17» Харрисон Шмитт собирает частицы лунного грунта. Нижняя часть его скафандра покрыта пылью.

В настоящее время фактически считается общепринятым [17, 18], что пыль над лунной поверхностью — составная часть плазменно-пылевой системы (рис.6). Поверхность Луны заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли. При взаимодействии с из-

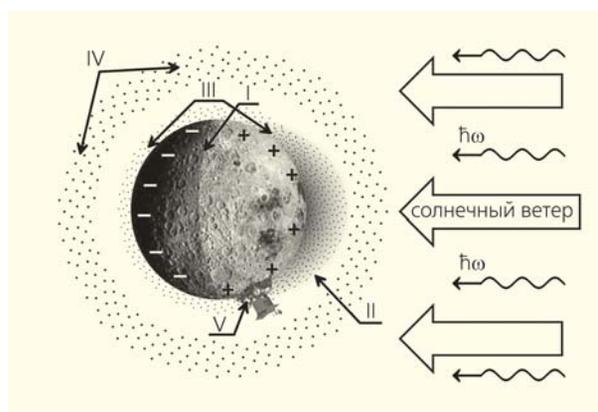


Рис.6. Основные элементы, характеризующие плазменно-пылевую систему над лунной поверхностью: терминатор (I), фотоэлектроны (II), приповерхностная пыль (III), пыль на больших высотах (IV), фотоны солнечного излучения ($h\omega$), солнечный ветер. Показан также спускаемый аппарат (V) будущей лунной миссии на высоких широтах в южной полусфере.

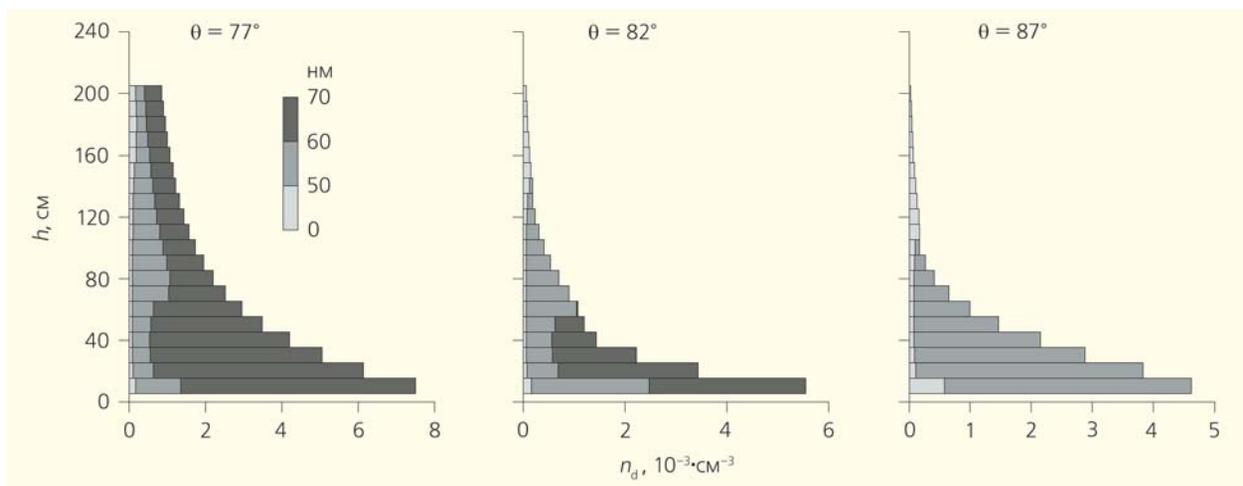


Рис.7. Распределения пылевых частиц над освещенной солнечным излучением частью поверхности Луны для значений $\theta = 77^\circ, 82^\circ, 87^\circ$. Длина одноцветного горизонтального участка на каждом из графиков характеризует концентрацию частиц n_d (в см^{-3}) на соответствующих высотах h с размерами в интервале, указанном на шкале в верхней правой части первого графика. Общая длина горизонтального участка на графике отвечает полной концентрации частиц с представленными на нем размерами.

лучением лунные породы испускают электроны благодаря фотоэффекту, что приводит к формированию над поверхностью слоя фотоэлектронов. Фотоэлектроны поставляются и пылевыми частицами, парящими над поверхностью (они тоже поглощают солнечный свет). Пылевые частицы, находящиеся на поверхности Луны или в приповерхностном слое, не только испускают, но и поглощают фотоэлектроны, а также фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра; если же Луна находится в хвосте магнитосферы Земли, то — электроны и ионы плазмы магнитосферы. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, подъему и движению пыли.

Данные [17], характеризующие распределения пылевых частиц в приповерхностном слое на освещенной части Луны над участками реголита, приведены на рис.7 и 8. Исследование освещенной части Луны чрезвычайно важно для понимания той картины, которую будут наблюдать в планируемых исследованиях в рамках проектов «Луна-25 и -27», поскольку работа автоматических станций, питающихся энергией от солнечных батарей, будет происходить в основном во время лунного дня. Представленные на рис.7 гистограммы описывают расчеты концентраций пылевых частиц над поверхностью Луны для углов θ между местной нормалью и направлением на Солнце, равных $77^\circ, 82^\circ$ и 87° . На рис.8 показано (тоже на основе вычислений), до каких максимально возможных высот могут подняться пылевые частицы различных размеров a и как распределяются по высоте зарядовые числа для различных значений угла θ . Наши данные опровергают вывод работы [18] о су-

ществовании мертвой зоны (в области лунных широт около 80°), где пылевые частицы не поднимаются над поверхностью. Именно указанная область широт и представляет интерес, поскольку, как уже отмечалось, прилуниться станции «Луна-25 и -27» должны будут в области высоких широт. Однако результаты, аналогичные тем, которые приведены на рис.7 для значений угла θ , равных $77^\circ, 82^\circ$ и 87° , можно получить и для других значений θ . Наклон оси Луны относительно плоскости эклиптики составляет всего 1.5424° , что определяет достаточно небольшое отличие лунной широты от угла θ . Таким образом, подъем пылевых частиц над поверхностью Луны возможен во всем диапазоне углов θ , и никакой мертвой зоны вблизи указанных широт, где частицы бы не поднимались вверх, нет. Отсутствие мертвой зоны связано с присутствием над лунной поверхностью фотоэлектронов.

Несмотря на определенные успехи, достигнутые в описании пыли и плазменно-пылевой системы в окрестностях Луны, следует отметить ряд важных вопросов, на которые еще предстоит получить ответы. Прежде всего, при расчетах параметров плазменно-пылевой системы весьма существенное значение имеет квантовый выход лунного реголита, т.е. количество электронов, выбиваемых одним фотоном с его поверхности. Имеющиеся данные по квантовому выходу лунной породы недостаточно надежны [6]. Так, например, даже при экспериментальных исследованиях частиц лунного реголита, доставленных в миссиях «Apollo-14, 15», не было возможности работать с образцами, хранившимися до этого в высоком вакууме. Манипуляции с частицами осуществлялись в инертной атмосфере, содержащей приме-

си. Таким образом, поверхность образцов лунного реголита подвергалась воздействию чужеродных веществ, и ее электрофизические свойства (в том числе квантовый выход и работа выхода, характеризующая минимальную энергию, которую надо сообщить электрону, чтобы тот покинул твердое тело) могли существенным образом измениться.

В связи с этим необходимо определить квантовый выход (и работу выхода) лунного реголита независимыми методами, исключая взаимодействие образцов с земным воздухом. Обеспечить доставку лунного грунта так, чтобы избежать его контакта с земной атмосферой, довольно сложно. Решением проблемы было бы исследование квантового выхода и работы выхода породы, осуществленное с бортов посадочных модулей непосредственно на Луне. Возможная схема соответствующего эксперимента представлена на рис.9. Источником электромагнитного излучения служит Солнце, а для создания перенаправленного фотонного пучка используется оптический канал, состоящий из зеркал и/или оптического кабеля. Правда, наличие зеркал модифицирует спектр излучения. Это следует учесть при анализе окончательных результатов, но зато может помочь усилить (в несколько раз) интенсивность излучения, взаимодействующего с лунной поверхностью, что позволит получить более надежные результаты экспериментов. Конечно, в качестве источника излучения можно взять лазерные светодиоды, ртутную лампу и др. Однако при этом придется подбирать энергетический спектр излучателя в соответствии с солнечным, основываясь, например, на его максимумах. Предлагается использовать зонд Ленгмюра, который способен детектировать поток фотоэлектронов с шагом ~ 5 В в диапазоне от -100 до $+100$ В (как в случае освещения лунной поверхности источником света, так и в его отсутствие) и регистрировать их энергетический спектр. В свою очередь, последний коррелирует с вольт-амперной характеристикой зонда Ленгмюра. Сравнение вольт-амперных характеристик, полученных при освещении источником света лунной поверхности и без него, дает возможность определить квантовый выход и работу выхода лунного реголита. Оборудование для измерений этих характеристик предлагается разместить на спускаемом модуле станции «Луна-27» на штанге, позволяющей отдалить указанное оборудование от корпуса посадочного модуля, что необходимо для снижения

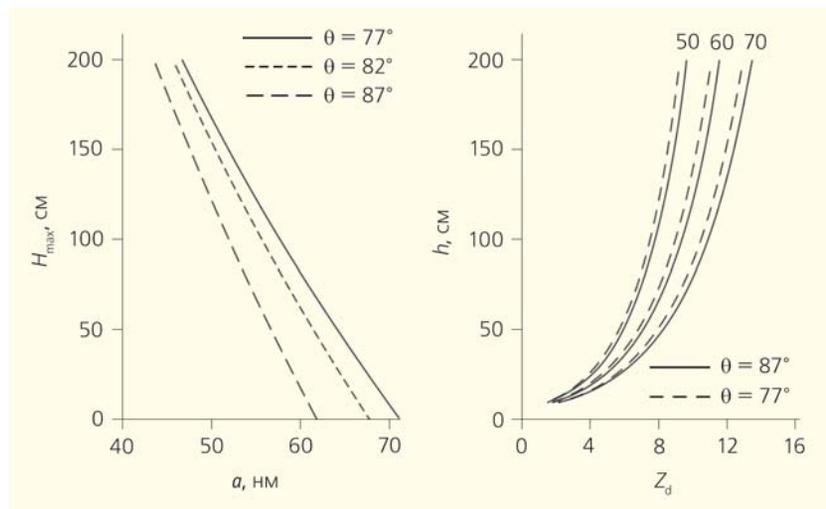


Рис.8. Максимально возможные высоты подъема пылевых частиц H_{\max} определенного размера (слева) для значений $\theta = 77^\circ, 82^\circ, 87^\circ$ и высотные распределения зарядовых чисел Z_d пылевых частиц над освещенными участками лунного реголита для значений $\theta = 77^\circ, 87^\circ$ и размеров пылевых частиц 50, 60, 70 нм.

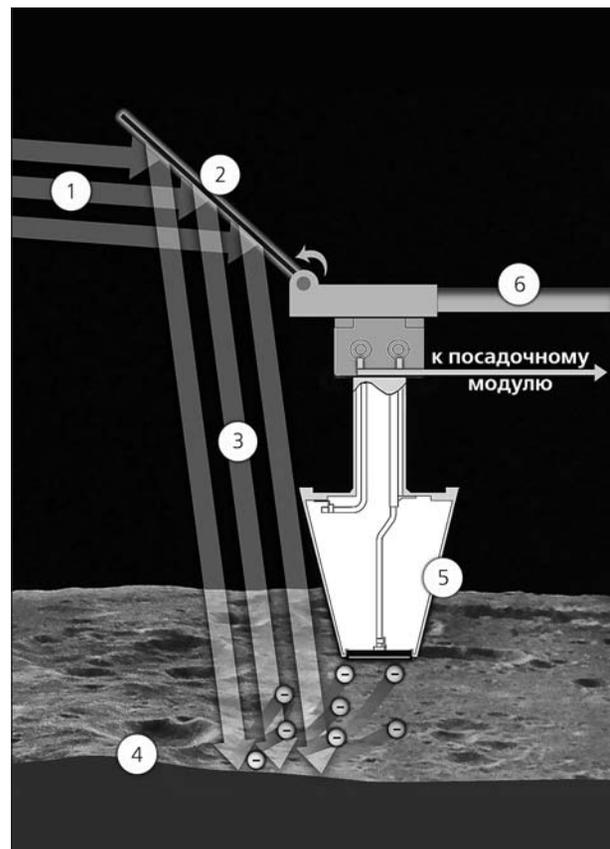


Рис.9. Схема эксперимента для измерений квантового выхода и работы выхода лунного реголита. 1 — световой поток от источника излучения, 2 — зеркало, 3 — световой поток, преобразованный зеркалом, 4 — лунная поверхность, 5 — зонд Ленгмюра, 6 — штанга, на которой укреплено оборудование для измерений.

влияния фотоэлектронов от модуля на результаты измерений. Для этой цели предполагается также покрасить части аппарата, прилегающие к штанге, специальным красителем, который позволяет избежать генерации фотоэлектронов от этих частей.

Пока непонятно, как объяснить наличие субмикронной пыли в лунной экзосфере на больших высотах вплоть до примерно 100 км. По-видимому, для описания данного явления необходимо привлечь пылевые частицы, формируемые в экзосфере Луны за счет эффекта конденсации материала плюмов, т.е. направленных вверх струй испаренного вещества, создаваемых микрометеороидами в результате ударов о лунную поверхность [19]. Чтобы запыленные области образовались на больших высотах, скорость вещества плюма должна лежать в диапазоне от первой до второй космической скорости Луны, т.е. от 1.68 до 2.38 км/с. В рамках данного подхода можно объяснить недавние

наблюдения, выполненные в 2013–2014 гг. лунным орбитальным аппаратом LADEE (тогда было продемонстрировано существование на высотах от 30 до 110 км пылевых частиц со скоростями порядка первой космической скорости для Луны [5]).

* * *

Подводя итоги всему сказанному, хотелось бы еще раз подчеркнуть важную роль пыли, которую она играет в Солнечной системе. Пылевые наномасштабные частицы выступают в качестве основных элементов структуры в планетообразовании. Учет нано- и микромасштабных пылевых частиц и их взаимодействия с солнечным излучением необходим при описании Солнечной системы. Проявления нано- и микромасштабных компонент в космосе обусловлены модификацией характера коллективных процессов в плазме (при наличии заряженной пыли), новой физикой нелинейных волн, процессами самоорганизации и т.д. ■

Работа выполнена по Программе №9 фундаментальных исследований Президиума РАН «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд», а также при поддержке РФФИ (проект 15-02-05627-а).

Литература

1. Fortov V.E., Ivlev A.V., Khrapak S.A. et al. Complex (dusty) plasmas: Current status, open issues, perspectives // Phys. Reports. 2005. V.421. №1–2. P. 1–103.
2. Богатииков О.А. Неорганические наночастицы в природе // Вестн. РАН. 2003. Т.73. №5. С.426–428.
3. Альвен Х., Аррениус Г. Эволюция Солнечной системы. М., 1979.
4. Brownlee D.E. The Stardust comet mission: Studying sediments from the Solar System's frozen attic // Elements. 2012. V.8. №5. P. 327–328.
5. Elphic R.C., Delory G.T., Hine B.P. et al. The lunar atmosphere and dust environment explorer mission // Space Sci. Rev. 2014. V.185. №1–4. P.3–25.
6. Попель С.И., Голубь А.П., Извекова Ю.Н. и др. К вопросу о распределениях фотоэлектронов над освещенной частью Луны // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т.99. №3. С.131–137.
7. Mann I., Krivov A., Kimura H. Dust cloud near the Sun // Icarus. 2000. V.146. №2. P.568–582.
8. Rickman H. Composition and physical properties of comets // Solar System Ices / Eds B.Schmitt, C.de Bergh, M.Festou. Dordrecht, 1998. P. 395–417.
9. Interplanetary dust / Ed. E.Grün, B.A.S.Gustafson, S.Dermott, H.Fechtig. Berlin; Heidelberg; N.Y., 2001.
10. Vaisberg O.L., Smirnov V., Omelchenko A. et al. Spatial and mass distribution of low-mass dust particles (m less than 10 to the -10th g) in comet P/Halley's coma // Astron. Astrophys. 1987. V.187. P.753–760.
11. Divine N., Fechtig H., Gombosi T.I. et al. The comet Halley dust and gas environment // Space Sci.Rev. 1986. V.43. №1. P.1–104.
12. Popel S.I., Gisko A.A. Charged dust and shock phenomena in the Solar System // Nonlinear Processes in Geophysics. 2006. V.13. P.223–229.
13. Попель С.И. Мелкодисперсные частицы и пылевая плазма в гелиогеофизике // Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Л.М.Зеленого, И.С.Веселовского. М., 2008. Т.2. С.371–394.
14. Flynn G.J. Changes to the compositions and mineralogy of the interplanetary dust particles by terrestrial encounters // Analysis of interplanetary dust (AIP Conf. Proc. V.310) / Eds M.E.Zolensky, T.L.Wilson, F.J.M.Rietmeijer, G.J.Flynn. Melville; N.Y., 1994. P.127–144.
15. Rennilson J.J., Criswell D.R. Surveyor observations of lunar horizon-glow // The Moon. 1974. V.10. P.121–142.
16. Zook H., McCoy J. Large scale lunar horizon glow and a high altitude lunar dust exosphere // Geophys. Res. Lett. 1991. V.18. №11. P. 2117–2120.
17. Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П. и др. Пылевая плазма у поверхности Луны // Астрономический вестник. 2013. Т.47. №6. С.455–466.
18. Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M. A dynamic fountain model for lunar dust // Adv. Space Res. 2006. V.37. P. 59–66.
19. Popel S.I., Zelenyi L.M. Future Lunar missions and investigation of dusty plasma processes on the Moon // J. Plasma Phys. 2013. V.79. №4. P.405–411.

Укрощение астероидов: как управлять их движением

Н.А.Эйсмонт, А.А.Ледков, Р.Р.Назиров

На первый взгляд заголовок статьи выглядит слишком амбициозным, чтобы использовать его в публикации, относящейся к естественным наукам. Действительно, массы объектов, которыми до сих пор управляли в космосе, т.е. космических аппаратов, выполняющих миссии за пределами околоземной орбиты, не превышали 6 т. Единственным исключением здесь можно считать проект пилотируемой экспедиции на Луну «Аполло», когда вес отлетного модуля был около 30 т. Для случая же управления астероидом нижний предел массы составляет величину ~1000 т. Маневры, которые выполняются в ходе космических миссий, требуют изменений скорости управляемого объекта на величины до 3–5 км/с. Казалось бы, пытаться воздействовать на полет астероида с помощью стандартных ракетодинамических технологий, когда для изменения скорости требуется расход рабочего тела (топлива), бесперспективно. Однако мы покажем, что это не так. Идея предлагаемой концепции — использовать гравитационные маневры вблизи Земли, а также около других планет и их спутников. При этом оказываются достижимыми изменения скорости управляемого объекта, превышающие указанные и не требующие сами по себе расхода топлива. Нужно лишь перевести уп-



Натан Андреевич Эйсмонт, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела космической динамики и математической обработки информации ИКИ РАН. Область научных интересов: небесная механика, динамика полета и управление движением космических аппаратов, планетарная защита и астероидно-кометная опасность, астрономия и астрофизика.



Антон Алексеевич Ледков, научный сотрудник того же отдела. Занимается задачами проектирования космических миссий, включая решение проблем управления движением небесных тел и разработками математических инструментов, необходимых для реализации экспериментов в космическом пространстве.



Равиль Равильевич Назиров, доктор технических наук, заместитель директора ИКИ РАН. Область научных интересов охватывает круг задач, связанных с исследованиями и разработками по определению параметров движения механических систем, а также построения систем навигационной поддержки и планирования космических экспериментов.

равляемый астероид на траекторию облета выбранной «мотором» гравитационного маневра планеты или ее спутника, что при подходе к выбору этих тел потребует изменить скорость «мишени» лишь в пределах двух десятков метров в секунду (в дальнейшем это изменение скорости Δv будем называть ее импульсом, как это при-

© Эйсмонт Н.А., Ледков А.А., Назиров Р.Р., 2015

нято в динамике космических полетов). Ясно, что приводимая оценка необходимого импульса скорости зависит от планируемых задач управления движением астероида. Рассмотрим эти задачи.

Проблема астероидной защиты

Наиболее значимой среди них считается задача отклонения небесного объекта (астероида или кометы) от траектории столкновения с Землей. Интерес к ней обострился после открытия 19 июля 2004 г. астероида 2004 MN4, названного Апофисом по имени древнеегипетского бога — змея из подземного царства (в его древнегреческом написании). Параметры орбиты астероида, вычисленные по имевшимся тогда данным наблюдений, предполагали столкновение астероида с Землей в 2029 г. с вероятностью 2.7%. Встреча с астероидом диаметром 270 м, каким он казался при первом пролете Земли (позднее, при сближении с планетой в декабре 2012 г., оценку размера увеличили до 330 м), вызвала бы глобальную катастрофу. После проведения новых измерений дата наиболее критичного сближения сдвинулась на апрель 2036 г., а затем, в 2013 г., вероятность столкновения была оценена как близкая к нулю. Сами же измерения стали возможными прежде всего в результате запуска в США и Европе программ, нацеленных на обнаружение и каталогизацию (определение параметров орбиты) опасных околоземных объектов. Были задействованы как наземные средства наблюдений, так и телескопы на борту космических аппаратов. Об эффективности этих мероприятий можно судить по рис.1, где представлена динамика числа открытых око-

лоземных астероидов. Из рисунка видно, что с 1980 г. к настоящему времени обнаружено более 12 500 околоземных астероидов, орбиты которых определены с той или иной точностью (к 2004 г. их было известно только 2600).

Лаборатория реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory, JPL) НАСА ведет постоянно обновляемый каталог околоземных объектов (Near Earth Objects, NEO), который содержит орбитальные параметры астероидов и комет, их геометрические, физические и химические характеристики. Кроме того, даются оценки точности определения параметров их орбит, а также даты и наименьшие расстояния их пролета Земли. Используя эти данные, можно при необходимости планировать в долгосрочной перспективе операции по отклонению астероидов от траектории столкновения с Землей*.

Как уклониться от столкновения

Для реализации этих операций можно предложить несколько способов. Самым очевидным из них нам представляется метод кинетического воздействия, когда по поверхности опасного небесного объекта бьет наведенный на него космический аппарат. В результате удара количество движения объекта, а следовательно, и вектор его скорости, изменяется, в результате чего астероид (комета) переводится на новую траекторию, не проходящую через Землю. Проблема состоит в том, что масса космического аппарата может быть недостаточной, чтобы изменить скорость астероида на величину, требуемую для уверенного отвода от траектории столкновения. Рассматриваются способы увеличить

эффективность удара, один из которых включает в себя использование ядерного заряда. Заметим, что ядерный взрыв на поверхности малоэффективен, поскольку выбрасываемая наружу масса остается небольшой. Чтобы ее увеличить, предлагается осуществить двухступенчатое воздействие: сначала ударник образует каверну на поверхности астероида, а затем ядерный заряд попадает в нее и взрывается, создавая выброс породы астероида. По оценкам, такая технология позволяет изменить скорость астероида в несколько (до пяти) раз больше, чем в случае простого неупругого удара без отброса массы объекта [1].

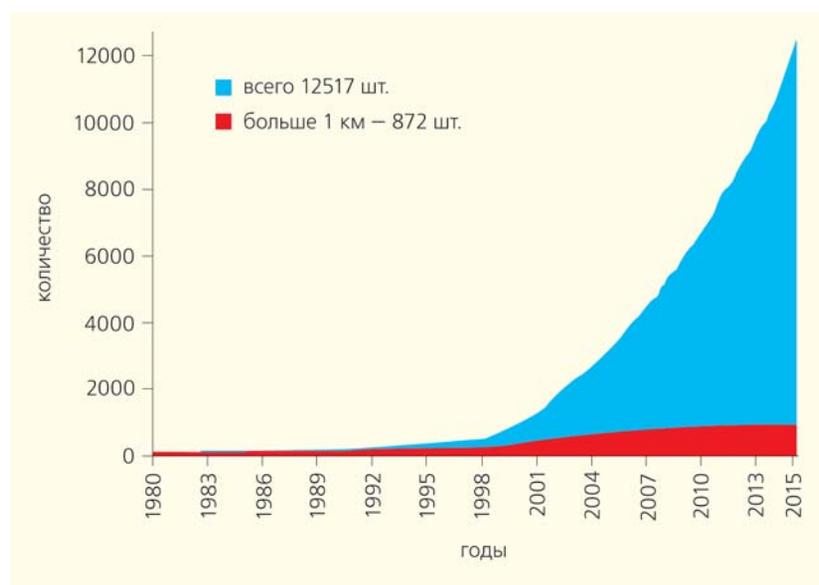


Рис.1. Известные околоземные астероиды, открытые с января 1980 г. по апрель 2015 г. нарастающим по датам итогом.

* <http://neo.jpl.nasa.gov>

Однако предпочтительнее выглядит другой метод — воздействие на опасный объект более массивным, чем космический аппарат, небесным телом, которое не требуется выводить в космическое пространство. В качестве него можно использовать достаточно малый околоземный астероид или его фрагмент, например валун, находящийся на поверхности. Эта концепция, впервые предложенная в работе [2], состоит в следующем. Среди множества околоземных астероидов выбирается такой, что его можно направить на траекторию близкого облета Земли, сообщив ему небольшой импульс скорости, достижимый средствами современной ракетной техники. При движении астероида в гравитационном поле

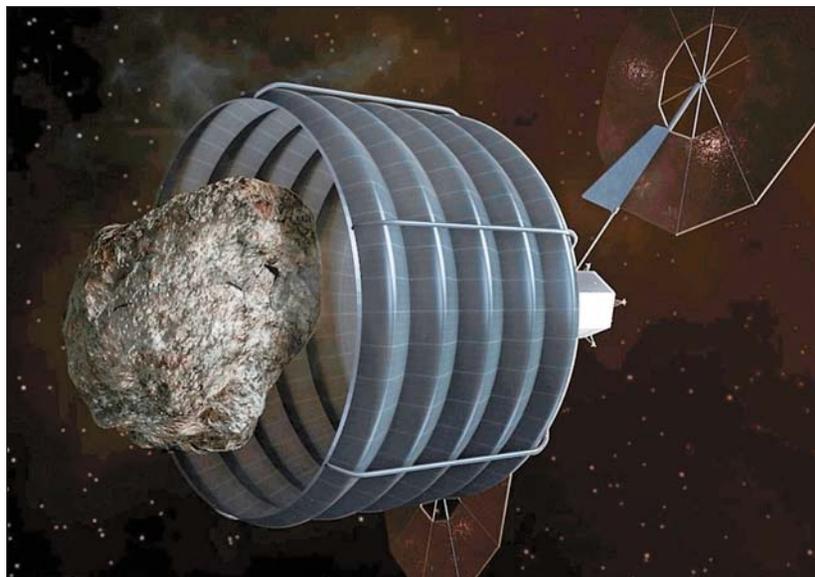


Рис.2. Захват астероида устройством (проект «Кеск»).

Земли траектория тела изменяется. Орбитальные параметры облета подгоняются таким образом, чтобы после данного маневра, называемого гравитационным, астероид оказался на траектории столкновения с опасным небесным объектом, который нужно отклонить от изначальной, задевающей Землю, орбиты. Обеспечить требуемые параметры должен космический аппарат, который садится на поверхность астероида, закрепляется на ней и передает последнему необходимый импульс скорости за счет работы своей двигательной установки. То, что операции подобного рода осуществимы, в некоторой мере подтверждают уже состоявшиеся космические миссии, например посадка аппарата NEAR («Near Earth Asteroid Rendezvous» — встреча с околоземным астероидом) на поверхность астероида Эрос, а также посадка аппарата «Hayabusa» на астероид Итокава с последующим забором грунта и доставкой его на Землю. Правда, следует отметить: посадить космический корабль на небесный объект, такой как астероид или ядро кометы, совсем не просто — об этом говорит трудный опыт проекта «Rosetta», включавшего в себя отправку зонда «Philae» на поверхность ядра кометы Чурюмова—Герасименко. Как известно, зонд успешно отделился от основного аппарата, достиг поверхности ядра кометы, но не смог закрепиться на поверхности. После нескольких незапланированных отскоков «Philae» попал в затененную область поверхности (ущелье) и потерял возможность подзарядки химических батарей, в результате связь с модулем вскоре прервалась на полгода. Какие иные подходы ищутся для решения этой задачи, можно понять на примере американского проекта «Кеск» (названного по имени американского филантропа, который пожертвовал все свое состояние на научные исследования), где

планируется доставка на орбиту, подобную лунной, небольшого астероида или его фрагмента [3]. В частности, в проекте предлагается вообще отказаться от посадки аппарата на поверхность астероида, а захватить последний устройством, похожим на большой сачок (рис.2), и далее транспортировать его в окрестность Земли, используя плазменный двигатель малой тяги. Нам, несмотря на проблемы с посадкой зонда «Philae», представляется более предпочтительным вариант, выбранный для «Rosetta», когда аппарат на поверхности астероида закрепляется гарпунами с тросами. По нашему мнению, посадка была бы успешной при более тщательном выборе ее места на поверхности кометы.

Гравитационный маневр

Этот способ изменения траекторий космических аппаратов, т.е. управления орбитальным движением, был впервые предложен в 20-х годах прошлого века пионером советской ракетной техники Ф.А.Цандером [4]. Суть метода заключается в том, что космический аппарат, двигающийся, например, по орбите спутника Солнца, направляется на облет планеты, достаточно близкий, чтобы ее поле тяготения заметно повлияло на его траекторию. При анализе движения относительно планеты можно полагать, что, начиная с некоторого расстояния от нее, влиянием Солнца можно пренебречь. В этом случае траектория движения аппарата оказывается гиперболой; несколько таких гипербол для различных расстояний пролета изображено на рис.3. Из-за притяжения планеты вектор скорости аппарата за время облета изменит свое подлетное направление (вдоль

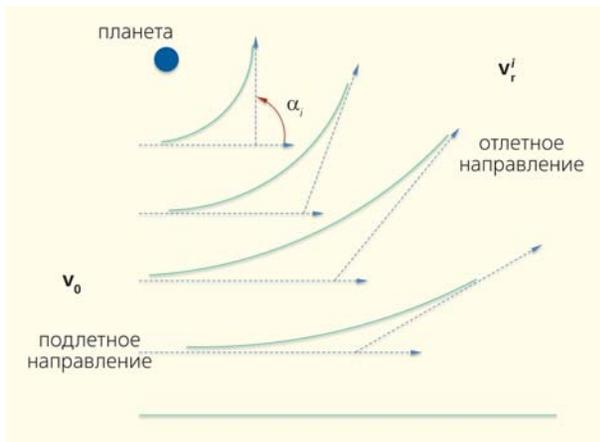


Рис.3. Геометрия гравитационного маневра. В зависимости от расстояния пролета тела по отношению к планете можно получить любую i -ю траекторию.

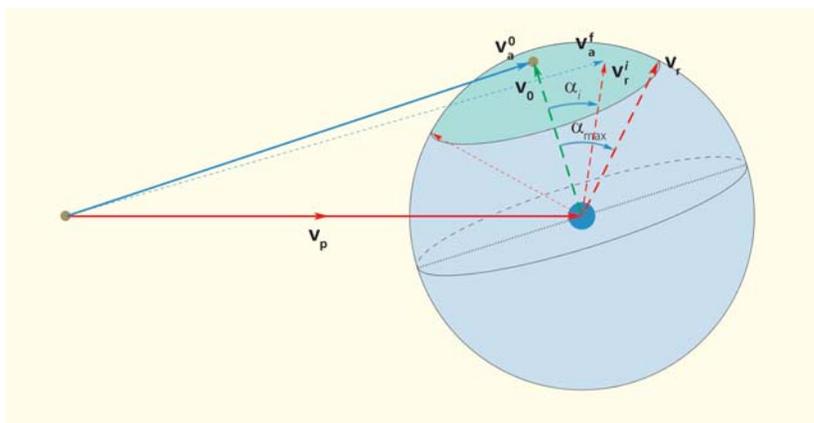


Рис.4. Геометрия гравитационного маневра в координатной системе, связанной с Солнцем: v_a^0 — начальная скорость астероида в системе отсчета, связанной с Солнцем до пролета планеты (v_a^f — после), v_0 — скорость астероида относительно планеты до ее пролета (v_r^i — после), v_r — скорость астероида после пролета планеты при максимальном угле α , v_p — скорость планеты.

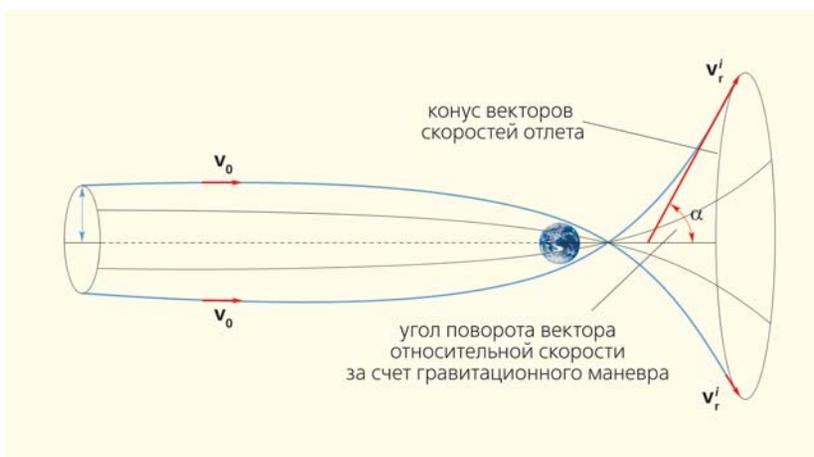


Рис.5. Цилиндр возможных векторов относительной скорости подлета v_0 и результирующий конус векторов скорости отлета.

асимптоты гиперболы) на отлетное (вдоль второй асимптоты), повернувшись на угол α :

$$\sin \alpha / 2 = 1 / (1 + Rv^2 / \mu).$$

Упомянутая скорость обозначена здесь v , минимальное расстояние от центра планеты при пролете — R , гравитационная постоянная планеты — μ . Величина относительной скорости v_0 при этом не изменяется, но в системе отсчета, связанной с Солнцем, изначальная скорость аппарата v_a^0 становится равной v_a^i , т.е. другой и по направлению и, вообще говоря, по величине. Это иллюстрирует рис.4, где скорость планеты обозначена как v_p .

Таким образом, вектор скорости астероида в системе отсчета, связанной с Солнцем, после пролета планеты может быть любым вектором с началом в начале вектора скорости планеты и с концом на сфере радиусом v_r^i (при условии, что планета имеет почти нулевой диаметр). Ось кону-

са проходит вдоль вектора относительной скорости астероида перед облетом планеты.

При планировании гравитационного маневра мы можем выбирать величину радиуса перицентра R , тем самым задавая угол поворота α относительной скорости, так что максимальный угол α_{max} достигается при наименьшем допустимом расстоянии пролета планеты R_{min} . Пространственная картина возможных траекторий облета планеты в системе координат планеты при фиксированном радиусе перицентра представлена на рис.5.

Для реализации гравитационного маневра как такового не требуется расхода рабочего тела. Но топливо требуется для перевода управляемого объекта на траекторию гравитационного маневра. Этот перевод осуществляется с помощью ракетного двигателя, за счет тяги которого объект переходит на необходимую траекторию. Ясно, что преимущества такого способа проявляются, если он требует меньше топлива, чем непосредственное ракетодинамическое изменение параметров орбиты.

Но когда управляемый объект — столь массивное тело, каким оказывается даже небольшой астероид (скажем, астероид диаметром 10 м, масса которого при плотности 2.7 т/м³ составляет 1500 т), гравитационный маневр по существу становится

единственным способом управления его движением. Ведь если необходимые импульсы для изменения его скорости составляют километры в секунду, никакой двигатель их обеспечить не сможет. А это и есть наш случай управления, задача которого — направить относительно малый астероид на значительно больший объект (например, такой как Апофис), с тем чтобы с помощью кинетического воздействия (удара) отклонить последний от траектории столкновения с Землей.

Примеры перехвата

Чтобы понять, имеет ли вообще решение эта задача в рамках изложенной концепции, мы искали среди околоземных астероидов те, которые можно навести на траекторию столкновения с Апофисом с помощью гравитационного маневра у Земли [5]. При поиске ставилось условие, что ракетно-динамический импульс, сообщаемый астероиду-снаряду (или его фрагменту, так что масса управляемого тела составляет не более 1500 т), не превышает возможностей современной ракетно-космической техники, т.е. находится в пределах нескольких десятков метров в секунду. В табл.1 приводятся результаты этих изысканий, в частности, указываются основные характеристики миссий по отклонению Апофиса от траектории столкновения с Землей для пяти астероидов-снарядов, для которых величина импульса скорости, необходимого для перевода их на целевую траекторию, не превышает 20 м/с.

Еще одним ограничением, которое учитывалось при подготовке приводимых в таблице величин, была предельная дата встречи с Апофисом: не позже 2035 г. (при исследовании предполагалось, что вероятность столкновения астероида с Землей в апреле 2036 г. имеет значимую величину). Новые расчеты были выполнены уже в 2015 г., когда стало ясно, что столкновения не случится, и поэтому в качестве предельной даты для перехвата опасных объектов был выбран 2045 г. В качестве целей рассматривались уже два астероида: Апофис и Бенну. В табл.2 указаны ключевые даты

миссий перехвата этих объектов подходящими астероидами-снарядами (максимально допустимым импульсом скорости, переводящим снаряд на траекторию гравитационного маневра у Земли, по-прежнему считалось значение в 20 м/с). Как видно из таблицы, для наведения на Апофис годятся 13 астероидов, на Бенну — 14, причем семь из них можно использовать для перехвата обеих целей. В таблицу в качестве возможной цели включен также спутник Марса Фобос, в него можно попасть 14 астероидами-снарядами.

Чтобы оценить, можно ли реализовать технически предлагаемый способ отклонения небесных объектов от опасных траекторий, были проведены расчеты по определению массы космического аппарата, который может быть доставлен на поверхность астероида-снаряда для выполнения дальнейших операций по изменению орбиты последнего. Предполагалось, что при этом носителем служит «Протон-М» с разгонным блоком «Бриз-М». Если использовать для доставки космического аппарата на астероид и последующих действий плазменный двигатель со скоростью истечения рабочего тела 32370 м/с (достигнутые к настоящему моменту характеристики), то, как можно судить по нашим расчетам [5], после посадки на астероид массой 1500 т располагаемый импульс скорости составит более 50 м/с. Это позволяет считать задачу выполнимой даже с учетом дополнительных расходов топлива на коррекцию ошибок траектории перелета к цели.

Гравитационный маневр у Земли означает пролет астероида-снаряда вблизи Земли, и это может представлять самостоятельную угрозу. Но если, как предполагалось выше, диаметр его остается в пределах 10 м [6], возможная ошибка, приводящая к входу этого небесного тела в атмосферу Земли, опасности не представляет. Астероид такого размера просто разрушится в процессе движения в атмосфере, долететь до поверхности способен только железный. Для нашей задачи последний случай можно не принимать во внимание, поскольку кандидат на роль астероида-снаряда выбирается не вслепую, а с учетом предварительного изучения его химического состава. Тем не менее

Таблица 1

Астероиды, выбранные как кандидаты на астероид-снаряд

Астероид	2006 XV4	2006 SU49	1997 XF11	2011 K10	1994 GV
Величина Δv , м/с	2.38	7.89	10.05	15.94	17.72
Радиус перигея, км	16473.19	15873.40	42851.84	31912.94	7427.54
Скорость в перигее по отношению к Земле, км/с	9.61	5.03	14.08	8.98	13.37
Угол поворота относительной скорости, град.	23.98	59.78	5.14	21.14	50.85
Дата выполнения маневра	17.03.2029	11.06.2027	27.04.2027	13.09.2025	12.09.2028
Дата достижения перигея	11.12.2031	23.01.2029	26.10.2028	10.10.2026	13.04.2031
Дата встречи астероида-снаряда с Апофисом	08.04.2034	06.10.2029	06.08.2030	06.08.2027	24.12.2032
Скорость при ударе по Апофису, км/с	15.3	4.9	11.0	2.3	14.1
Звездная величина	24.87	19.54	16.9	24.91	27.46
Размер астероида-снаряда, м	≈25–60	≈330–750	≈1000–2000	≈25–60	≈8–19

Таблица 2

Календарь наведения астероидов на объекты с использованием облета Земли

№	Астероид	Гравитационный маневр у Земли			Дата встречи астероида-снаряда с объектами		
		Δv , м/с	Дата маневра	Дата прохождения перигея	Апофис	Бенну	Фобос
1	2015 AZ43	11.91	14.12.2035	26.02.2038		27.07.2040	
2	2014 GQ17	10.09	12.11.2043	11.06.2044	22.01.2045	23.12.2044	
3	2014 QN266	18.77	16.05.2040	15.03.2041	13.02.2042	01.08.2041	
4	2014 KW76	16.54	21.12.2036	27.05.2038	02.04.2040		
5	2014 HB177	13.53	10.12.2033	06.05.2034			06.10.2034
6	2013 VX4	18.22	26.05.2022	15.12.2023			17.02.2026
7	2012 PB20	18.82	14.06.2024	11.02.2025		04.06.2025	02.07.2025
8	2012 SY49	9.96	27.12.2027	29.09.2029		27.01.2030	
9	2012 AP10	11.85	11.07.2042	01.01.2043			30.08.2043
10	2012 UE34	12.04	20.07.2040	08.04.2041	25.08.2041		
11	2012 HB25	10.96	23.11.2023	10.07.2027			21.11.2030
12	2011 TO	15.33	16.04.2044	27.09.2044	09.05.2045		23.03.2045
13	2011 CF22	10.80	16.08.2038	06.02.2041	03.08.2043		
14	2011 AM37	18.89	11.02.2025	11.01.2026	25.12.2026	13.09.2026	18.11.2026
15	2011 CF22	10.80	16.08.2038	06.02.2041	03.08.2043		
16	2011 AG5	4.44	07.07.2038	05.02.2040	24.09.2041	15.05.2040	
17	2010 TN55	16.35	21.12.2035	10.10.2038	14.01.2042	04.01.2042	19.12.2041
18	2010 VN1	10.95	08.12.2033	03.11.2035		25.07.2037	
19	2008 WK96	10.03	17.02.2037	29.11.2038			21.10.2040
20	2007 TL16	19.69	21.06.2036	06.10.2037			24.01.2038
21	2007 DX40	3.61	01.04.2042	18.08.2043	16.03.2045		02.02.2045
22	2006 SR131	15.60	15.08.2016	23.09.2017	08.02.2019	31.01.2019	08.01.2019
23	2006 SU49	08.01	15.06.2027	23.01.2029		04.06.2029	09.08.2030
24	2004 MN4	3.88	03.08.2028	14.04.2029		13.10.2029	
25	2000 QK130	11.13	05.03.2035	14.03.2036			10.07.2036
26	1997 XF11	10.23	16.05.2027	26.10.2028	03.04.2030	06.03.2030	
27	1995 CS	2.64	25.09.2039	03.02.2041		02.07.2043	
Итого:					13/27	14/27	14/27

Таблица 3

Наведение астероидов на опасные объекты с использованием облета Марса и Венеры

№	Астероид	Δv , м/с	Дата маневра	Дата достижения перигея	Дата встречи астероида-снаряда с объектом
гравитационный маневр у Марса					
1	2003 LX5	14.13	14.12.2018	17.01.2022	12.06.2026 (Бенну)
гравитационный маневр у Венеры					
2	2009 CE	23.10	19.08.2042	27.04.2043	20.10.2043 (Апофис)
3	2010 DG1	21.05	11.08.2037	03.11.2039	21.05.2042 (Апофис)

можно поискать астероиды, подходящие для перехвата опасных объектов при участии гравитационного поля других планет. В табл.3 представлены результаты такого анализа для гравитационного маневра при облете Марса и Венеры.

Как видно из таблиц, удалось найти один астероид (2003 LX5), который можно навести на Бенну маневром у Марса, и два астероида (2009 CE и 2010 DG1), которые пригодны для перехвата Апофиса при содействии Венеры. Для этого в первом случае достаточно сообщить астероиду-снаряду импульс скорости 14.13 м/с. Для вариантов с использованием Венеры эти величины несколько выше: 23.1 и 21.05 м/с. Таким образом, состав

астероидов-кандидатов на роль «ударника» многочисленнее, чем в случае использования Земли для гравитационного маневра, но быстрый рост количества вновь открываемых астероидов позволяет рассчитывать на расширение этого списка.

На резонансные орбиты

Если орбита околоземного астероида такова, что его реально перевести на траекторию близкого облета Земли, имеет смысл так организовать гравитационный маневр, чтобы сделать орбиту астероида удобной для дальнейшего систематическо-

го изучения, в том числе для доставки его грунта на Землю. Например, можно «сконструировать» орбиты с периодом, находящимся в резонансном соотношении с периодом Земли (период астероида относится к земному как целые числа — 1:1, 3:2, 4:3 и т.д.). В случае равенства периодов астероид будет возвращаться к нашей планете ежегодно. Это значительно расширит возможности управлять астероидом, поскольку при каждом его возвращении можно направлять новую экспедицию к астероиду и доставлять грунт на Землю с минимальными затратами (когда требуется доставить большое количество грунта). Более того, при каждом сближении с планетой можно выполнять новый гравитационный маневр, причем таким образом, что период астероида сохранится, а изменятся эксцентриситет и наклонение его орбиты [5]. Это достигается таким поворотом вектора относительной скорости астероида, при котором его угол с вектором скорости Земли β остается неизменным, как это иллюстрируется на рис.6.

Тогда и длина вектора скорости астероида в системе отсчета, связанной с Солнцем, не меняется, а следовательно, и орбитальный период астероида остается прежним. Так что, если за один облет Земли не удастся в достаточной мере изменить наклонение, можно продолжить этот процесс на следующем гравитационном маневре. Следуя данной процедуре, можно получить максимальное наклонение орбиты астероида к эклиптике. В этом случае орбита астероида становится практически такой же, как орбита Земли, но располагается с некоторым наклоном к ней [5]. Таким образом, открывается перспектива встречать астероид дважды в год, что может играть существенную роль в планировании экспедиций по исследованию и использованию астероида, в том числе для решения задачи планетарной защиты. Наиболее удобными, очевидно, будут орбиты с минимальным, порядка нескольких градусов, наклонением, поскольку здесь импульс скорости космического аппарата при старте к астероиду с орбиты искусственного спутника Земли оказывается почти на уровне импульса для перехода на параболическую орбиту, а импульс для возвращения через шесть месяцев полета также остается на уровне сотен метров в секунду. Однако для пилотируемых полетов будет сложно аварийно прекратить миссию и быстро вернуть экипаж на Землю. Для решения этой проблемы можно предложить увеличить запас топлива на борту кос-

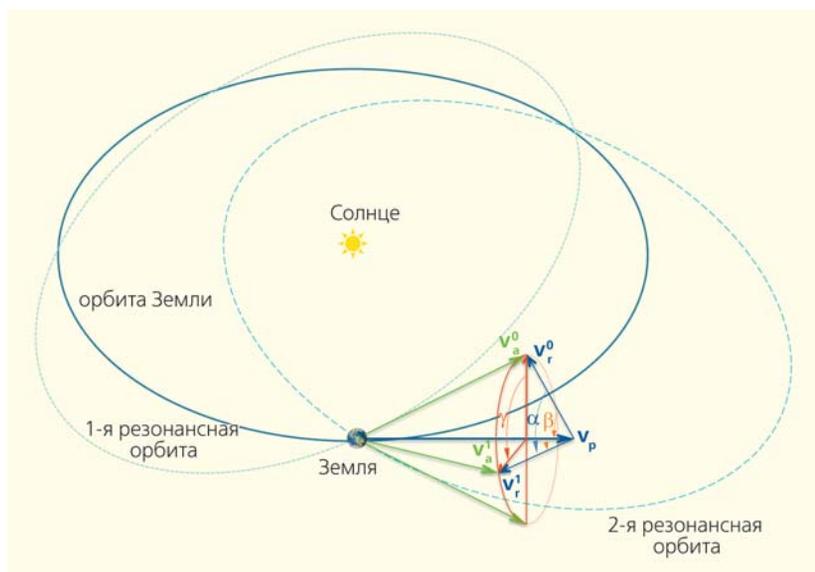


Рис.6. Гравитационные маневры у Земли (α — угол поворота вектора относительной скорости астероида в результате выполнения маневров, γ — угол поворота плоскости орбиты астероида в относительном движении, β — угол между вектором относительной скорости астероида и вектором скорости Земли).

мического аппарата, с тем чтобы иметь возможность сообщить кораблю импульс скорости, достаточный для выполнения маневра перевода на траекторию входа в атмосферу Земли из любой точки миссии. Другой, более радикальный, подход — перевести астероид на орбиту спутника Земли, как это предлагается сделать в американском проекте «Кеск». С такой орбиты, даже если она имеет высоту порядка лунной, время возвращения экипажа на Землю не превышает одной недели. Недостаток этого варианта заключается в том, что соответствующие маневры по достижению орбиты спутника Земли планируется выполнять за счет «грубой силы» — электроракетного двигателя, который должен сообщить астероиду импульс скорости величины вплоть до 1000 м/с [3]. Кроме того, масса астероида или его фрагмента предполагается не превышающей 500 т. Мы выдвигаем альтернативный вариант, когда необходимый ракетодинамический импульс скорости не превышает 30 м/с, а собственно маневры захвата астероида на орбиту спутника Земли выполняются за счет гравитационных маневров у Земли и Луны.

Способности Луны

Прежде всего отметим, что любая планета Солнечной системы, вообще говоря, не может захватить на орбиту своего спутника попавший в ее поле тяготения небесный объект, поскольку на входе в сферу влияния такие объекты имеют скорость, превышающую параболическую. (На расстоянии от Земли, равном высоте орбиты Луны, параболи-

ческая скорость равна примерно 1.4 км/с.) Небесный объект, оказавшись в сфере влияния планеты и двигаясь с некоторой относительной (гиперболической) скоростью, покинет эту сферу с той же скоростью по величине, но другой по направлению — оно будет изменено тяготением планеты. Однако ситуация меняется, если вокруг планеты уже вращается естественный спутник. Тогда, облетая спутник (в процессе облета собственно планеты), астероид совершает гравитационный маневр в системе спутник—планета, что уменьшает его скорость относительно планеты. Если при этом удастся снизить данную скорость до величины, меньшей, чем параболическая, астероид перейдет на орбиту спутника планеты (Земли в интересующем нас случае). Трудность заключается в том, что начальная скорость астероида относительно Земли должна быть достаточно малой, чтобы таким маневром добиться требуемого результата. Во всяком случае, нам найти подходящий для такой операции околоземный астероид пока не удалось (если оставаться в рамках ограничений по величине импульса скорости для перевода его на орбиту близкого облета Земли — не дальше орбиты Луны).

Поэтому была предложена другая технология, состоящая в следующем. Сначала астероид переводится на орбиту, резонансную с орбитальным движением Земли в соотношении 1:1, за счет вы-

полнения гравитационного маневра у Земли. Для этого, как уже было описано выше, на астероид совершает посадку космический аппарат с запасом рабочего тела, достаточным, чтобы с помощью двигателя сообщить астероиду нужный импульс скорости и перевести его на близкую к Земле орбиту, допускающую гравитационный маневр. После данного маневра астероид выполняет, если это необходимо, еще один, переходя на орбиту облета Луны при следующем возвращении к Земле. Причем выбираются такие параметры облета Луны, которые приводят к уменьшению скорости астероида относительно Земли, оставляя в то же время скорость астероида в системе отсчета, связанной с Солнцем, неизменной, а следовательно, сохраняя и период гелиоцентрической орбиты равным земному. Очевидно, что число свободных параметров для такого управления достаточно, поскольку нам требуется удерживать заданную величину только для гелиоцентрической скорости. Что касается изменения скорости астероида относительно Земли после маневра, единственное требование — ее уменьшение, в крайнем случае — невозрастание. Последнее означает, что этот облет, так сказать, холостой, а необходимое уменьшение скорости будет достигнуто на последующих облетах Луны. В качестве промежуточных свободных параметров можно назвать радиус пе-

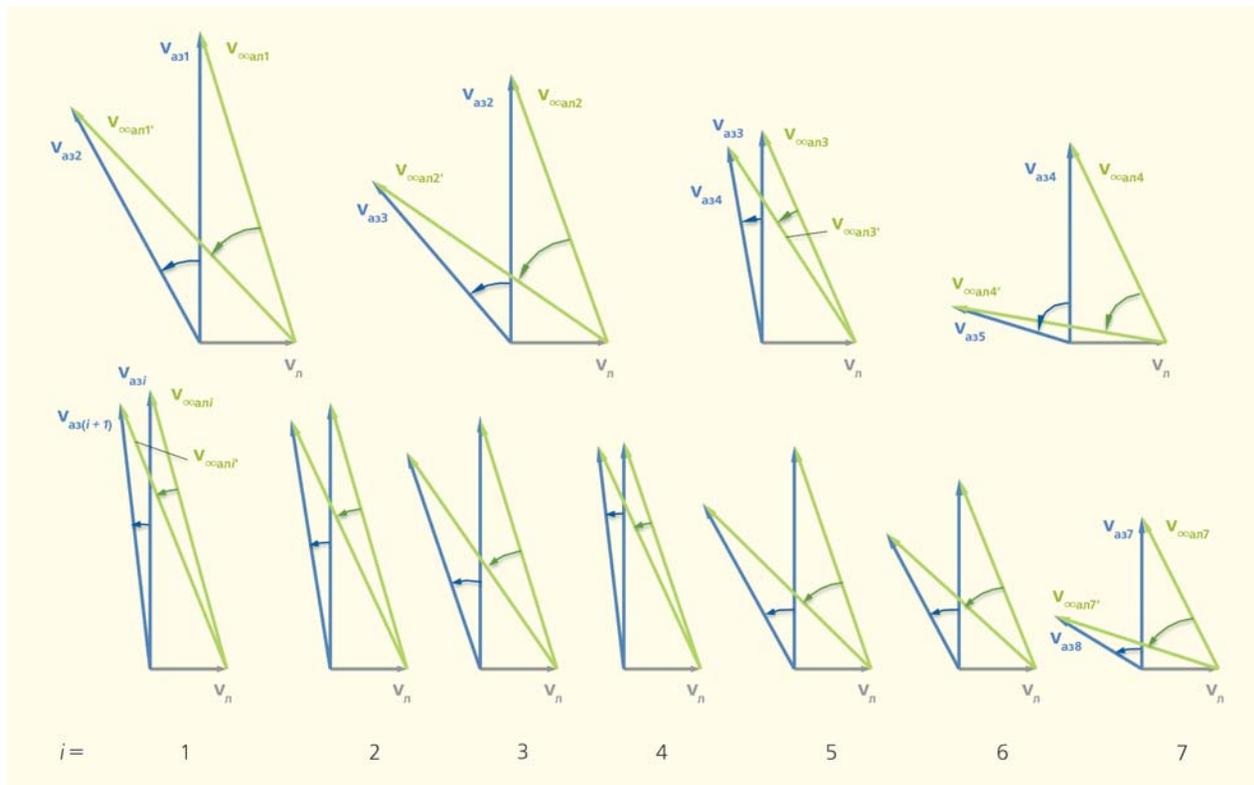


Рис. 7. Гравитационные маневры у Луны по захвату астероида 2014 QN266 (вверху) и 2012 AP10 (внизу). v_n — скорость Луны относительно Земли, $v_{\infty an}$ и $v_{\infty an}'$ — скорости астероида на бесконечности относительно Луны до и после i -го облета, v_{as} — скорость астероида относительно Земли до облета Луны и $v_{as(i)}$ — после облета.

реселения и его долготу в системе отсчета, связанной с Луной. Описанные операции повторяются до тех пор, пока после облета Луны скорость астероида относительно Земли не станет меньше параболической, что означает его захват на орбиту спутника Земли.

В качестве примеров были численно промоделированы операции по захвату на орбиту спутника Земли околоземных астероидов 2014 QN266 и 2012 AP10, диаметр каждого из которых оценивается величиной 15–30 м (это означает, что их масса может превысить значение 1500 т, но предполагается, что тогда можно использовать фрагмент астероида). Операция начинается со старта космического аппарата с низкой круговой околоземной орбиты, далее следуют даты и параметры ключевых этапов, которые указаны для астероида 2014 QN266 (и в скобках для 2012 AP10). Итак, мы имеем следующие последовательности: старт от Земли 27.04.2028 (20.01.2038), посадка на астероид 21.02.2029 (14.05.2038) тормозным импульсом 590 м/с (870 м/с), сообщение астероиду импульса скорости $\Delta v = 18.77$ м/с ($\Delta v = 11.85$ м/с) для перехода на орбиту гравитационного маневра 16.05.2040 (11.07.2042), достижение перигея при гравитационном маневре перехода на резонансную орбиту 15.03.2041 (01.01.2043).

Дальнейшие гравитационные маневры у Луны иллюстрируются в векторном виде на рис.7 — вплоть до перехода астероидов на орбиты спутников Земли 15.03.2048 и 26.12.2064 соответственно, когда на расстояниях от Земли, определяемых положением Луны в эти даты, достигаются скорости 1.05 и 1.38 км/с. В частности, для астероида 2014 QN266 результатом четырехступенчатого изменения скорости в процессе выполнения операций захвата становится орбита, параметры которой сведены в табл.4.

Полученные результаты, прежде всего, подтверждают, что предлагаемую технологию захвата астероидов на орбиту спутников Земли реализовать в принципе можно. Длительность выполнения всей последовательности маневров многократного

Таблица 4

Параметры орбиты для астероида 2014 QN266

Астероид	2014 QN266
Время, UTC	15.03.2048 06:00:00
Эксцентриситет	0.7877
Большая полуось, км	426295.29417
Наклонение, град.	153.7
Долгота восходящего узла, град.	168.9
Аргумент широты перигея, град.	29.30

наведения астероида на траектории облетов Земли и Луны зависит от величины его начальной скорости: с увеличением скорости растет и время, необходимое для захвата астероида. Так, в рассмотренных примерах для астероида 2014 QN266, скорость которого на бесконечности относительно Земли первоначально составляет 2.9 км/с, продолжительность миссии по захвату равна почти 20 годам, для астероида 2012 AP10 при начальной относительной скорости 3.5 км/с — почти 27 годам.

* * *

Итак, гравитационные маневры, управляющие движением астероидов, могут рассматриваться как эффективный инструмент при решении задач планетарной защиты, научных исследований и извлечения необходимых материалов в рамках освоения космического пространства. Действительно, сравним массу полезной нагрузки, доставляемой с Земли на аналогичную лунной орбиту с помощью носителя «Протон-М», с массой астероида, который с применением того же носителя можно захватить на такую же орбиту. В первом случае это не более 6 т, во втором — не менее 1500 т. Правда, следует отметить, что реализация второго сценария может потребовать 20 лет. Однако этот срок мы оценили, исходя из числа астероидов, каталогизированных на сегодня. А день завтрашний может принести нам новые сюрпризы. ■

Литература

1. *Wie B., Pitz A., Kaplinger B. et al.* Optimal fragmentation and dispersion of hazardous near-Earth objects // NIAC Phase I final report, Grant № NNX11AR43G, Asteroid Deflection Research Center, Department of Aerospace Engineering, Iowa State University, Ames, IA. 2012.
2. *Nazirov R.R., Eismont N.A.* Gravitational maneuvers as a way to direct small asteroids to trajectory of a rendezvous with dangerous near-Earth objects // *Cosmic Research*. 2010. V.48. №5. P.479–484.
3. *Brophy J.R., Muirhead B.* Near-Earth asteroid retrieval mission (ARM) study // The 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington. October 6–10, 2013. IEPC-2013-82 (<http://www.kiss.caltech.edu/study/asteroid/papers/near.pdf>).
4. *Цандер Ф.А.* Перелеты на другие планеты // *Техника и жизнь*. 1924. Вып.13. С.15
5. *Ледков А.А., Эйсмонт Н.А., Боярский М.Н. и др.* Управление движением околоземных астероидов // *Письма в Астрономический журнал*. 2015. Т.41. №8. С.482–489.
6. *Шувалов В.В., Светцов В.В., Трубецкая И.А.* Оценка размера зоны разрушений, производимых на поверхности Земли ударами астероидов размером 10–300 метров // *Астрономический вестник*. 2013. Т.47. №4. С.284–291.

Луна — от исследований к освоению

Л.М.Зеленый, И.Г.Митрофанов

Можно ли представить себе будущее развитие земной цивилизации без освоения и использования Луны? Как мы писали еще три года назад, безусловно, нет*. Система Земля—Луна уникальный астрономический объект, в котором небольшая по массе планета обладает удивительно массивным спутником на относительно небольшом расстоянии от нее. Скорее всего, гигантские приливы, вызываемые Луной, которая 4 млрд лет назад находилась к Земле гораздо ближе, сыграли важную роль в зарождении земной жизни. Сравнительно недавно установили, что в реголите лунных полюсов присутствуют лед воды и другие летучие соединения, попавшие туда из самых далеких областей Солнечной системы, а возможно — из галактической межзвездной среды. В современной астрофизике накопилось большое число вопросов о происхождении и эволюции Луны. Космические инженеры рассматривают наш естественный спутник в качестве будущего космического континента земной цивилизации. Данная статья посвящена описанию начальной фазы лунной программы нашей страны, кото-

* Зеленый Л.М., Хартов В.В., Митрофанов И.Г., Долгополов В.П. Луна: исследование и освоение вчера, сегодня, завтра, послезавтра // Природа. 2012. №1. С.23—29.

© Зеленый Л.М., Митрофанов И.Г., 2015



Лев Матвеевич Зеленый, вице-президент РАН, академик, доктор физико-математических наук, директор ИКИ РАН, профессор Московского физико-технического института. Научные интересы связаны с плазменными процессами в космической среде, физикой и эволюцией Солнечной системы. Член ряда международных научных организаций. Член редколлегии «Природы».



Игорь Георгиевич Митрофанов, доктор физико-математических наук, заведующий отделом ядерной планетологии ИКИ РАН. Область научных интересов — астрофизика высоких энергий и ядерная планетология. Руководитель четырех российских экспериментов на борту Международной космической станции и на автоматических межпланетных аппаратах НАСА «Mars Odyssey», LRO и «Curiosity».

рая создаст условия для последующих этапов планомерного освоения лунного континента.

За три года после публикации упомянутой статьи на близкую тему многое изменилось. Во-первых, появились новые научные результаты о природной среде Луны. Во-вторых, в конце 2011 г. произошла трагическая неудача при запуске марсианского исследовательского проекта «Фобос-грунт». Космический аппарат из-за сбоя на борту при первом включении маршевого двигателя остался на низкой околоземной орбите и сгорел в атмосфере после нескольких месяцев бесплодных попыток установить с ним радиосвязь. Эта авария потребовала пересмотра планов и сроков проведения всех проектов по освоению дальнего космоса (включая и лунные), что заставило на основе уроков от неудавшегося пуска разработать новую концепцию реализации лунных проектов. В-третьих, претерпе-

вает значительные изменения общая политика России в освоении дальнего космоса, который вновь (как это было в середине прошлого века) становится одной из важнейших областей технологического развития нашей страны. Главным направлением на ближайшие десятилетия при этом признается освоение Луны путем интеграции пилотируемых и автоматических средств.

Почему Луна?

Напомним читателям «Природы» основные причины привлекательности нашего спутника.

Во-первых, несмотря на то что на Луне нет атмосферы, она, как ни парадоксально, пожалуй, единственное более или менее комфортное место в Солнечной системе для будущих космонавтов с Земли, гораздо более удобное, чем орбитальные станции. Хотя поток солнечной энергии на Луне почти равен тому, который получает Земля, в окрестности ее полюсов есть районы, где температура не поднимается выше минус 200°C. Там в течение сотен миллионов лет откладывались слои испарившегося вещества падавших на Луну комет и астероидов. Для космонавтики важно то, что полярная вечная мерзлота содержит и обычный (водяной) лед, который исключительно важен для создания обитаемых баз с полностью автономным циклом жизнеобеспечения. Во-вторых, гравитация Луны гораздо меньше земной, но ее вполне хватит, чтобы поддерживать физиологический тонус участников продолжительных экспедиций. Наконец, размещение обитаемых комплексов под поверхностью на глубине всего около двух метров полностью решит самую сложную проблему дальних космических полетов за пределами земной атмосферы и магнитосферы — защиту экипажа от космических лучей и солнечной радиации.

Если стратегическим рубежом освоения Солнечной системы в обозримой перспективе станет Марс, то Луна представляет собой тактический плацдарм на пути к красной планете (в том числе для отработки важнейших элементов марсианских экспедиций). В ближайшие десятилетия исследования Марса будут проводиться только с помощью автоматических станций. Многие научные и инженерные проблемы будущей марсианской космической программы (например, защита от радиации и обеспечение среды обитания экипажа) могут решаться и технически отрабатываться при освоении Луны. Кроме того, Луна все еще интересна и для фундаментальной науки. До сих пор нет единой общепризнанной модели ее образования.

Этого, на наш взгляд, вполне достаточно, чтобы лунные исследования в следующие 10—15 лет стали центральными в отечественной космической программе. В лунных проектах наилучшим образом сочетаются пилотируемая космонавтика

и работа автоматических аппаратов, что принципиально важно для российской программы космических исследований.

«Новая Луна» XXI века

Как известно, первый период космических исследований Луны связан с лунной гонкой СССР и США в 60—70-х годах прошлого века. Благодаря этому сейчас мы располагаем пилотируемым космическим кораблем «Союз» (созданным в качестве лунного перелетного модуля) и тяжелой ракетой-носителем «Протон». Двигатели, которые были сконструированы для лунного ракетносителя Н-1, остаются востребованными как для современных, так и для перспективных ракет.

Второй период лунной космонавтики начался в 90-х годах прошлого века и продолжается сейчас. Важнейшим событием стало обнаружение признаков летучих веществ (в том числе и водяного льда) в окрестности постоянно затененных областей (находящихся, как правило, в кратерах) в приполярных частях Луны, где солнечные лучи падают на поверхность почти по касательной. Вначале казалось, что этот научный результат не имеет прямого практического выхода, поскольку посадить аппарат в место, лишенное потока солнечной энергии, представлялось затруднительным. Ситуация в корне изменилась в 2009 г., когда российский нейтронный прибор LEND («Lunar Exploration Neutron Detector» — Лунный исследовательский нейтронный детектор), и поныне работающий на борту американского космического аппарата LRO («Lunar Reconnaissance Orbiter» — Лунный разведывательный спутник), провел первые измерения содержания водяного льда в приповерхностном слое реголита с высоким пространственным разрешением около 10 км. Оказалось, что летучие вещества (в том числе и водяной лед) находятся в небольших полярных областях вечной мерзлоты как внутри, так и вне постоянно затемненных областей вблизи полюсов Луны (рис. 1).

Продолжение исследований Луны с применением телескопа LEND в течение более пяти лет (с 2009 по 2015 г.) позволило накопить огромный объем данных о нейтронном излучении и на основе его анализа получить новые знания о процессах переноса и распространенности воды на естественном спутнике Земли (рис. 2, 3). Оказалось, что в высокоширотных областях Луны среднее содержание воды в реголите на склонах, которые обращены в сторону полюсов, больше, чем на склонах, расположенных на той же широте, но обращенных на запад, на восток или в сторону экватора. Наиболее вероятная причина этого эффекта — относительно более низкие средние температуры реголита на полярных склонах вследствие меньшего потока солнечного излучения по сравнению с другими участками поверхности на аналогичной

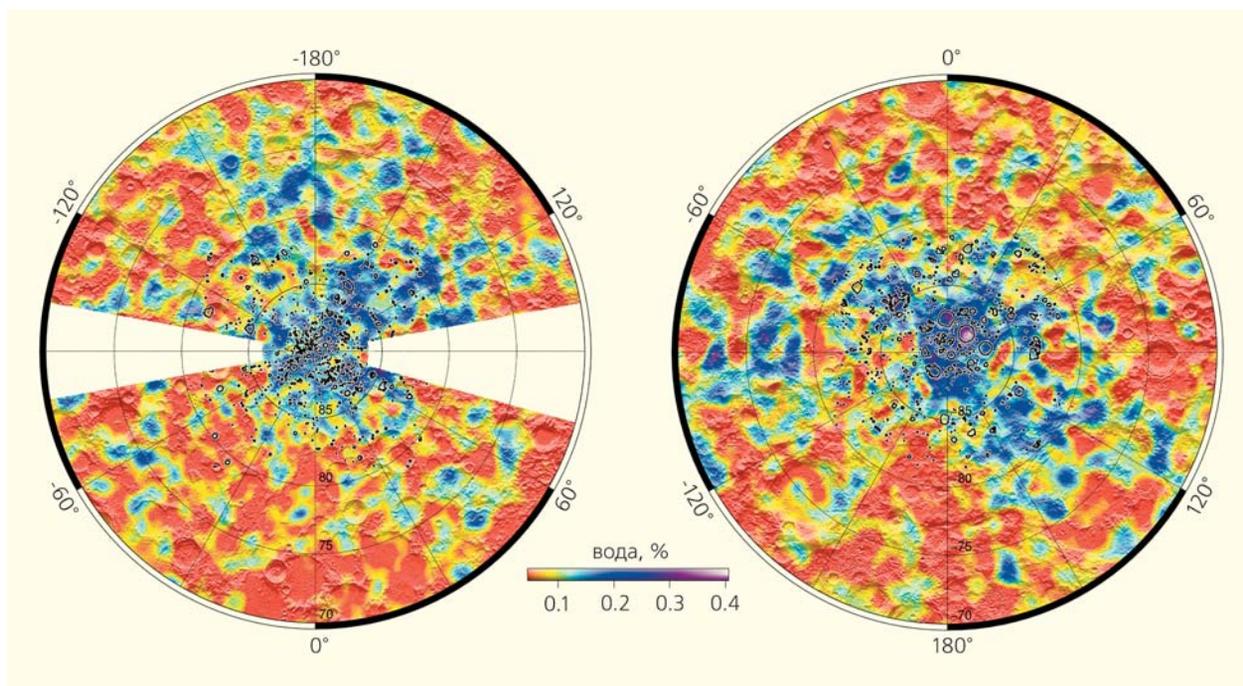


Рис. 1. Карты распространности водяного льда в реголите на Северном (слева) и Южном полюсах Луны, по данным российского нейтронного телескопа LEND на борту лунного спутника НАСА LRO. Белые сегменты на карте северного полюса связаны с отсутствием статистически обеспеченных данных из-за особенностей измерений на борту спутника. Оттенками серого цвета на картах показан лунный рельеф, черными контурами обозначены границы областей постоянного затенения.

широте, и, как следствие, повышенное содержание в нем конденсированных молекул воды.

Второй новый эффект, обнаруженный в эксперименте LEND, — переменность нейтронного потока с поверхности в зависимости от локального времени лунных суток (лунаций). Эта переменность, вероятно, связана с вариациями содержания воды в реголите в течение лунации. Максимальная концентрация воды наблюдается утром, в 6 ч 35 мин, а минимальная — днем, в 14 ч 35 мин. Эффект утренней конденсации воды в грунте Луны напоминает эффект утренней росы на Земле и указывает на то, что лунная экзосфера постоянно содержит значительную концентрацию водяного пара. Последний утром конденсируется в порах реголита и в течение дня испаряется обратно в экзосферу.

Открытие в эксперименте LEND эффектов полярных склонов и утренней конденсации ставит перед исследователями вопрос о происхождении и переносе воды в экзосфере современной Луны. Ранее предполагалось, что основной источник воды на Луне — эпизодические столкновения с кометами и астероидами. Но под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца молекулы воды в лунной экзосфере должны распадаться примерно за такое же короткое время, как и на Земле, — несколько десятков часов, и потому их присутствие в экзосфере современной Луны нельзя объяснить столкновением Луны с малым небес-

ным телом несколько миллионов лет тому назад. Наличие молекул воды в экзосфере современной Луны означает наличие стационарного источника воды. Их может быть два: внешний (производство молекул воды в верхнем слое поверхности из ионов водорода солнечного ветра) и внутренний (диффузия на поверхность собственной воды из лунных недр). Вопрос о природе лунной воды — ключевой для будущих исследований нашего естественного спутника.

Поверхность Луны подвержена не только действию плазмы солнечного ветра, но также солнечному ультрафиолетовому и рентгеновскому излучениям. Она, подобно любому объекту, находящемуся в плазме, заряжается, приобретая электростатический потенциал, который минимизирует полный ток поступающих межпланетных протонов, ионов и электронов. Зарядка поверхности происходит также при взаимодействии Луны с плазмой магнитосферного хвоста, когда она проходит сквозь него раз в 28 дней. Напряженность электрического поля при этом может достигать ~1 кВ/м.

Аналогичным образом заряжаются и частицы лунной пыли. Особенность плазменно-пылевой экзосферы состоит в том, что пылевые частицы приобретают заряд при контакте друг с другом и с поверхностью Луны. Электрические заряды для частиц с размерами 50–200 мкм могут достигать значений 10^5 – 10^6 зарядов электрона. На ос-

вещенной стороне Луны заряд, как правило, положительный, а на ночной — отрицательный. Потенциал в переходной области терминатора (линии, разделяющей день и ночь) близок к нулю. По данным с борта спускаемых космических аппаратов НАСА «Surveyor», пылевые частицы размером около 5 мкм «левитировали» в электростатическом поле поверхности на высоте приблизительно 10 см. В миссиях «Apollo» также проводились наблюдения субмикронной пыли в экзосфере на высотах вплоть до 100 км. Экспериментальные исследования пылевой экзосферы осуществлялись и орбитальным аппаратом НАСА LADEE («Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer»).

В области терминатора отрицательно заряженная пыль (бывшая ранее в освещенной области) взаимодействует с отрицательно заряженной поверхностью Луны. В результате происходит резкое ускорение пылевых частиц и их подъем. Данный эффект может приводить к формированию над терминатором пылевых бурь. В полярных областях граница тени и света определяется локальными условиями освещенности и структурой рельефа. На дне полярных кратеров существуют постоянно затемненные районы. Там границы тени и света могут быть более резкими, чем в области терминатора. Градиенты всех параметров плазмы (в том числе электрического потенциала) на этих границах могут оказаться более значительными, чем на терминаторе, и вблизи полюсов можно ожидать более сильные электрические поля. Из-за различия в обтекании электронами и протонами рельефных структур Луны электрические поля могут иметь достаточно сложную конфигурацию, что также должно оказывать существенное влияние на поведение пылевых частиц и приводить к усилению эффектов, связанных с их переносом.

Для выяснения природы физико-химических процессов на лунной полярной поверхности требуется провести детальные исследования свойств нейтральной и плазменной экзосфе-

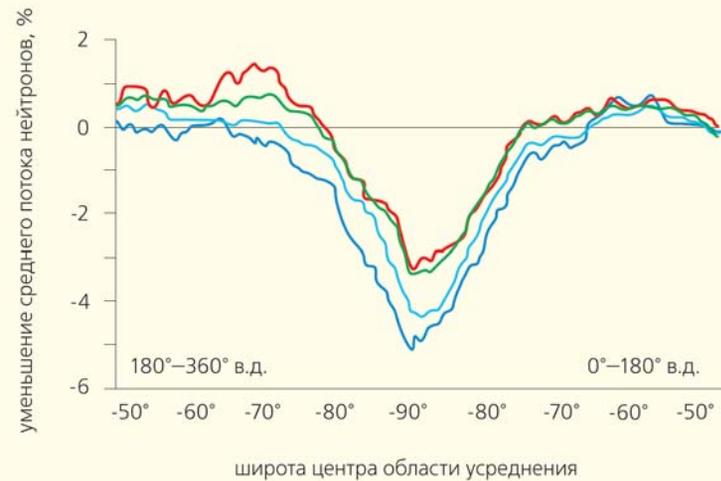


Рис.2. Уменьшение среднего потока тепловых нейтронов (в процентах от среднего значения на умеренных широтах) от поверхности склонов в окрестности Южного полюса Луны (полюс соответствует широте 90°) по данным коллимированных детекторов телескопа LEND. Голубая и зеленая кривые отвечают склонам, обращенным к полюсу и к экватору соответственно. Синяя и красная кривые отвечают склонам размером более 15 км, обращенным к полюсу и к экватору соответственно. Левая и правая половины профиля для интервалов $[-50, -90]$ и $[-90, -50]$ соответствуют усреднению потока нейтронов по долготным интервалам $[180-360]$ и $[0-180]$ восточной долготы.

ры, а также пылевой атмосферы в окрестности полюсов. Лунные пылинки обладают уникальными свойствами химической активности и высокой абразивностью, что связано со сложной микроструктурой их поверхности и наличием на ней химических элементов со свободными валентными связями. Сейчас, в эпоху начала практического освоения нашего спутника, становится акту-

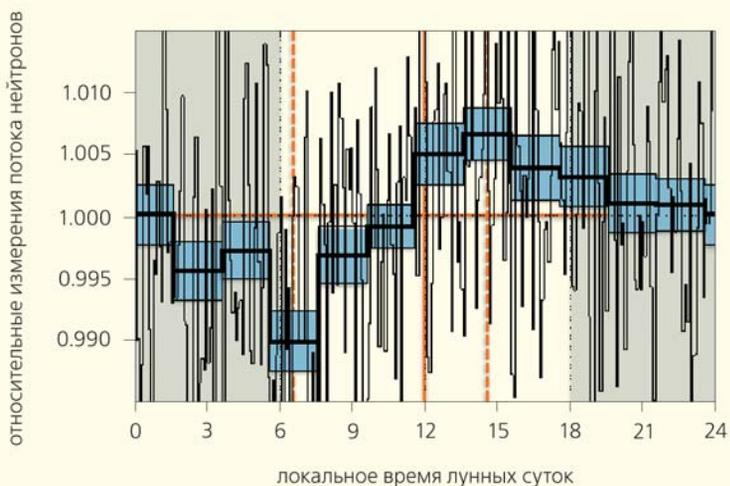


Рис.3. Относительные суточные изменения среднего потока тепловых нейтронов, зарегистрированных прибором LEND в полосе широт $\pm 30^\circ$ вдоль экватора.

альным вопросом о том, что лунная пылевая плазма может отрицательно влиять как на работу космической техники, так и на здоровье людей. Астронавты, побывавшие на Луне, выяснили, что слой пыли на поверхности составляет несколько сантиметров. Она прилипает к скафандрам, к поверхности космических аппаратов, к приборам и т.д. Это может отрицательно сказаться на работе многих систем. Так, в частности, на покрытых пылью поверхностях приборов резко возрастает поглощение солнечного излучения, и они перегреваются. Пыль, прилипая к скафандрам, попала внутрь лунного модуля «Apollo» после возвращения в него астронавтов. Таким образом, лунная пыль представляет собой существенный фактор риска. В связи с этим особенно важно выяснить физические процессы полярной пылевой экзосферы, построить инженерную модель этого уникального природного явления полярной Луны.

Актуальные цели исследования Луны

Полярные районы Луны за последние годы стали одной из основных стратегических целей космических исследований. Это способствовало включению Советом по космосу РАН серии лунных проектов в Федеральную космическую программу 2016—2025 гг. Главная задача этих проектов — создать научную основу для будущего практического освоения нашего естественного спутника.

С учетом прежних и новых результатов можно сформулировать три наиболее актуальные цели лунных проектов. Во-первых, как уже говорилось, необходимо детально изучить лунный полярный реголит, измерить изотопный состав атомов летучих соединений и основных породообразующих соединений, а также сравнить его свойства со свойствами грунта на умеренных широтах. При подтверждении гипотезы, согласно которой летучие компоненты попали на Луну в кометах и астероидах, мы получим доступ к «естественной хронике» глобальных процессов эволюции солнечной системы за все время ее существования. Если споры простейших организмов внеземного происхождения действительно переносятся между звездными системами под ледяными панцирями межзвездных комет, то их можно обнаружить в веществе лунных полюсов. Помимо научных исследований полярного реголита, необходимо разрабатывать технологии добычи и переработки грунта непосредственно на Луне, чтобы в будущем использовать летучие соединения на борту лунных станций и транспортных средств.

Во-вторых, необходимо знать, отличаются ли физические условия на поверхности полярной Луны и процессы, происходящие в полярной экзосфере, от тех, что наблюдаются на умеренных широтах. На Луне, где нет атмосферы, немалую

роль играет солнечный ветер, прямо взаимодействующий с грунтом и экзосферой. На умеренных широтах плазма солнечного ветра «падает» на грунт «сверху», а в окрестности полюсов она приближается к поверхности почти по касательной. Это формирует сложную картину электрического поля, которое влияет на свойства и поведение лунной пыли.

В-третьих, необходимо обследовать с орбиты и непосредственно с поверхности наиболее благоприятные районы возможного размещения Лунного полярного полигона и в перспективе — постоянно действующей Лунной базы. В ближайшее десятилетие следует приступить и к созданию космической инфраструктуры Лунного полигона, обеспечивающей транспортные операции, энергоснабжение обитаемого комплекса и связь. Вероятно, районы начального освоения должны располагаться в окрестности лунных полюсов, поскольку именно там период освещенности Солнцем максимален, а лунный реголит имеет относительно высокое содержание водяного льда. Большую часть времени размещенные в полярных районах солнечные геофизические и астрономические обсерватории будут работать в автоматическом режиме, но космонавты должны иметь возможность проводить их сборку, наладку, техническое обслуживание и в случае необходимости — ремонт приборов.

Для организации Лунной базы надо выбирать место, где удовлетворяются сразу три условия:

- продолжительный период освещения Солнцем в течение одних лунных суток (одной лунации);

- постоянная радиовидимость Земли для взаимодействия с экипажем базы, для управления аппаратурой и для передачи собранной информации;

- присутствие реголита с заметными включениями водяного льда и других летучих соединений, которые в перспективе станут природными ресурсами для системы жизнеобеспечения базы, выработки ракетного топлива и разработки строительных материалов *in situ*.

Такая совокупность требований к району размещения Лунной базы уменьшает число потенциально интересных областей до нескольких единиц. Именно они и станут объектами особого внимания для будущих покорителей Луны, и участие нашей страны в данных изысканиях, безусловно, отвечает национальным интересам.

Освоение Луны начинается

Лунные проекты ведущих космических агентств, которые начались в первом десятилетии текущего века, практически все нацелены на переход от исследовательских задач к освоению. Программу НАСА в 2009 г. начал исследовательский спутник

LRO, в 2012-м гравитационное поле Луны изучали спутники-близнецы проекта GRAIL («Gravity Recovery and Interior Laboratory»). В 2013—2014 гг. агентство успешно провело научно-технологический проект LADEE, в котором с орбиты 20—60 км изучался состав лунной экзосферы. Изюминкой этого проекта стал успешный эксперимент по лазерной связи между станцией на Земле и бортом космического аппарата на расстоянии 385 тыс. км. Скорость передачи данных по каналам низко- и высокоскоростной связи составила 20 и 622 Мбит/с соответственно.

На окололунной орбите успешно отработали индийский спутник «Chandrayan-1» и японский «Kaguya», а сейчас специалисты Японии создают интеллектуальный луноход для исследования поверхности. С 2007 по 2015 гг. Китай реализовал четыре проекта «Chang'e». Европейское космическое агентство (ЕКА) в 2003—2006 гг. осуществило лунный орбитальный проект SMART-1. До 2010 г. оно также разрабатывало аппарат для высокоточной посадки в районе лунного полюса.

Последним лунным проектом СССР была автоматическая станция «Луна-24». В 1976 г. она доставила на Землю 170 г лунного грунта с глубины около 2 м. Сейчас Роскосмос и Российская академия наук с учетом новейших научных данных о полярных районах Луны разработали концепцию первого этапа российской программы «Луна-автоматы». До 2025 г. лунные исследования будут проводиться с применением только автоматических станций. Проекты первого этапа должны обеспечить решение двух практических задач для подготовки будущего освоения Луны: выбрать наиболее благоприятный район в окрестности Южного полюса для размещения там Лунного полигона с последующим строительством на нем посещаемой лунной базы и провести детальные физико-химические исследования полярного реголита (включая анализ содержащихся в нем летучих соединений, органических и, вероятно, предбиологических молекулярных соединений).

Изучение и освоение Луны российскими исследователями должно происходить как постепенное расширение лунной инфраструктуры вокруг одного или двух предварительно обследованных плацдармов. Первая посадка российского автоматического лунного аппарата «Луна-25» (рис.4) планируется в период с октября 2018 г. до января 2019 г. в южном приполярном районе. Для него сведения о наличии в реголите воды и других лунных ресурсов должны сопровождаться данными об относительной ровной и безопасной поверхности. Вероятно, в этом районе еще не будут размещаться Лунный полярный полигон и Лунная база. Наиболее подходящий район для них будет выбран в 2020 г., после исследований как непосредственно на поверхности Луны — автоматическим посадочным аппаратом «Луна-25», так и с орбиты — автоматическим

спутником «Луна-26» (рис.4). В реализации этих проектов в части наземного обеспечения связи и траекторных измерений планирует принять участие ЕКА.

В 2021 г. в выбранный район размещения Лунного полярного полигона предполагается направить автоматический аппарат «Луна-27», оснащенный приборами для безопасной и высокоточной посадки (рис.4), грунтозаборным устройством для криогенного забора образцов с глубины до 2 м и комплексом масс-спектрометров для изучения летучих соединений. Часть бортовой аппаратуры собирается предоставить ЕКА. Фактически, «Луна-27» должна стать первым элементом инфраструктуры Лунного полярного полигона. В 2023—2024 гг. из района Лунного полигона на Землю на возвратной ракете автоматического аппарата «Луна-28» будет доставлено вещество полярного реголита для детальных исследований в земных лабораториях. Этот проект также может быть реализован совместно с ЕКА. Так должен закончиться первый этап программы «Луна-автоматы».

Что нас ждет впереди?

Реализация проектов первого этапа лунной программы позволит к 2025 г. восстановить технологии отечественных лунных автоматических станций, в том числе мягкую посадку на Луну, продолжительную работу аппарата в условиях длительной полярной ночи и возврат лунной ракеты на Землю. Проведенные научные эксперименты дадут возможность выяснить состав летучих соединений в полярном реголите и выбрать наиболее перспективные районы для следующих шагов в освоении Луны.

Затем лунную программу должны продолжить проекты второго этапа — «Луна-полигон», которые будут выполняться на основе интеграции автоматических и пилотируемых средств. Проекты второго этапа включают автоматическую экспедицию в район Лунного полярного полигона с использованием лунохода длительной (до пяти лет) эксплуатации и большого (до 50 км) радиуса действия (рис.4).

Основной задачей лунохода станет сбор наиболее интересных образцов вещества в окрестности Лунного полигона с глубины, достигающей по крайней мере 2 м, для последующей доставки на Землю. Добытые с помощью бурильной установки, разработанной и испытанной в рамках проекта «Луна-27», образцы будут предварительно сортироваться аналитическими приборами на борту. Из различных участков планируется отбирать не менее шести-семи образцов.

На этапе «Луна-полигон» предполагается создать первую многомодульную исследовательскую станцию на поверхности Луны, которая бу-

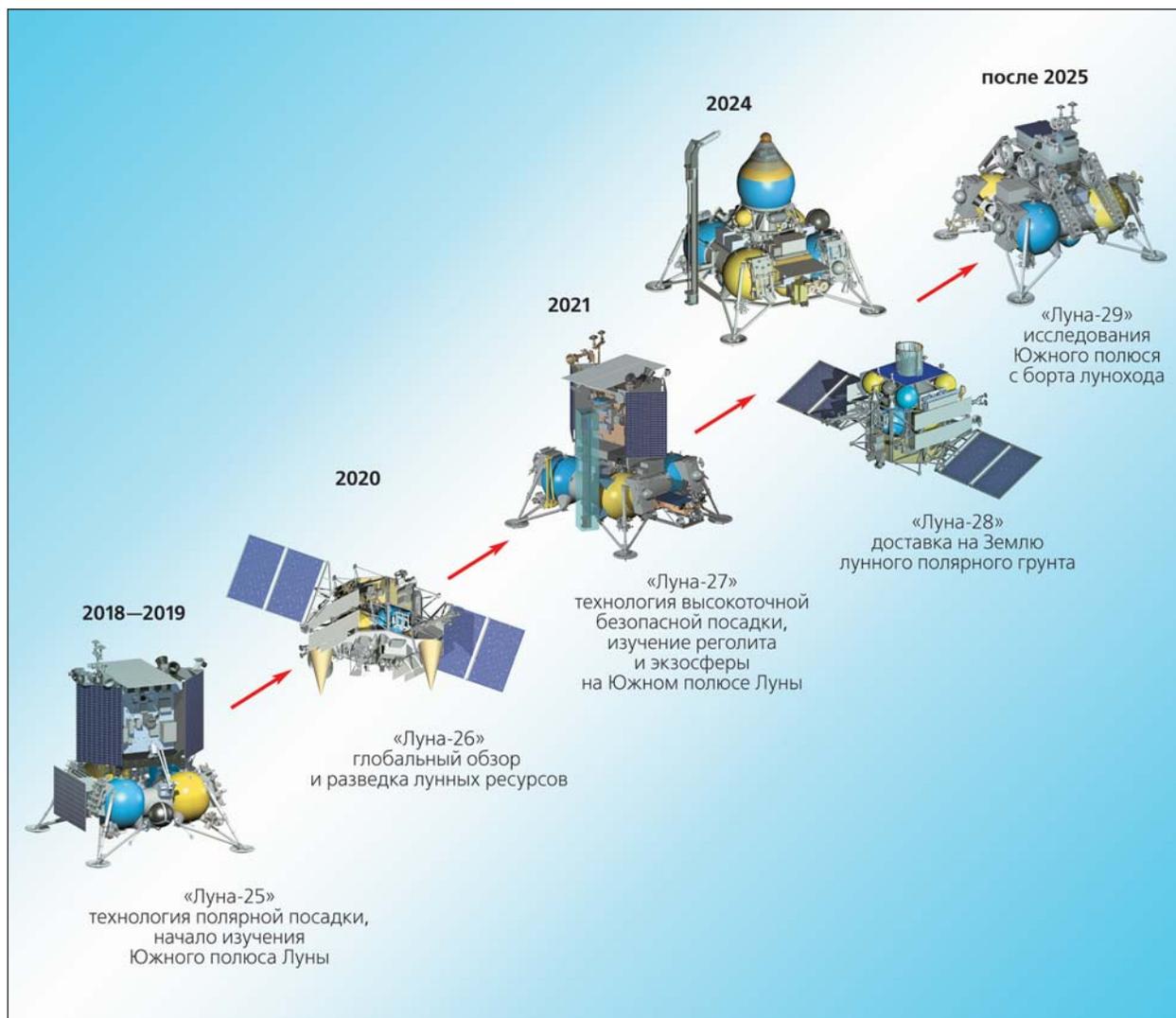


Рис.4. Линейка проектов на этапе «Луна-автоматы» и на начальной фазе этапа «Луна-полигон».

дет иметь общие систему энергопитания, связь с Землей и обеспечение теплового режима. На этой станции предполагается провести научные и технологические эксперименты с луноходом и другими автоматическими посадочными аппаратами при непосредственном участии экипажа пилотируемого аппарата на окололунной орбите: механическую и электрическую стыковку аппаратов на орбите и на поверхности, обследование отдельных участков Луны с использованием многоразового автоматического взлетно-посадочного аппарата, предварительный анализ большого числа образцов грунта и др.

Наиболее интересным на втором этапе представляется проект с применением пилотируемых и автоматических средств по доставке на Землю коллекции образцов лунного полярного грунта, отобранных автоматами из различных участков (как в окрестности полигона, так и в других районах). Пилотируемый корабль должен совершить

полет на низкой полярной окололунной орбите. С ним несколько раз в течение одной экспедиции будет стыковаться взлетно-посадочный аппарат, который доставит с поверхности на окололунную орбиту образцы (с возможной перегрузкой с борта лунохода) лунного реголита. После завершения орбитального полета продолжительностью около недели пилотируемый корабль с коллекцией лунного грунта возвратится на Землю.

К завершению этапа «Луна-полигон» должны быть изучены и решены две наиболее серьезные проблемы обеспечения безопасных пилотируемых экспедиций на Луну — токсичности и высокой абразивности лунной пыли и радиационной защиты людей и аппаратуры на поверхности нашего естественного спутника. Научные эксперименты по решению этих проблем будут проводиться практически на всех посадочных аппаратах — как первого, так и второго этапа. Затем последуют натурные отработки средств по защите

экипажей и техники от пылевой и радиационной опасности на Луне.

Ориентировочно в 2029—2030 гг. должен начаться третий этап российской лунной программы — «Луна-экспедиция». Тогда будут происходить регулярные пилотируемые экспедиции и полеты специализированных автоматических станций на Лунный полярный полигон, целью которых станет проведение научных исследований в рамках триады — «про Луну», «на Луне» и «с Луну». Продолжатся и научно-инженерные исследования по созданию технологий практического использования лунных природных ресурсов.

Ожидаемые результаты на этапе «Луна-автоматы»

Выполнение проектов первого этапа предложенной программы позволит:

- получить фундаментальные научные знания о полярных районах Луны, о процессах ее возникновения и эволюции, о ранних этапах образования и эволюции Солнечной системы (эти результаты дадут возможность планировать как дальнейшие научные космические исследования на лунных полярных полигонах и на окололунной орбите, так и будущие пилотируемые экспедиции);

- выяснить природу и происхождение воды и летучих соединений на современной Луне, изучить химический и изотопный состав летучих, провести поиск в образцах полярного реголита сложных молекулярных соединений, включая предбиологические молекулы и структуры (эти данные помогут существенно продвинуться в понимании космохимических процессов в протосолнечном облаке и в межзвездной среде, в решении фундаментальной проблемы происхождения жизни на Земле);

- построить научно-инженерную модель поверхности и экзосферы лунных полярных районов и исследовать наличие и распространенность летучих соединений в полярном реголите (эта информация станет научно-технической базой для освоения Луны человеком, для создания элементов лунной космической инфраструктуры);

- воссоздать в России на современном уровне технологии лунной посадки, продолжительной работы аппаратов на поверхности Луны, мобильных исследовательских экспедиций на автоматических долгоживущих луноходах большого радиуса действия и возврата космических аппаратов с Луны на Землю. Эти ключевые для освоения Луны технологии гарантируют доступ к лунным ресурсам, если такая задача будет поставлена перед космической отраслью; такой технологический задел необходим также для решения сходных задач изучения Марса, астероидов, спутников Юпитера и Сатурна;

- организовать сотрудничество с зарубежными странами, что позволит России сэкономить значительные средства и сосредоточить свои усилия на разработке наиболее перспективных космических технологий, в которых у нашей страны имеется опыт и немалый задел (бурение и добыча реголита, технологии лунохода, создание радиоизотопных источников энергии, возврат аппарата с Луны на Землю).

Проекты исследования Луны автоматическими космическими аппаратами на этапах «Луна-автомат» и «Луна-полигон» уже включены с разной степенью завершения в проект Федеральной космической программы на 2016—2025 гг. Они представляют, на наш взгляд, совершенно необходимую стадию государственной программы освоения Луны. Проекты следующего этапа «Луна-экспедиция» связаны уже с пилотируемыми полетами и должны обстоятельно обсуждаться в последующих публикациях. Как мы уже отмечали выше, именно при решении лунных задач наиболее эффективно объединяются самые сильные стороны отечественной пилотируемой космонавтики с громадным опытом исследований на автоматических космических аппаратах. Стратегический вектор развития российской дальней космонавтики задан: вначале — Лунный полярный полигон и Лунная база, затем — пилотируемая экспедиция на Марс. Наша ближайшая цель также ясна — посадка осенью 2018 г. «Луны-25» в неизведанный район в окрестности Южного полюса для пионерных исследований льдов, вмержших в реголит, и летучих соединений, принесенных кометами от самых далеких границ Солнечной системы. ■

В заключение мы выражаем благодарность сотрудникам Научно-производственного объединения им.С.А.Лавочкина В.В.Хартову, В.П.Долгополову и др., сотрудникам ИКИ РАН — участникам проектов «Луна-25», «Луна-26» и «Луна-27» и С.И.Попелю за продуктивное и полезное сотрудничество при подготовке данной статьи.

Метан на Марсе — это жизнь?

О.И.Кораблев

Есть ли жизнь на Марсе? Проходят годы, работают поколения ученых, запускаются космические аппараты, а однозначный ответ на этот вопрос так и не получен. Сейчас пять научных спутников работают на орбите вокруг Марса и два ровера трудятся на поверхности. Какие новые факты относительно обитаемости Марса получены за последние годы? Какие строятся планы относительно обнаружения на нем жизни?



Олег Игоревич Кораблев, доктор физико-математических наук, заместитель директора и заведующий отделом физики планет ИКИ РАН. Область научных интересов — физика планет и космические эксперименты. Научный руководитель экспериментов в программах «Mars Express», «Venus Express», «ExoMars» и др.

Исследования Марса

«Природа» не раз обращалась к теме исследований Марса [1, 2]. Основные сведения о красной планете получены по данным космических аппаратов, в основном американских. Ранние запуски были предприятиями высокого риска. Вместе с задачами исследования и техническими проблемами межпланетных перелетов решались задачи отработки ракет-носителей. С 1960 по 1973 г. СССР произвел 18 запусков, нацеленных на Марс. Два посадочных аппарата — «Марс-3» и «Марс-6» — впервые в истории достигли поверхности планеты. В дальнейшем усилия СССР в области исследования планет сосредоточились на Венере, в то время как США удалось реализовать наиболее успешную марсианскую миссию XX в. — программу

«Viking» (1975—1982). В этом проекте была предпринята и первая серьезная попытка поиска жизни, но противоречивые результаты соответствующих экспериментов задержали дальнейшие исследования на долгие 15 лет. За это время были существенно переосмыслены цели и задачи дальнейшего изучения красной планеты. Главным вопросом стал не поиск жизни, а сама возможность ее существования на Марсе. Открытие флювиальных форм рельефа и появление первых палеоклиматических моделей [3] привели к концепции раннего теплого и влажного Марса, разрабатываемой и совершенствуемой и поныне.

После краткого исследования Марса в проекте «Фобос-2» (1988) к 1990-м годам космические сверхдержавы запланировали две масштабные миссии: «Mars Observer» (спутник для всесторонних дистанционных исследований) в США и «Марс-96» (небывалая комбинация тяжелого спутника, марсохода, аэростатных зондов и двух малых станций) в СССР. Обе попытки обернулись неудачей. Наиболее драматична судьба «Марс-96». Планировавшийся на 1992 г. проект с трудом (уже без аэростатов и ровера) удалось довести до запуска только к 1996 г. В сочетании с глубокой структурной перестройкой общества в Советском Союзе катастрофа «Марс-96» надолго затормозила национальные планетные изыскания. Существенная часть научных исследований орбитальной миссии этой программы выжила только благодаря европейскому проекту «Mars Express».

В настоящее время изучение Марса идет широким фронтом (рис.1). После «Марс-96» уже запущены 15 космических аппаратов, девять из них успешны, а семь работают до сих пор. Это спутники «Mars Odyssey», «Mars Express», «Mars Reconnaissance Orbiter» (MRO) и два новых проекта — миссия по наблюдению экзосферы

© Кораблев О.И., 2015

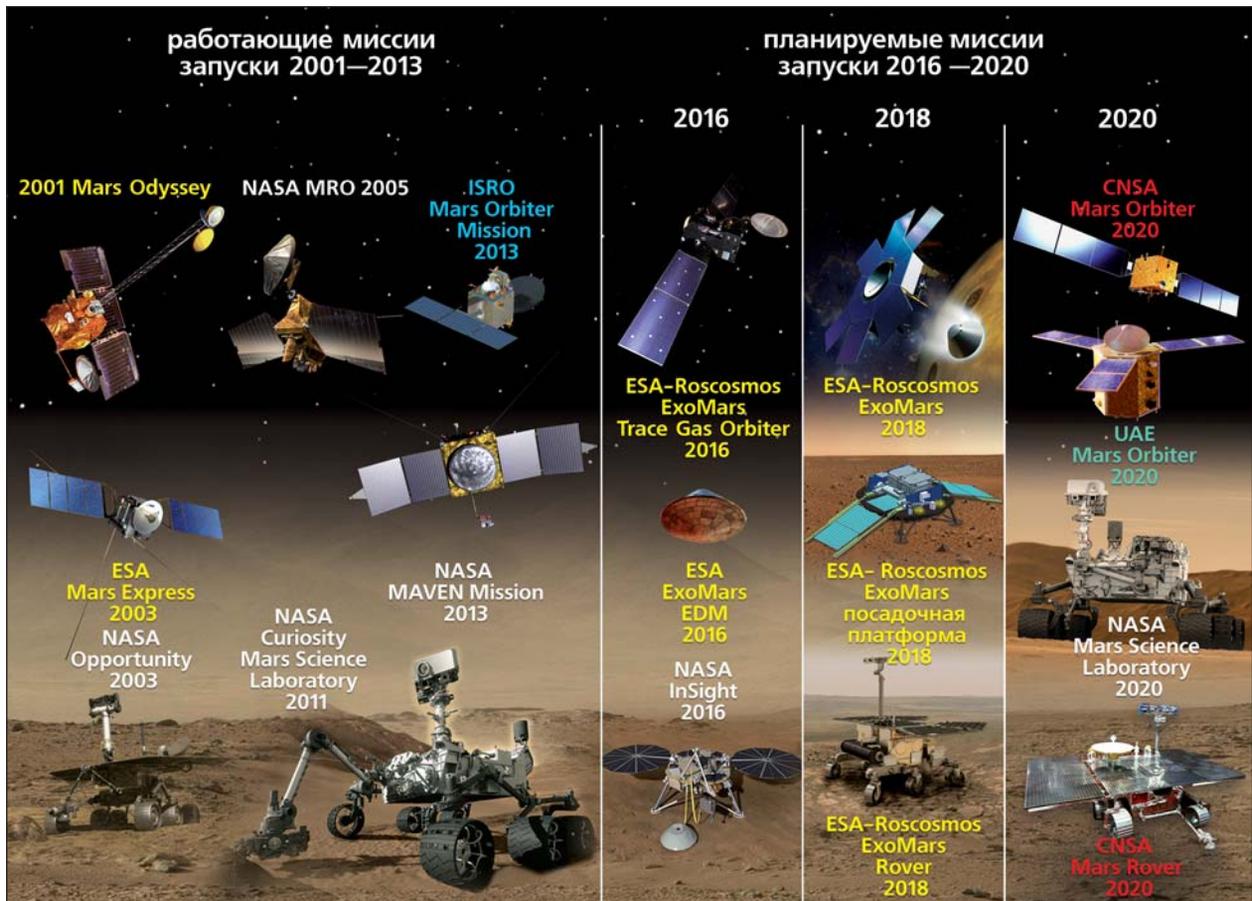


Рис.1. Исследования Марса космическими аппаратами и планируемые миссии (по материалам НАСА, 2014, с дополнениями).

и плазменного окружения «Mars Atmosphere and Volatile Evolution mission» (MAVEN) и индийский спутник «Mars Orbiter Mission» (MOM). На поверхности активны и два американских ровера — «Opportunity» и «Curiosity». Подготовлены и планируются новые миссии. На 2016 г. намечен старт первой части совместного проекта Европейского космического агентства (ЕКА) и Роскосмоса «ExoMars» — спутника TGO («Trace Gas Orbiter») и демонстратора посадки «Entry, Descent and Landing Demonstrator Module» (EDM). В том же году будет запущен посадочный аппарат НАСА «InSight», нацеленный на исследования внутреннего строения планеты. В 2018 г. предполагается запустить вторую часть проекта «ExoMars» — ровер, оснащенный буровым устройством для поиска следов жизни на глубине до 2 м и долгоживущую посадочную платформу для климатического мониторинга и геофизических исследований. В 2020 г. НАСА планирует начать первый этап проекта по доставке грунта — ровер для выбора и складирования образцов. На тот же год заявлены экспедиции к Марсу и новых космических игроков: Китайского космического агентства и Объединенных Арабских Эмиратов. Облик этих миссий пока до конца не ясен.

Современный климат Марса

Накопленный материал о планете очень велик. Получено множество новых данных о ее атмосфере и климате. Степень детальности и точности в описании климатических процессов уже приближается к дистанционным наблюдениям Земли.

Климат Марса определяется его удаленностью от Солнца (в 1.52 раза дальше, чем Земля) и наклоном оси вращения, сходным с наклоном оси Земли. В связи с этим, на Марсе есть ярко выраженный сезонный цикл, осложненный большим эксцентриситетом его орбиты. Расстояние до Солнца изменяется от 1.36 до 1.64 а.е. Зима в северном полушарии совпадает с афелием, что делает ее существенно холоднее, чем в южном. (Для сравнения: во время северной зимы Земля сближается с Солнцем, но смягчающий эффект почти незаметен из-за малого эксцентриситета.) Атмосфера Марса на 95% состоит из CO₂. Кроме того, она содержит 2% Ar и 1.8% N₂ и в малых количествах O₂, CO, водяной пар, NO, H₂, а также H₂O₂, Ne, Kr и Xe.

Средняя температура на Марсе –60°C, а давление 6 мбар (случайно или нет, они близки к тройной точке воды). Летом на солнце поверхность иногда прогревается до 20–25°C. С орбиты заме-

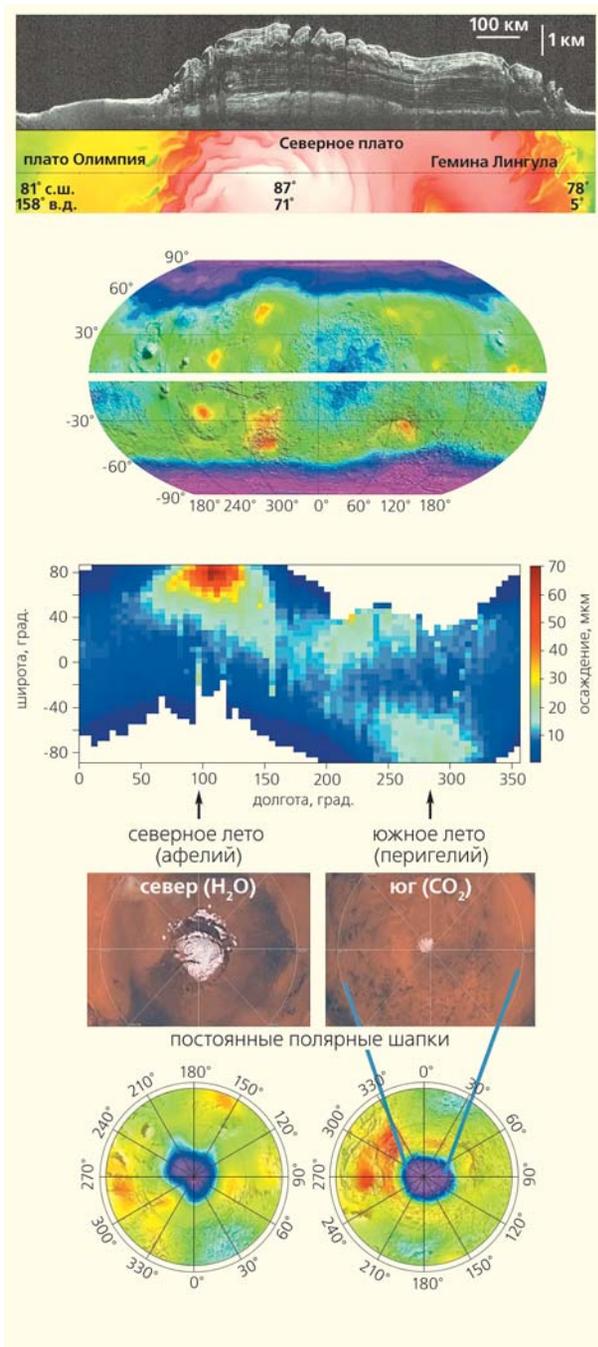


Рис.2. Основные данные о гидросфере Марса. Сверху вниз: разрез северной полярной шапки (данные прибора MARSIS — «Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding» — на аппарате «Mars Express»); сезонный цикл водяного пара в атмосфере (данные прибора SPICAM — «Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Mars» — на аппарате «Mars Express»); нейтронные данные, соответствующие содержанию водорода в 1—2 м поверхности (данные приборов HEND и GRS на аппарате «Mars Odyssey»). Синий цвет соответствует максимуму содержания водорода. Концентрация водорода в полярных областях значительно выше, чем должна быть в видимых постоянных полярных шапках [6, 7].

чены возникающие время от времени русла ручьев. По-видимому, таяние обнажающейся мерзлоты образует короткие ручьи с сужающимися руслами (как в аридных районах на Земле). Последние данные показывают, что в теплое время суток солевые растворы (в частности, впервые обнаруженные посадочным аппаратом «Phoenix» перхлораты ClO_4) находятся на поверхности в жидкой форме практически в любом сезоне [4].

Минимальные температуры ограничены конденсацией CO_2 . Зимой до 30% атмосферы конденсируется и выпадает в полярных областях, образуя сезонные полярные шапки. Толщина слоя твердой углекислоты достигает 1—2 м. Важную роль в климате Марса играет пыль. Субмикронная фракция присутствует в атмосфере постоянно, поглощая солнечное излучение и влияя на тепловой режим. Весной во время сублимации полярной шапки в атмосферу попадает большое количество пыли, и иногда возникают глобальные пылевые бури, охватывающие всю планету. Через несколько месяцев атмосфера возвращается к нормальному состоянию. Такому явлению нет аналогов на Земле, но именно исследование пылевых бурь на Марсе навело ученых на мысли о «ядерной зиме» [5]. В спокойные периоды основным механизмом подъема пыли в атмосферу служат так называемые пылевые дьяволы, или смерчи.

В состав гидросферы Марса входят кроме водяного льда, образующего постоянные полярные шапки, гидратированные минералы из зоны вечной мерзлоты (распространенной, вероятно, на всех широтах) и небольшое количество водяного пара из атмосферы. Эквивалентная глубина резервуаров (глубина сферического слоя воды на поверхности идеально шарообразной планеты) определяется с разной степенью достоверности. Хорошо известна ключевая роль атмосферы в переносе воды по планете. Атмосферная вода образует облака, отражающие солнечное излучение, и формирует (в течение десятков тысяч лет) водяной лед асимметричных постоянных полярных шапок. Но общее количество атмосферной воды ничтожно — 10—20 мкм эквивалентной глубины в зависимости от сезона.

Нейтронные спектрометры на космическом аппарате «Mars Odyssey», в том числе российский прибор HEND («High Energy Neutron Detector»), показали, что практически чистый лед постоянных шапок доходит до широт 50—60°, в то время как видимая граница северной полярной шапки летом находится на широте выше 80°, а южной — выше 94° (рис.2). Мощность этих льдов измерена длинноволновым радаром MARSIS на аппарате «Mars Express». Соответствующая эквивалентная глубина воды составляет ~20 м. Хуже известно содержание воды в грунте умеренных и экваториальных широт. Нейтронные данные для глубины 1—2 м в среднем соответствуют 14 см воды. Опираясь на эти измерения, радар для глубин до нескольких со-

тен метров дает модельно-зависимую оценку ~11 м. Таким образом, общее содержание воды на современном Марсе определяется в ~30 м эквивалентной глубины. Из-за ограниченности радарного зондирования это значение имеет характер нижнего предела (т.е. ≥ 30 м). По сравнению с океаном Земли (эквивалентная глубина 2.8 км) это, конечно, немного, но достаточно для существования биосферы. И гораздо больше, чем на Венере, где общее содержание воды не превышает нескольких сантиметров.

По гипотезе однородности первичного состава планет ювенильный Марс мог обладать океаном глубиной ~1.5 км. Осталось же ~30 м. Львиная доля воды была потеряна, и, согласно моделям, — в самом начале его истории, в течение нескольких миллионов лет (ничтожный период по сравнению с возрастом планет — 4.65 млрд лет).

Ранний теплый и влажный Марс

Широко известны геологические свидетельства обильной жидкой воды на поверхности Марса. Ископаемые долины, русла рек, целые дренажные системы охватывают обширные области планеты. Различными методами стратиграфии (но в основном методом сравнения скоростей появления метеоритных кратеров на Марсе и на Луне) оценен возраст данных форм рельефа — около 3.5 млрд лет. Это соответствует Гесперийскому периоду, названному по одноименному плато и отмеченному возникновением лавовых равнин и вулканов (например, горы Олимп). Для образования флювиальных форм рельефа (опять же, по геологическим оценкам) необходимо до 500 м эквивалентной глубины глобального океана.

Жидкая вода должна оставить следы и в формирующихся в ее присутствии минералах. Но долгое время на поверхности не удавалось найти следов ни глин, ни известняков. Впервые мине-

ральный состав поверхности в масштабе планеты изучался инфракрасным картирующим спектрометром OMEGA («Observatoire pour la Mineralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité») на аппарате «Mars Express» с разрешением ~300 м. На ограниченных участках, совпадающих с обнажениями древних кратеров, были обнаружены глинистые минералы (филлосиликаты) — продукт выветривания в присутствии воды силикатных пород (рис.3). Вопреки ожиданиям, таких минералов не оказалось там, где оставила следы жидкая вода: на северных равнинах, вблизи древних русел, на предполагаемом дне древнего моря, у кратеров, вскрывающих уровень вечной мерзлоты. Глины сохранились только в самых древних областях. Зато во многих местах были обнаружены гидратированные сульфаты — свидетели вулканической активности.

Сопоставив эти данные с последними хронологическими оценками (по методу подсчета кратеров), можно сделать важные выводы об истории климата Марса (рис.4). Две группы гидратированных минералов (филлосиликаты и сульфаты) образовались в разное время: глины, при формировании которых требуется вода, — в Раннем нойском периоде, а сульфаты, возникающие в кислой и, скорее всего, достаточно сухой среде, — существенно позже — 4–3.5 млрд лет назад [8].

Основной запас атмосферного CO₂ на Земле «складирован» в известняках или карбонатных минералах. Обнаружить их на Марсе позволило лишь высокое (~20 м) разрешение прибора CRISM («Compact Reconnaissance Imaging Spectrometers for Mars») на аппарате MRO. Карбонаты фиксировались в очень ограниченных областях: в обнажениях, на склонах древних долин и метеоритных кратеров [9]. Может ли быть, что ранняя углекислая атмосфера Марса, которая поддерживала парниковый эффект в Нойскую эпоху, «захоронена» в карбонатах, скрытых от наблюдателей позднейшими отложениями? Более вероятным представляется ее

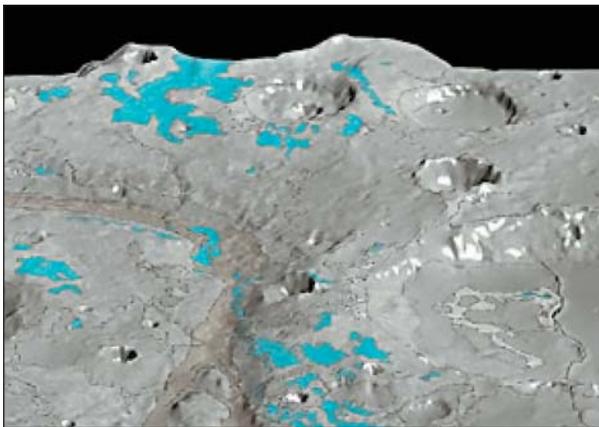


Рис.3 Свидетельства гидратированных пород на поверхности Марса. Глины (слева) были обнаружены с орбиты прибором OMEGA на аппарате «Mars Express». Фотография выходов осадочных пород (справа) сделана ровером «Curiosity».

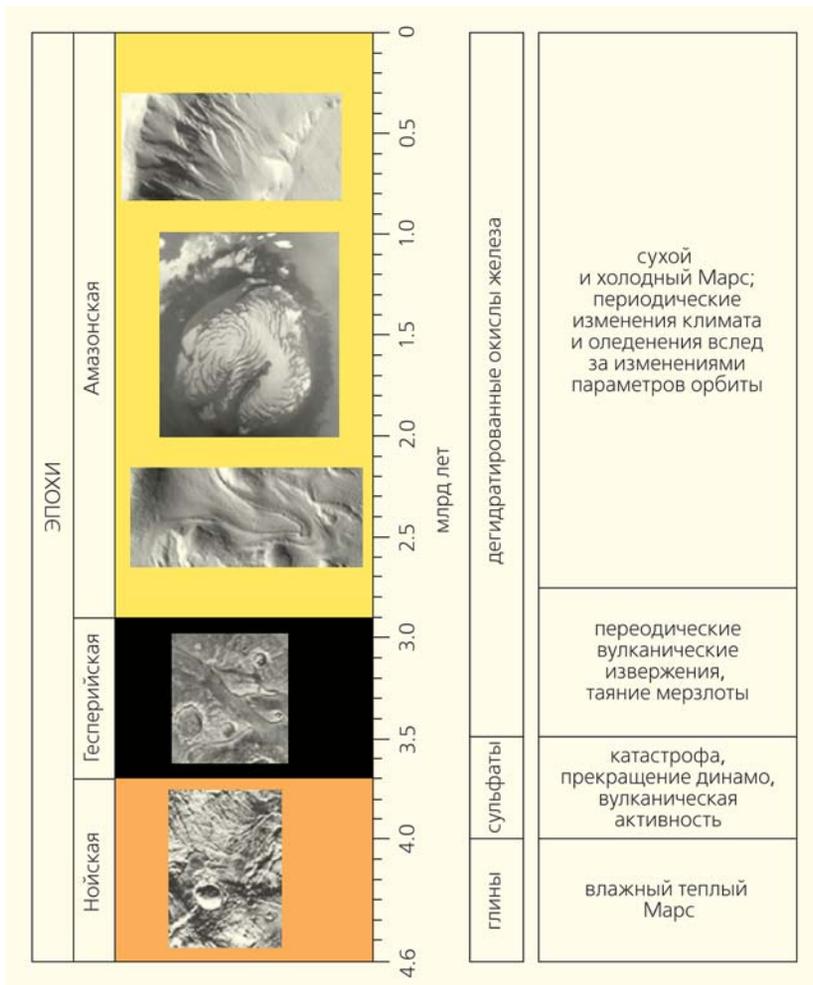


Рис.4. Геологическая история Марса. Слева — классическая модель марсианской хронологии: Нойская эпоха, характеризующаяся высоким уровнем метеоритной бомбардировки, вулканической активности, а также следами активности воды на поверхности; Гесперийская эпоха, во время которой продолжалась вулканическая активность и происходили катастрофические наводнения; и Амазонская, современная эпоха. Справа — модель, основанная на геохимических данных.

потеря, например, в результате поздней метеоритной бомбардировки (4–3.8 млрд лет назад).

Таким образом, период «раннего теплого Марса» мог закончиться существенно раньше, чем предполагалось ранее, и длиться недолго. В дальнейшем Марс оставался сухим, и активность на его поверхности была сильно ограничена, что позволило медленным процессам окисления и выветривания сформировать современный облик планеты.

Жизнь на Марсе

Вопрос об обитаемости любой планеты теснейшим образом связан с ее климатом. Марс вызывает особый интерес, как наиболее близкий к Земле по условиям и как единственный (помимо Луны) перспективный объект колонизации в Солнечной си-

стеме. Для «зарождения» жизни необходимы благоприятные условия. По современным представлениям, для этого требуется постоянный контакт вулканических пород с термальными водами на протяжении от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов лет. Как следует из минералогического картирования (подкрепленного многочисленными данными с поверхности), вероятность выполнения таких требований на теплом, влажном и вулканически активном Марсе в период 4.3–3.7 млрд лет достаточно высока (рис.3). Возраст древнейших на Земле строматолитов также приближается к этому значению. Но даже если условия не совпали по времени и зарождение жизни не произошло, есть вероятность занесения живых спор с Земли вместе с метеоритами. В ранние эпохи обмен веществом во внутренней Солнечной системе шел очень интенсивно, а возможность выживания спор при длительном пребывании в космосе и даже при входе в атмосферу доказана экспериментально. Неясно, правда, как споры могут пережить «запуск» — метеоритный удар, отправляющий частицы одной планеты на другую. Для выживания и даже размножения живых микроорганизмов пригодны многие области современного Марса. С другой стороны, относительно краткость благоприятных условий на раннем Марсе вряд ли совместима с продвинутой эволюцией, многообразием живых форм. Жизнь на Марсе, если она там есть, скорее всего, осталась на уровне микроорганизмов.

Найдены ли многочисленными миссиями, изучающими Марс, достоверные свидетельства биологической активности? Поиск органических веществ был одной из главных задач первых экспедиций на Марс, а прямое обнаружение жизни стало главной целью двух посадочных аппаратов «Viking» (1975–1982). Три вида анализов несколько раз повторялись на различных образцах грунта и с обоих аппаратов. Грунт нагревали, и выделяющиеся газы исследовали с помощью хромато-масс-спектрометра, использовались также питательные среды, помеченные изотопами. Результаты, указывающие на метаболизм, получились только в одном эксперименте. В четырех слу-

чаях для каждого свежего образца наблюдался выход газа, более сильный в начале. В контрольном эксперименте со стерилизацией грунта выход газа был подавлен. Но одновременно хромато-масс-спектрометр позволил установить очень низкий предел на содержание органики, и, понимая, что грунт Марса содержит сильный окислитель (спустя 20 лет выяснилось, что его роль играют перхлораты), большинство исследователей интерпретировало выход газа как следствие неорганических реакций. Это подтверждается и многочисленными лабораторными экспериментами на аналогах марсианских пород. Все же, чувствительность экспериментов «Viking» была невысока. Современная оценка предела обнаружения живых клеток в том эксперименте $<10^7$ кл.·см⁻³ [10]. Напомним, что в микробиологии стерильной считается среда с содержанием клеток ~ 10 кл.·см⁻³.

Отрицательные результаты эксперимента по обнаружению жизни привели к существенному переосмыслению дальнейших исследований Марса. Как уже говорилось, главным вопросом стал не поиск жизни, а сама возможность ее там существования. Если не в современную эпоху, то на ранней стадии развития планеты. На многие годы на первое место вышли геологические исследования. Лишь через десятилетия для поиска живых форм были разработаны новые системы жидкостной экстракции, примененные на американском посадочном аппарате «Phoenix» (2007) и на ровере «Curiosity» (2013). Но на «Phoenix» органику обнаружить не удалось, а на «Curiosity» система не работала. С помощью хромато-масс-спектрометра на «Curiosity» были обнаружены следы разрушенной космическими лучами органики [11]. Однако ее обнаружение в очень древнем образце, возраст которого оценивается в 4.21 млрд лет, не может ничего доказать, так как сложные органические соединения входят в состав метеоритов и даже образуются при метеоритных ударах.

Другая линия поиска внеземной жизни — исследование марсианских метеоритов. Марсианское происхождение некоторых метеоритов подтверждается многими фактами, например, недавними измерениями изотопов аргона на ровере «Curiosity». С конца 1990-х годов группа Д.Мак-Кея опубликовала ряд работ о находке в марсианском метеорите Алан Хиллз ALH84001 образований предположительно биологического происхождения [12]. Обнаруженные в этом метеорите структуры на Земле создаются бактериями, формирующими карбонатные отложения. Есть вероятность биологического происхождения похожих образований и в другом марсианском метеорите [13]. Однако в связи с глубокой и многократной переработкой метеоритного вещества и тем, что наблюдаемые структуры могли образоваться при геохимических процессах, принято считать эти работы гипотетическими.

Наконец, еще одна гипотеза о существовании ископаемой жизни на Марсе основана на снимках, сделанных «Curiosity». Были сфотографированы осадочные породы предположительно биологического происхождения, напоминающие строматолиты на Земле [14]. Возраст этих образований (со дна древнего озера) составляет около 3.7 млрд лет (рис.5).

Отметим, что после программы «Viking» прямой поиск жизни на Марсе не проводился и в будущих проектах пока не планируется. Примером современной программы, направленной на экзобиологию, может служить ровер миссии «ExoMars», запланированной на 2018 г. Он будет укомплектован буровым устройством, позволяющим достичь глубины 2 м и извлечь для анализа грунт, не переработанный космическими лучами. Но аналитическая лаборатория этого ровера оснащена достаточно консервативно. Она будет включать ИК-спектрометр-микроскоп, рентгеновский дифрактометр, рамановский спектро-

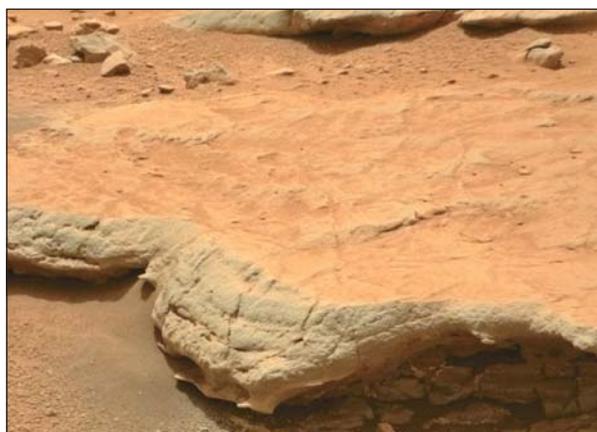


Рис.5 Возможные свидетельства ископаемой жизни на Марсе. Слева — структуры предположительно биологического происхождения, обнаруженные в метеорите ALH84001. Справа — гипотетическое отождествление микробных матов на поверхности Марса (по фотографии ровера «Curiosity»).

метр и хромато-масс-спектрометр пиролитических газов. В следующем марсианском проекте НАСА «Rover-2020» также не запланированы специализированные эксперименты для обнаружения жизни.

Очевидный приоритет следующего десятилетия — намеченная на 2025 г. многоэтапная миссия по доставке марсианского грунта для его детального анализа в лабораторных условиях Земли. Соберет и подготовит образцы для этой миссии «Rover-2020». К сожалению, несмотря на все совершенство лабораторных методов анализа, при доставке образцов на нашу планету всегда будет стоять вопрос об их загрязнении.

Метан на Марсе

На данный момент наиболее прямое свидетельство жизни на Марсе (причем не ископаемой, а современной) — открытие метана в его атмосфере.

В сильно окисленной атмосфере Марса трудно ожидать присутствия восстановленных соединений, таких как метан. Тем не менее он — наиболее распространенный в Солнечной системе углеводород, а в случае Марса — простейшее органическое соединение, ассоциирующееся с биологической активностью. Поиск органики на поверхности и в атмосфере Марса давно привлекал внимание ученых. В середине XX в. Г.А.Тихов опубликовал результаты серьезных исследований [15], а под Алма-Атой была создана специальная обсерватория. Начиная с 50-х годов прошлого столетия в спектре несколько раз ошибочно обнаруживалась полоса C—H (~3.3 мкм), спектрометры для детектирования этой полосы входили в состав всех ранних космических аппаратов, направлявшихся к Марсу. Первый реалистичный верхний предел содержания метана в атмосфере Красной планеты (<20 ppb*) был установлен инфракрасным спектрометром на космическом аппарате «Maginer 9».

Спектрометрические исследования и по сей день предоставляют единственную возможность дистанционного измерения метана, которое связано со значительными объективными трудностями. Астрономические наблюдения осложнены метаном, содержащимся в атмосфере Земли. Он маскирует полосы поглощения в излучении планет. Земной метан равномерно перемешан в атмосфере, и использование инструментов на большой высоте не дает заметного эффекта. Наблюдения необходимо проводить до и после противостояния, когда разность скоростей Земли и Марса наибольшая и доплеровский сдвиг позволяет детектировать линии в атмосфере другой планеты. Чувствительность внеатмосферных определений пока сильно ограничена разрешающей способно-

стью спектрометров, установленных на космических аппаратах.

Основное изучение метана проводилось с наземных телескопов, но, несомненно, появление на околомарсианской орбите «конкурента» в лице космического аппарата «Mars Express» со спектрометром PFS («Planetary Fourier Spectrometer») ускорило анализ астрономических наблюдений. В 2004 г. сразу три независимые группы заявили об обнаружении метана. Первая статья была опубликована В.А.Краснопольским с коллегами [16]. Количество газа в атмосфере составило около 10 ppb (10^{-5} объемных частей). Такое же содержание метана вначале определил и спектрометр PFS [17]. Еще одна астрономическая группа по данным 2003 г. зафиксировала выброс до 50 ppb метана [18].

Через два года астрономические наблюдения приблизились к предельному уровню обнаружения метана, а в 2010 г. были установлены только верхние пределы. В то же время PFS продолжал измерять газ, но для детектирования требуется усреднять десятки тысяч анализов. Наконец, в 2013 г. контактные измерения на ровере «Curiosity» также показали лишь верхний предел. Факт существования метана был поставлен под сомнение. Но уже в конце 2014 г. было объявлено об уверенном обнаружении газа на поверхности планеты [19]. Два измерения на «Curiosity» с двадцатикратным обогащением (из пробы был удален углекислый газ) позволили надежно определить фоновый метан в количестве около 0.7 ppb. Наряду с этим вновь были зарегистрированы выбросы газа с содержанием 8—10 ppb (рис.6). Несмотря на продолжающуюся полемику, сейчас присутствие метана в атмосфере Марса можно считать достоверно установленным.

Обнаружение метана инициировало огромное количество гипотез о его происхождении, источниках и стоках. Метан в атмосфере Марса медленно, в течение сотен лет, распадается под действием солнечного УФ-излучения. Для его поддержания в атмосфере необходим постоянно действующий источник. По оценкам, гипотетический вулканизм способен компенсировать не более нескольких процентов фотохимических потерь. В принципе метан может образоваться в результате неорганических реакций, но не ясно, есть ли для них необходимые условия. Рассматривалась возможность выхода в атмосферу ископаемого метана из залежей газогидратов, образовавшихся в результате магматических или биологических процессов на раннем этапе развития планеты. Эта гипотеза хорошо объясняет выбросы метана, но газогидраты на Марсе (за исключением полярных областей), скорее всего, нестабильны. Метеориты и кометы приносят на Марс органическое вещество. Его разложение под действием солнечного УФ-излучения может служить источником пополнения метана [20]. Однако этот механизм не объясняет выбросов газа.

* Одна часть на миллиард.

Впрочем, быстрое исчезновение метана — проблема всех предложенных гипотез. Его фотохимическое время жизни (~300 лет), хотя и невелико в геологическом масштабе, более чем достаточно для перемешивания газа глобальной атмосферной циркуляцией. Результаты астрономических наблюдений, измерений спектрометром PFS, а также данные атмосферных проб с поверхности Марса постоянно меняются. Пока эта изменчивость не нашла разумного объяснения в рамках известных процессов атмосферной физики и химии [21].

Наиболее вероятным механизмом «производства» метана можно признать биогенный процесс, т.е. наличие на поверхности Марса разреженных колоний микроорганизмов-метаногенов. Общее количество биомассы на планете, необходимое для поддержания фонового метана, очень мало. Оно не превышает 20 т, что при распределении в 100-метровом слое поверхности близко по земным меркам к критерию стерильности. Выбросы же газа могут происходить, если в какой-либо области создаются благоприятные условия для репликации клеток.

Значение открытия метана было так велико, что к 2010 г. со всей серьезностью встал вопрос о специальной орбитальной миссии, посвященной малым атмосферным составляющим. Таким проектом стал спутник TGO — первая часть миссии «ExoMars», реализуемой совместно Роскосмосом и ЕКА. Российский прибор ACS («Atmospheric Chemistry Suite») на борту «ExoMars» предназначен для измерения метана и других малых составляющих при наблюдении затмений Солнца атмосферой Марса и для анализа спектра поглощения (рис.7). Яркость источника позволит добиться очень высокого спектрального разрешения, т.е. высокой избирательности, а также снизить шум. Мы рассчитываем, что наш эксперимент не только прольет свет на загадку метана, но и продолжит мониторинг климата Марса, непрерывно ведущийся с 1997 г.

Вместо заключения

Поверхность Марса исключительно враждебна к существованию жизни: экстремальные температуры, ультрафиолетовое излучение, наличие активных окислителей. Но, как подтверждают исследования космических аппаратов последнего поколения, период раннего теплого Марса, который предположительно начался после прекращения катастрофической бом-

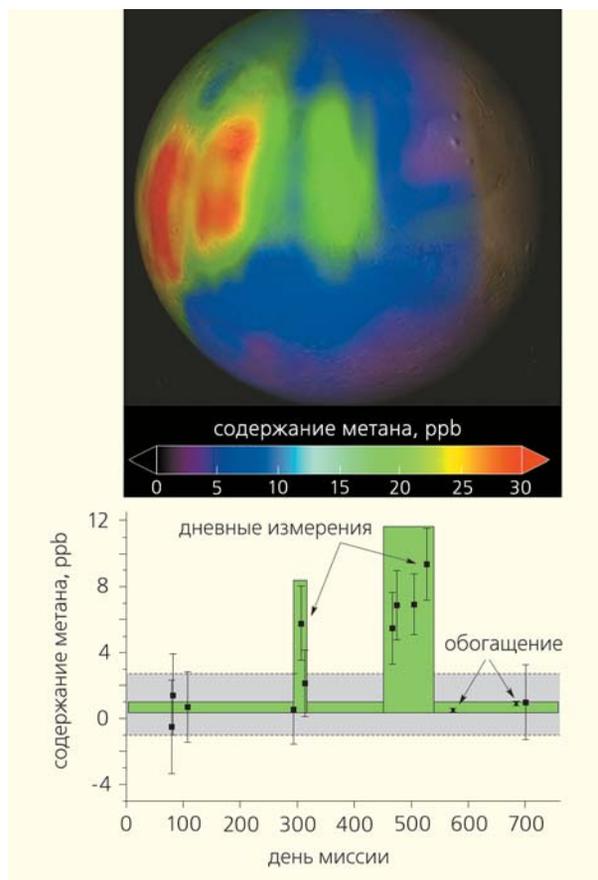


Рис.6 Детектирование метана на Марсе. Вверху — выброс 2003 г., по астрономическим данным [18]. Внизу — измерения с аппарата «Curiosity» [19].

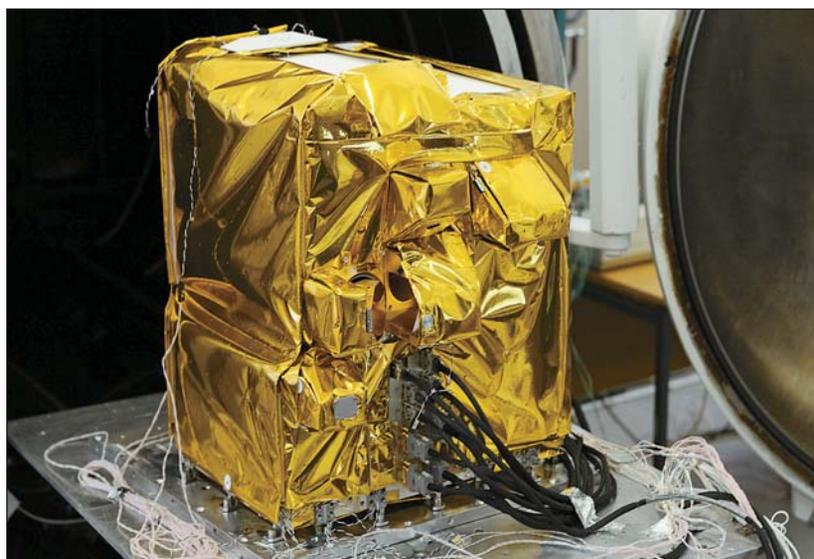


Рис.7. Российский прибор ACS («Atmospheric Chemistry Suite»), предназначенный для установки на спутник TGO совместного проекта ЕКА и Роскосмоса — «ExoMars» перед термовакуумными испытаниями в ИКИ РАН. Прибор состоит из трех спектрометров инфракрасного диапазона и служит для поиска малых атмосферных составляющих и мониторинга климата Марса.

бардировки и закончился другой, неизвестной катастрофой, инициировавшей угасание магнитного поля, потерю атмосферы и похолодание, мог продолжаться до 700—800 млн лет. За это время на планете могли возникнуть (или на нее могли занестись) живые организмы. Сохранилась ли жизнь до нашего времени в редких оазисах на поверхности или глубоко под ней? Обнаружить ее следы трудно, а доказать существование — еще труднее. Тем не менее дальнейшие исследования метана, его надежное обнаружение, развитие

гипотез его происхождения, измерение отношений изотопов углерода в нем, могут дать ключевые ответы.

С другой стороны, прекрасно сохранившаяся древняя кора Марса предлагает «заглянуть» в эпохи, следы которых давно стерлись на Земле. Данная параллель (наряду с экзобиологией) может стать генеральной проблемой дальнейших, более детальных исследований. В связи с этим очень важна успешная доставка марсианского грунта для лабораторных анализов на Земле. ■

Литература

1. Жарков В.Н., Мороз В.И. Почему Марс? // Природа. 2000. №6. С.58—67.
2. Мороз В.И., Кораблев О.И., Родин А.В. Новые исследования Марса и сравнительная планетология // Природа. 2005. №9. С.25—33.
3. Мороз В.И., Мухин Л.М. О ранних этапах эволюции атмосферы и климата планет земной группы // Космические исследования. 1978. Т.15. С.901.
4. Martin-Torres F.J., Zorzano M.-P., Valentin-Serrano P. et al. Transient liquid water and water activity at Gale crater on Mars // Nature Geoscience. 2015. V.8. P.357—361.
5. Golitsyn G.S., Ginsburg A.S. Comparative estimates of climatic consequences of Martian dust storms and of possible nuclear war // Tellus B. 1985. V.37. P.173—181.
6. Feldman W.C., Boynton W.V., Tokar R.L. et al. Global distribution of neutrons from Mars: Results from Mars Odyssey // Science. 2002. V.297. P.75—78.
7. Mitrofanov I., Anfimov D., Kozyrev A. et al. Maps of subsurface hydrogen from the High Energy Neutron Detector, Mars Odyssey // Science 2002. V.297. P.78—81.
8. Bibring J.-P., Langevin Y., Mustard J.F. et al. Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data // Science. 2006. V.312. P.400—404.
9. Ehlmann B.L., Mustard J.F., Murchie S.L. et al. Orbital identification of carbonate-bearing rocks on Mars // Science. 2008. V.322. P.1828.
10. Glavin D.P., Schubert M., Botta O. et al. Detecting pyrolysis products from bacteria on Mars // Earth and Planetary Science Letters. 2001. V.185. P.1—5.
11. Ming D.W., Archer P.D., Glavin D.P. et al. Volatile and organic compositions of sedimentary rocks in Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars // Science. 2014. V.343. P.386.
12. McKay D.S., Gibson E.K., Thomas-Keprta K.L. et al. Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001 // Science. 1996. V.273. P.924—930.
13. White L.M., Gibson E.K., Thomas-Keprta K.L. et al. Putative indigenous carbon-bearing alteration features in Martian meteorite Yamato 000593 // Astrobiology. 2014. V.14. P.170—181.
14. Noffke N. Ancient sedimentary structures in the < 3.7 Ga Gillespie Lake member, Mars, that compare in macroscopic morphology, spatial associations, and temporal succession with terrestrial microbialites // Astrobiology. 2015. V.15. P.169—192.
15. Тухов Г.А. Астробиология. М., 1953.
16. Krasnopolsky V.A., Maillard J.P., Owen T.C. Detection of methane in the Martian atmosphere: Evidence for life? // Icarus. 2004. V.172. P.537—547.
17. Formisano V., Atreya S., Encrenaz T. et al. Detection of methane in the atmosphere of Mars // Science. 2004. V.306. P.1758—1761.
18. Mumma M.J., Villanueva G.L., Novak R.E. et al. Strong release of methane on Mars in Northern Summer 2003 // Science. 2009. V.323. P.1041—1045.
19. Webster C.R., Mabaffy P.R., Atreya S.K. et al. Mars methane detection and variability at Gale crater // Science. 2015. V.347. P.415—417.
20. Keppler F., Vigano I., McLeod A. et al. Ultraviolet-radiation-induced methane emissions from meteorites and the Martian atmosphere // Nature. 2012. V.486. P.93—96.
21. Lefèvre F., Forget F. Observed variations of methane on Mars unexplained by known atmospheric chemistry and physics // Nature. 2009. V.460. P.720—723.

Нефтяные загрязнения морской поверхности: взгляд из космоса

О.Ю.Лаврова, М.И.Митягина

Огромные размеры Мирового океана и его постоянная изменчивость затрудняют изучение происходящих там процессов традиционными контактными методами. Сегодня такие исследования невозможно представить без использования информации, полученной с помощью приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, предназначенных для дистанционного зондирования Земли.

Развитие методов спутникового зондирования суши и океана и их применения для фундаментальных исследований и решения широкого круга научных и прикладных задач — одно из важнейших направлений, успешно развивающихся в ИКИ РАН. В 1974 г. эти работы возглавил профессор В.С.Эткин, один из пионеров изучения Мирового океана микроволновыми методами. Его усилия во многом определили высокий уровень дистанционных исследований океана в нашей стране. Сегодня научное направление, начатое Эткиным, продолжает развиваться в лаборатории аэрокосмической радиолокации нашего института, образованной в 2002 г. [1]. За годы ее существования накоплен уникальный опыт работы с разнообразной спутниковой информацией о состоянии морей



Ольга Юрьевна Лаврова, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая лабораторией аэрокосмической радиолокации ИКИ РАН. Специалист в области дистанционного зондирования поверхности океана из космоса, исследования процессов и явлений в океане и атмосфере над ним, мониторинга антропогенных загрязнений.



Марина Ивановна Митягина, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник той же лаборатории. Научная деятельность направлена на развитие физических основ микроволнового зондирования поверхности океана с использованием космических систем.

и океанов и развит комплексный (многосенсорный и междисциплинарный) подход к исследованию Мирового океана на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса [2].

Спутниковый экологический мониторинг

В настоящее время один из основных методов изучения океанических и атмосферных процессов — спутниковое радиолокационное зондирование поверхности океана. Его радиолокационные изображения несут информацию о разнообразных явлениях, происходящих как непосредственно в приповерхностном слое, так и в глубине океана. Разумеется, электромагнитные волны СВЧ-диапазона проникают в воду не более чем на несколько миллиметров, и протекающие в океане процессы заметны только благодаря своим поверхностным проявлениям. Возбуждаемая приповерхностным вет-

© Лаврова О.Ю., Митягина М.И., 2015

ром рябь отображает как атмосферные, так и внутрокеанические процессы, которые тем или иным способом модулируют короткие гравитационно-капиллярные волны на поверхности океана, проявляющиеся в модуляциях радиолокационного сигнала. Таким образом, такие изображения поверхности океана отображают движения как в самом океане, так и в атмосфере. Это своего рода природная камера Вильсона, позволяющая наблюдать эффекты, скрытые от глаз. Волны СВЧ-диапазона, в отличие от других электромагнитных волн, проникают через облачный покров, обеспечивая постоянное наблюдение океана.

Нефтяные пятна и поверхностно-активные вещества (ПАВ) органического происхождения меняют поверхностное натяжение, «выглаживая» тем самым поверхностную рябь и уменьшая сечение рассеяния. В этом случае на поверхности океана образуются области пониженного рассеяния (слики), которые могут служить индикаторами загрязнения поверхности. Автоматическое распознавание нефтяных пятен на радиолокационных снимках — задача непростая, поскольку такие пятна, особенно при слабом ветре, почти не отличаются от проявлений других объектов. Их принято называть «подобия пятен»: это органические пленки, некоторые типы льда («сало») и затененные сушией области, дождевые ячейки, зоны апвеллинга.

Радиолокационные изображения нефтяных разливов, естественно, зависят от внешних условий. Контраст между областью разлива и окружающей поверхностью определяется скоростью ветра, высотой волн, количеством и типом разлитой нефти. Форма разлива будет отличаться при выбросе нефти из стационарного и движущегося объекта, а также для разного количества нефти, различной динамики ветра и разного течения между моментами разлива. Для надежной интерпретации изображений морской поверхности, полученных со спутниковых радиолокаторов, в лаборатории разрабатываются методики анализа всей совокупности информации; она включает данные приборов дистанционной диагностики с различных спутников. Ключевой момент составляет возможность комплексного использования данных, различных по своей физической природе (активного и пассивного микроволнового зондирования, много- и гиперспектральных оптических и ИК-данных), по пространственному разрешению и размерности.

В спутниковый экологический мониторинг морской поверхности входит не только выявление нефтяных и других антропогенных загрязнений, но и прогноз их распространения. Он может строиться только на детальном знании всей совокупности гидродинамических процессов, характерных для района мониторинга, так как загрязнения, попадая в морскую среду, развиваются вместе с ней под воздействием метеорологических и гидрологических факторов [3]. Один из важнейших элементов динамики вод, ответственных за

интенсивное перемешивание и распространение загрязнений, — субмезомасштабные вихри, фронты, струи и внутренние волны. На основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения в нашем институте изучаются основные механизмы генерации вихревых структур разных масштабов и определяются районы их пространственной локализации в Черном, Каспийском и Балтийском морях. Разработанный в лаборатории метод реконструкции реальных полей поверхностных течений позволяет выявлять мезо- и мелкомасштабные структуры (вихри, диполи и мультиполи, струи, филаменты), а также оценивать влияния динамических структур в прибрежной зоне моря на распределение основных параметров загрязнения морской среды [2, 5, 6].

Совокупность накопленных экспериментальных фактов и теоретических моделей легла в основу развиваемой в настоящее время в ИКИ РАН технологии экологического мониторинга состояния морской поверхности. Используемые алгоритмы и методики тематической обработки спутниковых данных, в первую очередь спутниковой радиолокации морской поверхности, дают возможность находить различные антропогенные загрязнения с большой степенью точности и определять зоны экологического риска.

Катастрофические разливы нефти

Случаи разливов нефти, связанные в первую очередь с авариями на морских нефтяных платформах или с крушением танкеров, к счастью, происходят редко, но часто приводят к серьезным экологическим катастрофам. По данным международной организации «The International Tanker Owners Pollution Federation Limited» (ИТОПФ), более 700 т нефти и нефтепродуктов за один инцидент попадают в море из-за пробоин корпуса, пожаров, посадки на мель и столкновений танкеров. Так, с 1970 по 2014 г. в результате аварий танкеров вылилось примерно 5,74 млн т нефти*. Хорошо, что таких чрезвычайных ситуаций становится с каждым годом все меньше и меньше.

По данным, накопленным ИТОПФ, большая часть аварий приходится на 70-е годы прошлого столетия, их доля в общем количестве крупных разливов нефти (более 7 т) составила 58%. В последние годы, в связи с вводом в эксплуатацию современных и более надежных танкеров, количество аварий резко сократилось. Однако практически все катастрофические разливы нефти случались в непосредственной близости от берега, что неминуемо вело к серьезному загрязнению береговой черты. Ущерб от этих катастроф мог быть еще большим, если бы не удалось отслеживать пе-

* <http://www.itopf.com/information-services/data-and-statistics/statistics/>

ренос нефтяных пятен в море и прогнозировать место и время их выброса на побережье. Наиболее эффективное средство для наблюдения распространения нефтяного загрязнения — спутниковый мониторинг с помощью радиолокаторов.

По инициативе канадского космического агентства (CSA) 20 октября 2000 г. европейское и французское космические агентства подписали хартию «Космос и крупные бедствия» (The International Charter «Space and Major Disasters») для обеспечения широкого доступа к космической мониторинговой информации в ходе мероприятий по ликвидации последствий всех возможных природных и техногенных катастроф. Каждый член Хартии включает свои спутниковые данные в общее пользование во время чрезвычайных ситуаций. Российская Федерация в лице Роскосмоса присоединилась к Хартии только в 2013 г. и в случаях необходимости предоставляла (например, при наводнении на Амуре) мировой обществу данные с космических аппаратов «Ресурс-П», «Метеор-М» и «Канопус-В».

Одна из важнейших задач спутниковой океанологии — определение масштаба бедствия и прогнозирование последствий в случае природных и антропогенных катастроф. Сотрудники нашей лаборатории активно участвовали в мониторингах, проводимых при катастрофических разливах нефтепродуктов: в Керченском проливе (авария танкера «Волгонепфть-139» 11 ноября 2007 г.); в Мексиканском (разрушение нефтяной платформы «Deerwater Horizon» 20 апреля 2010 г.) и Гвинейском заливах (авария на морской нефтяной платформе «Bonga» 21 декабря 2011 г.).

Катастрофические разливы нефти происходят не только в результате аварий танкеров. Так, в историю техногенных катастроф на морских платформах в Мировом океане вошло гигантское по масштабу нефтяное загрязнение в 2010 г. Это случилось в результате утечки нефти из скважины «Макондо», которая произошла вследствие разрушения нефтяной платформы «Deerwater Horizon», управляемой компанией «British Petroleum» (BP). Платформа находилась в северной части Мексиканского залива, на расстоянии менее 100 км от дельты р. Миссисипи. Масштабность аварии и разлива нефти усугублялась непрерывным фонтанированием скважины (с расходом порядка 800 т нефти в сутки), расположенной на глубине 1.5 км, в течение трех месяцев.

Практически сразу после катастрофы руководство Геологической службы США от имени береговой охраны США обратилось в международную хартию «Космос и крупные бедствия» с просьбой о космическом мониторинге района бедствия всеми возможными средствами. Начиная с 22 апреля практически все космические сенсоры были переориентированы на съемку Мексиканского залива. В оперативном режиме производилась съемка, обработка и анализ данных следующих senso-

ров: «MODIS Aqua/Terra», «ASAR», «MERIS Envisat», «Radarsat S», «TerraSAR-X».

С первого же дня катастрофы ученые из ИКИ РАН совместно с коллегами из Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН (Москва) и Морского гидрофизического института (Севастополь) начали работу по комплексному анализу мультисенсорных спутниковых и метеорологических данных района аварии в Мексиканском заливе. На основе всех доступных спутниковых данных оценивали площадь пятна и его распространение, изучали метеобстановку и гидродинамическую ситуацию в районе катастрофы, прогнозировали распространение загрязнения. Все имеющиеся в нашем распоряжении спутниковые изображения в оперативном режиме выставлялись на специальном сайте, созданном в нашей лаборатории*.

В первую неделю после катастрофы пятно постоянно увеличивалось в размерах, но сохраняло компактность и четкие границы. В дальнейшем, 29 апреля, пятно, видимо, попало в циклонический вихрь, сильно изменило форму, а площадь поверхностных загрязнений составила 2400 км². От него стали отходить шлейфы нефтяных загрязнений до 75 км в длину, впервые с момента аварии они достигли берега в районе дельты Миссисипи. Затем нефтяное пятно, постоянно пополнявшееся за счет утечки нефти со дна моря, изменялось под действием слабых течений и ветра (рис.1). 17 мая спутниковые изображения показали, что общая площадь загрязнения морской поверхности возросла с 11 до 16 тыс. км² за счет гигантской нефтяной струи, шириной от 40 км у основания до 10 км

* http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_mexico.htm

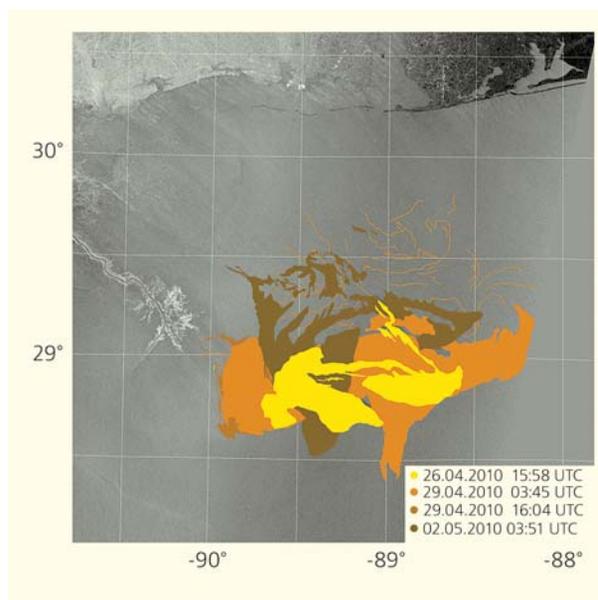


Рис.1. Композиция четырех радиолокационных снимков «ASAR Envisat», показывающая распространение нефтяного пятна с 26 апреля по 2 мая 2010 г. [2].

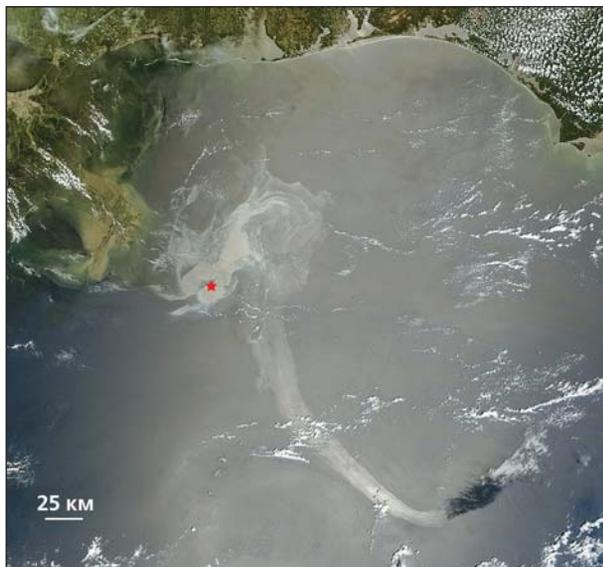


Рис.2. Спутниковое изображение нефтяного загрязнения с образовавшейся струей по данным «MODIS-Terra» от 17 мая 2010 г. 16:40 UTC. Снимок получен в зоне солнечного блика. Звездочкой отмечено место аварии [4].

MODIS Rapid Response Team

на ее конце и длиной до 300 км,двигающейся по дуге из района утечки нефти в юго-восточном направлении (рис.2). Площадь самой струи составила примерно 4700 км².

Мы доказали, что струя образовалась не в результате ветрового воздействия, поскольку ветер

15–17 мая был прямо противоположным по направлению — юго-юго-восточным. Модельные расчеты американских специалистов, учитывающие только влияние ветра и волнения, не предсказывали появления подобной струи. Наш анализ данных о поле температуры поверхности океана показал, что нефтяное пятно частично попало в зону действия гигантского дипольного вихря общим поперечным размером 300 км, направленного на запад. Часть пятна была захвачена передним фронтом диполя и вовлечена в движение циклоническим вихрем диполя, чем и объясняется наблюдаемая траектория движения струи. На основе анализа спутниковых данных мы смогли не только объяснить причины образования струи, но и сделать прогноз ее распространения. Наши расчеты показали, что «нефтяная струя» (нужны ли кавычки?) не вынесет загрязнения к западным берегам Флориды или в Гольфстрим, а будет захвачена циклоническим вихрем, распадется на отдельные фрагменты и диссипирует. В дальнейшем этот прогноз полностью оправдался [4].

Антропогенные загрязнения прибрежных акваторий

Источниками нефтяных и других антропогенных загрязнений могут быть не только аварии с танкерами или взрывы на нефтяных платформах. Как показал наш 12-летний опыт спутникового мониторинга акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей, сильное нефтяное загрязнение возникает в результате широкого освоения запасов нефти и газа на морском шельфе: строительством морских стационарных платформ, береговых терминалов, хранилищ углеводородов, прокладкой подводных трубопроводов, сейсмическими и буровыми работами, а главным образом ростом судоходства. По данным спутниковой радиолокации за 2004–2012 гг., для каждого из перечисленных морей были составлены карты нефтяного загрязнения, определены межгодовая и сезонная изменчивость его совокупной площади, пространственное распределение и изменчивость загрязнений для различных акваторий [7, 8].

В Балтийском море ситуация, связанная с антропогенными загрязнениями, в последние годы значительно улучшилась, поскольку усилился контроль за экологическим состоянием вод (рис.3). Интересно сравнить ко-

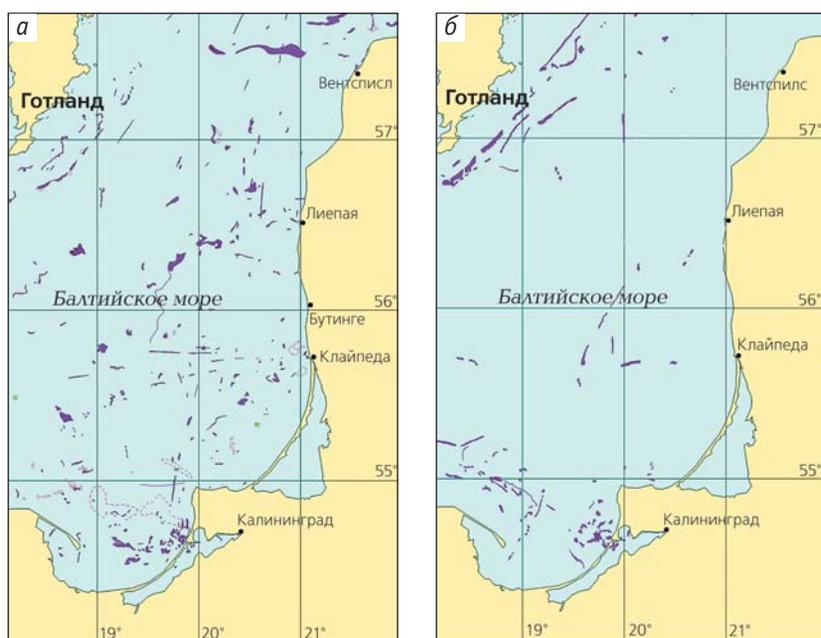


Рис.3. Сводные карты нефтяных пятен в юго-восточной части Балтийского моря, обнаруженных в результате анализа данных спутниковой радиолокации с июля 2004 г. по ноябрь 2005 г. (а) и с января 2009 г. по март 2012 г. (б).

личество и местоположение судовых загрязнений, выявленных за 18 мес мониторинга в 2004—2005 гг. (рис.3,а) и в 2009—2012 гг. (рис.3,б). Основные источники загрязнений остаются прежними: несанкционированный сброс нефтепродуктов с судов и вынос загрязненных вод реками и из Калининградского обводного канала. Сброс с судов традиционно осуществляется на якорной стоянке в районе г.Балтийска, на основных судоходных трассах вдоль о.Готланда, севернее Гданьского залива и на подходах к крупным портам (Клайпеде, Лиенае, Вентспилсу и Гданьску). Однако если в 2004—2005 гг. на поверхности юго-восточной части Балтийского моря было выявлено 274 отдельных пятна нефтепродуктов, то в 2009—2012 гг. обнаружили всего 122 пятна.

В Черном и особенно Каспийском море нет такого активного судоходства, но нет и строгого контроля над незаконными сбросами с судов вод, загрязненных нефтепродуктами. Результаты круглогодичного спутникового мониторинга акватории Черного моря позволили сделать следующие заключения. Как и следовало ожидать, сбросы с судов концентрируются вдоль основных судоходных трасс: Стамбул—Новороссийск, Стамбул—Одесса и Стамбул—Туапсе. Кроме того, большое количество сбросов происходит вблизи крупных портов Болгарии, Турции, Румынии и Украины, а также там, где функционируют нефтеналивные терминалы. В российской части Черного моря по-прежнему сильнее загрязняется акватория в районе порта Новороссийск и черноморского предпроливья Керченского пролива. К сожалению, география обнаруженных загрязнений не ограничивается отмеченными выше зонами повышенной концентрации, а охватывает практически всю акваторию моря (рис.4).

Перед исследователями, занимающимися спутниковым мониторингом загрязнений морской поверхности, стоит еще много важных задач. Помимо нефтяных загрязнений в воду сбрасываются, в частности, сточные воды с очистных сооружений приморских городов. Давно вызывает серьезное беспокойство система очистки сточных вод и трубопровод глубоководного выпуска в районе г.Геленджика. К сожалению, в этом крупнейшем в России после Сочи рекреационном центре на кавказском берегу Черного моря городские очистные коммуникации не рассчитаны на все возрастающий наплыв туристов. Сточные воды с городских очистных сооружений должны уходить в мо-

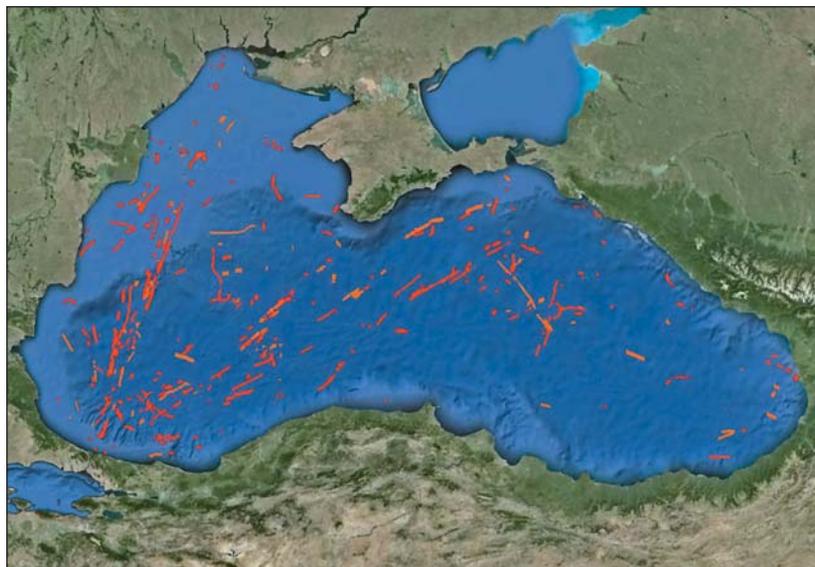


Рис.4. Обобщенная карта-схема нефтяных загрязнений поверхности Черного моря, составленная на основе анализа данных спутниковой радиолокации за 2009—2011 гг.

ре по глубоководному выпуску, оголовок которого расположен в районе Толстого мыса, южнее Геленджикской бухты (на расстоянии 2095 м от берега на глубине около 30 м). Однако уже много лет из-за серьезных повреждений выпуска часть очищенных сточных вод сбрасывается в прибрежной полосе (рис.5).

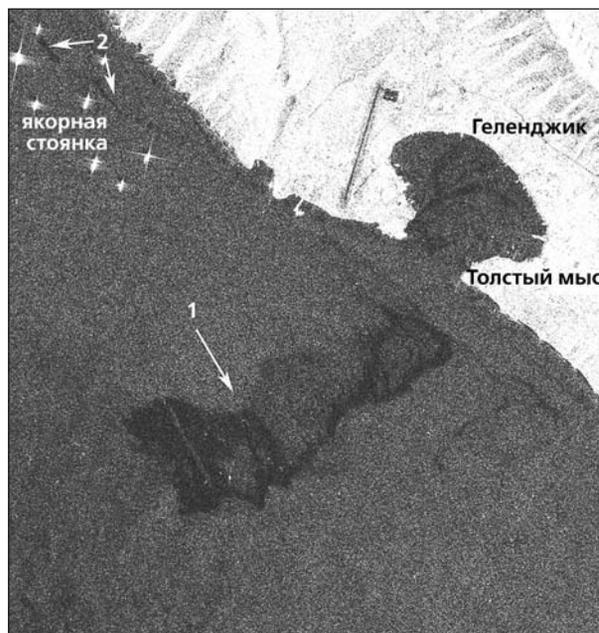


Рис.5. Утечка сточных вод из глубоководного выпуска у Толстого мыса (1) и сброс технологических вод с судов, находящихся на якорной стоянке Дооб (2). Фрагмент изображения «ASAR Envisat», полученного 29 сентября 2010 г. [2].

Естественные выходы углеводородов

По данным спутникового мониторинга, картина загрязнения Каспийского моря нефтесодержащими пленками существенно отличается от таковой в Черном и Балтийском морях. Во многом это связано с природными особенностями Каспийского моря, в недрах которого имеются большие запасы нефти и газа.

На открытые участки Каспийского моря (в центральной его части и в области Апшеронского и Бакинского архипелагов) нефть попадает при добыче и бурении, подводном ремонте скважин, при аварийных разрывах нефтепроводов и зачистке выкидных линий. Кроме того, существенен выход нефти на поверхность моря из естественных и особенно искусственных грифонов, во время действия которых ее количество может колебаться от 100 до 500 т/сут. На всех без исключения радиолокационных изображениях, полученных нами в ходе мониторинга в районах нефтедобычи, идентифицируются ее пятна, причем их следы выявляются зачастую на площади более 800 км² вокруг морских буровых платформ (рис.6). На северо-западном борту Южно-Каспийской впадины сконцентрировано наибольшее количество подводных вулканов, притом крупных. Большинство их находится в грифоновой стадии развития и выделяет илистую грязь, воду, газ и нефть. Активизация подводных вулканов и грифонов в местах разгрузки углеводородов приводит к появлению на воде грязевых и нефтяных пятен (рис.7).

Проявления естественных выходов углеводородов на поверхность видны и на радиолокационных изображениях восточной части Черного моря. Глубоководные сипы в грузинских водах — это уникальный для Черного моря тип струйных выделений, в которых метан сосуществует одновременно в свободной форме и в виде газогидратов. Отличительной чертой таких сипов служит присутствие следов нефти в донных газогидратах. На поверхности моря в районах обнаружения этих сипов были замечены нефтяные пятна природного происхождения, которые разносятся по поверхности моря в соответствии с ветровой ситуацией и гидродинамическими процессами (раскручивание поверхностной пленки под действием вихря) (рис.8). Такие пленочные загрязнения наблюдаются практически на всех радиолокационных изображениях этой акватории Черного моря.

* * *

Рост объемов нефти, перевозимых морским путем, а также ввод в эксплуатацию все новых нефтяных платформ на морском шельфе в непосредственной близости от берега делает задачу регулярного контроля состояния морской поверхности все более актуальной. Единственный эффективный метод такого контроля — мониторинг акватории

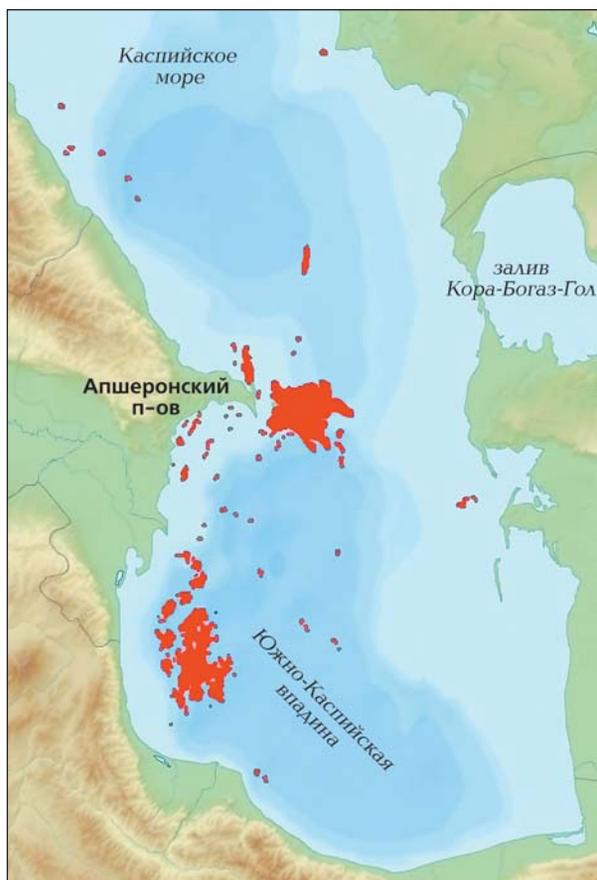


Рис.6. Сводная карта нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря, обнаруженных в результате анализа данных спутниковой радиолокации за 2009—2011 гг. [8].

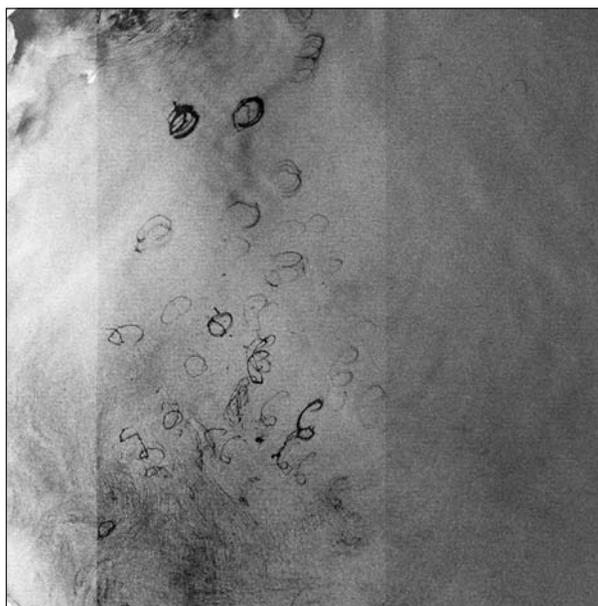


Рис.7. Грязевулканические проявления в южном Каспии. Фрагмент радиолокационного изображения «ASAR Envisat», полученного 19 июня 2011 г.

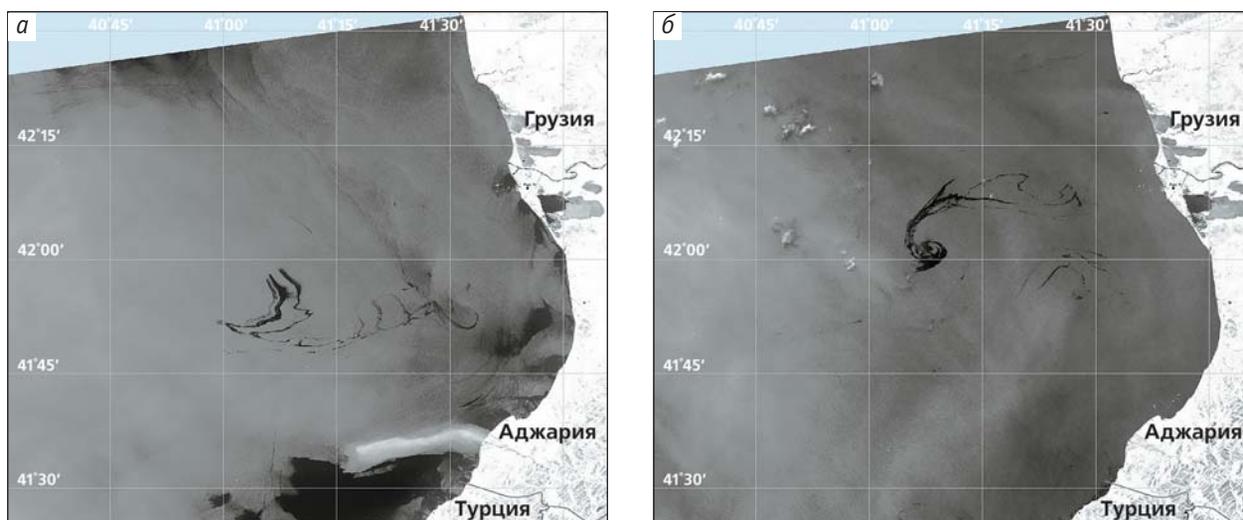


Рис.8. Примеры проявлений сликовых структур в районе метановых сипов над акваторией континентального склона рядом с г.Поти (Грузия). Фрагменты радиолокационных изображений «Sentinel-1» от 08 ноября 2014 г. (а) и 15 октября 2014 г. (б).

морей из космоса. Мы постарались коротко описать наш практический опыт проведения комплексного спутникового мониторинга нефтяного загрязнения различных морей. Мы проанализировали типичные ситуации, возникающие при наблюдении из космоса областей морской поверхности, покрытых пленками, в том числе нефтяными. Важно подчеркнуть, что остро назрела необходимость внедрения систем оперативного спутникового контроля загрязнения акваторий. Они позво-

лят устанавливать источники загрязнения, производить количественную оценку объемов загрязнений и прогнозировать их распространение. После принятия соответствующих законодательных актов, результаты космических измерений могут быть признаны в качестве доказательств экологической экспертизы. Особое значение имеет степень достоверности интерпретации спутниковых данных для извлечения информации об антропогенном загрязнении морской поверхности. ■

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-17-00555).

Литература

1. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю. и др. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи физических наук. 2003. Т.173. №1. С.69–87.
2. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: 2011.
3. Бедрицкий А.И., Асмус В.В., Кровотынцев В.А. и др. Космический мониторинг загрязнения российского сектора Азово-Черноморского бассейна в 2008 году // Метеорология и гидрология. 2009. №3. С.5–19.
4. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г. Катастрофический разлив нефти в Мексиканском заливе в апреле-мае 2010 года // Исследование Земли из космоса. 2010. №6. С.67–72.
5. Lavrova O., Mityagina M., Vocharova T., Gade M. Multi-Sensor Observation of Meso-Scale Features in European Coastal Waters // Remote Sensing of the European Seas. Eds. V.Barale and M.Gade. Springer Netherlands, 2008. P.463–474.
6. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. №5. С.72–79.
7. Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2012. №3. С.48–65.
8. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Многолетний комплексный спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений поверхности Балтийского и Каспийского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №5. С.269–288.

Рецензии Профессор Джованни Биньями и его новая книга

Предлагаемая вниманию читателя рецензия не совсем обычна для нашего журнала — она рассказывает о книге, которая существует пока лишь на английском языке. Мы говорим «пока», потому что очень рассчитываем, что книга «Imminent Science» будет переведена и издана у нас. И этой публикацией хотим, с одной стороны, привлечь внимание к ней, а с другой — обратиться к нашим читателям с предложением: если вам попадет в руки зарубежное научное издание, заслуживающее перевода, — присылайте нам рецензию, доказывающую полезность русскоязычного варианта. Будем надеяться, что это поможет в его продвижении к нам.

Первая такая книга была выбрана неслучайно: футурологический взгляд на развитие науки и техники всегда был интересен очень широкому кругу. Достаточно вспомнить давний успех прогностических «Черт будущего» Артура Кларка. Востребована подобная литература и сейчас: несколько лет назад у нас были опубликованы переводы книг американского физика-теоретика Митио Каку «Физика невозможного» и «Физика будущего». Свой взгляд на развитие науки теперь предлагает профессор Джованни Фабрицио Биньями (Giovanni Fabrizio Bignami, р.1944 г.) — одна из ключевых фигур международного сотрудничества в области изучения космоса и одновременно страстный популяризатор науки. Отдавая должное профессиональным заслугам этого итальянского физика и астрофизика (в 1988–1997 гг. — научного руководителя проекта «ХММ-Newton» Европейского космического агентства, в 2007–2008 гг. — президента Космического агентства Италии, а с 2011 г. — президента Национального института астрофизики Италии), хочется особо отметить его твердость в защите идеи науки без границ.

Как президент Международного комитета по исследованию космического пространства (Committee on Space Research, КОСПАР) он открывал 40-ю Научную ассамблею КОСПАР в Москве в августе прошлого года. Непростая политическая обстановка поставила московскую встречу под угрозу. Биньями сделал все возможное, чтобы это событие, которое давно считается одним из ключевых космических форумов, не стало жертвой политической конъюнктуры. В День космонавтики, 12 апреля 2014 г., он встречался с В.В.Путиным и обсуждал вопрос проведения ассамблеи. В своих заявлениях профессор подчеркивал, что наука была и есть выше поли-



Торжественная церемония открытия 40-й Научной ассамблеи КОСПАР в Главном здании Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова 4 августа 2014 г. Профессор Джованни Биньями, президент КОСПАР в 2010–2014 гг., приветствует участников.

Фото Вячеслава Давыдова

тики: сам КОСПАР, созданный в 1958 г., задумывался как мост, соединяющий ученых из разных государств и политических систем. В итоге на московскую конференцию, проведенную на базе Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова, собрались более 2500 ученых — экспертов в изучении космоса из более чем 60 стран мира, что сделало ее одной из самых представительных в череде этих биеннале.

Наряду с научной и организационной деятельностью Биньями много сил и времени отдает пропаганде научных знаний, выступая в средствах массовой информации, публикуя книги. В своей последней книге «Наука грядущего» он пытается заглянуть вперед на 50 лет и представить, что к этому времени будет известно человечеству, как это повлияет на судьбу цивилизации. По мнению ученого, человек, которому суждено первым ступить на поверхность Марса, уже родился!

Рецензию на столь неординарное издание, которую мы предлагаем вашему вниманию, написал авторитетный отечественный специалист, обладающий широким кругозором и огромной эрудицией.

академик М.Я.Маров

Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского
Москва

Книга известного итальянского ученого, президента КОСПАР в период 2010—2014 гг. Джованни Биньями привлекает к себе внимание уже самим своим названием, особенно когда задумываешься, как адекватно перевести заголовок на русский язык. Дело в том, что английское слово *imminent* может быть истолковано не только как «грядущее» или «надвигающееся», но и как «неизбежное», «неотвратимое» и даже «грозящее». Автор, конечно, не случайно выбрал такое понятие в своих размышлениях о будущем науки, хорошо осознавая: научный прогресс неизбежно чреват многими новыми, зачастую непредсказуемыми, опасностями на пути прогресса цивилизации. В качестве ставшего хрестоматийным примера он напоминает о том, что менее десятилетия отделяло успехи в изучении энергии атома от трагедии Хиросимы и Нагасаки. Содержание и дальнейшее знакомство с книгой убеждает в справедливости таких ощущений, очевидно, отвечающих замыслу автора.

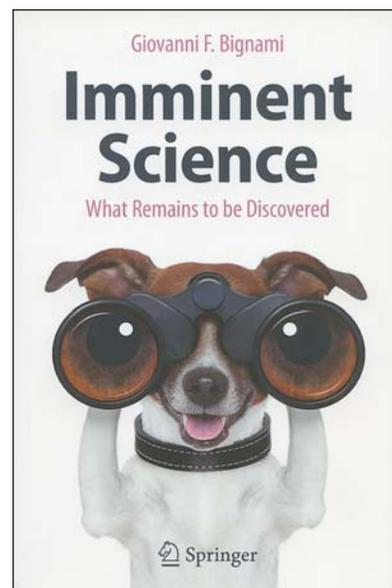
Несомненное достоинство книги, сочетающей обсуждение самых актуальных естественнонаучных проблем с их философским осмыслением, — лаконичность изложения, выделение самого главного простым языком, доступным для неспециалистов, что способствует привлечению широкой читательской аудитории. Содержание 10 глав охватывает широкие горизонты современного знания об окружающем мире — от астрофизики, занимающейся строением, энергетикой и эволюцией Вселенной, до биологии, включая генетику, медицину и физиологию.

© Маров М.Я., 2015

Своего рода связующим звеном служит остающаяся дискуссионной проблема обнаружения жизни за пределами Земли, в том числе ее высокоразвитой организации. С осторожностью, присущей профессиональным исследователям, автор касается перспектив открытий ближайших десятилетий, все более глубокого проникновения в тайны природы и их воздействия на жизнь человечества и судьбу цивилизации.

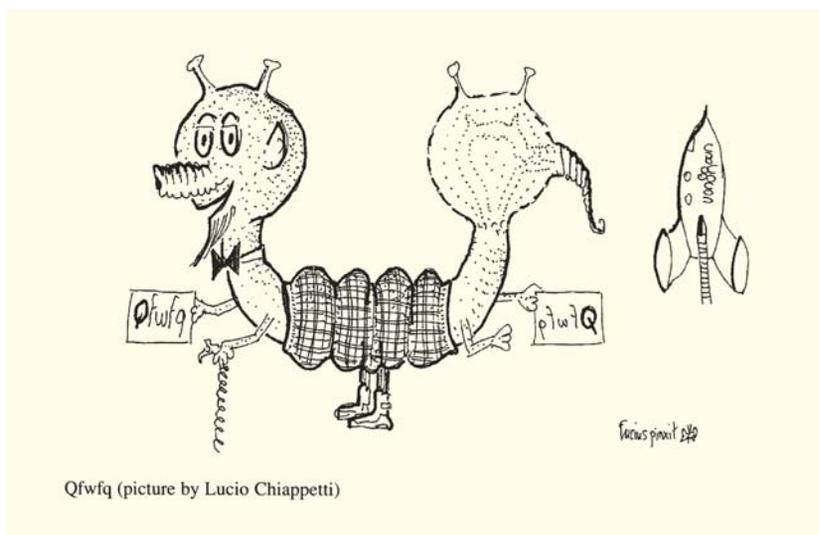
В прологе в нестандартной форме образного общения автора с виртуальным инопланетянином ставятся философские вопросы, представляющие общенаучный интерес, начиная с Большого взрыва, Стандартной теории (строения материи) и существования антивещества вплоть до генетики, дарвинизма и даже смысла жизни. На самом деле круг вопросов, которые следовало бы задать представителю существенно более продвинутой по сравнению с нами цивилизации несравненно шире, и он нетривиален — об их перечне задумывался еще в прошлом столетии известный астрофизик Карл Саган. Действительно, о чем бы мы спросили представителя другого мира, ушедшего в своем развитии на тысячелетия вперед? Конечно, это были бы не только вопросы об окружающем мире, еще неизвестных нам природных закономерностях, но и главным образом о проблемах социально-экономического характера, о том, сколь долго может существовать технологически развитая цивилизация, соблюдение каких критериев позволяет ей избежать самоуничтожения.

Такой стиль изложения в контексте своего рода телепатического общения с иноплане-



Giovanni F. Bignami.
IMMINENT SCIENCE.
What remains to be discovered.

Springer, 2014.



Qfwfq (picture by Lucio Chiappetti)

Иллюстрация из книги.

тянином сохраняется на протяжении последующих глав книги, что существенно оживляет изложение затрагиваемых научных проблем. Говоря о том, чего мы уже достигли в своем развитии, и одновременно отдавая дань выдающимся ученым, изобретателям и первопроходцам, автор не скрывает своего восхищения гениальными прорывами, изме-

нившими нашу повседневную жизнь, сделавшими обыденными глобальные коммуникации, приблизившими к нам еще совсем недавно далекий и такой таинственный космос. Среди этих открытий он выделяет 10 главных: общую теорию относительности, строение ядра, создание телевидения, лазера, открытие пенициллина, определение



Биньями и участники круглого стола «Исследования экзопланет и будущее космических двигателей. Наука или фантастика?». 40-я Научная ассамблея КОСПАР, 4 августа 2014 г.

Фото В.Давыдова

структуры ДНК, генома, построение компьютера и Всемирной паутины и открытие внесолнечных планет. Он говорит о поистине грандиозных масштабах, в пределах которых мы существуем, охватывающих свыше шестидесяти порядков величины, — от планковской длины (10^{-33} см) до наблюдаемых границ Вселенной (13.7 млрд св. лет, или примерно 10^{28} см), об удивительной упорядоченности в структуре материи и окружающего мира и организации живой природы, основанной на поистине уникальном элементе — углероде — и его производных в виде полимерных цепочек — сложнейших молекул.

К сожалению, перечисляя величайшие умы, обеспечившие эти замечательные достижения за несколько столетий, автор вспоминает только представителей западной культуры, оставляя в стороне неоценимый вклад выдающихся российских ученых, философов и изобретателей. Это, в частности, касается и становления космических исследований, в котором отмечается большой вклад Вернера фон Брауна, но никак не упоминается основополагающая роль Сергея Павловича Королева. Вместе с тем автор объективно выстраивает основную цепочку выхода человека за ограниченные пределы собственной планеты (первый спутник — Юрий Гагарин — Нейл Армстронг), прослеживая ее дальнейший ход к пилотируемому полету на Марс, к освоению ресурсов астероидов. Он отдает должное автоматическим космическим аппаратам, сделавшим доступными другие миры, и крупным успехам внеатмосферной астрономии, позволившей нам понять разнообразие и грандиозность процессов и энергетических преобразований во Вселенной и одновременно ограниченность наших знаний о формах материи и энергии. Биньями обсуждает вопрос об эволюции планет Солнечной системы, делая упор на возможность клима-

тических изменений на Земле вследствие воздействия антропогенных факторов — роста потребления энергии и содержания в атмосфере парниковых газов. Под этим углом зрения рассматривается перспектива использования термоядерной энергии и других экологически чистых источников, вплоть до внутреннего тепла собственной планеты; приводятся простые, но весьма значимые оценки.

Потребление энергии, материальных ресурсов, их неблагоприятное влияние на состояние экологической обстановки оказывают самое непосредственное влияние на нашу жизнь и здоровье людей. Успехи генетики и практической медицины позволили в определенной степени компенсировать эти издержки, чему в книге посвящена отдельная глава. Признавая успехи генной инженерии, автор осознает и подстерегающие человечество опасности вторжения в генетический код, образно сопоставляя геном с темной материей в космосе. Дальнейшее развитие медицины, включая иммунологию и трансплантацию органов, он справедливо связывает с переходом методов лечения на клеточный и молекулярный уровень. Это обещает неисчерпаемые возможности здорового долголетия, оправдывающие восклицание Миранды из шекспировской «Бури»: «Как прекрасно человечество!» Автора волнуют также перспективы синтеза ДНК и клетки в лабораторных условиях. И конечно, он касается интригующей проблемы обнаружения жизни вне Земли, стимулируемой лавинообразным потоком открытий внесолнечных планет, среди которых могут быть в перспективе обнаружены обитаемые планеты земного типа, хотя и с отличиями от наших биологическими основами и формами жизни. Какими они могли бы быть, как происходит рождение простейших живых форм путем химической, а затем и биологической эволюции — этим волнуем

автора вопросам в рецензируемой книге уделяется большое внимание. Как и другим захватывающим вопросам: как устроен наш мозг, каковы истоки творческой мысли, порождающие научные открытия, художественные и музыкальные шедевры, насколько реально достичь более или менее близких аналогов искусственного интеллекта. И каков мог бы быть уровень интеллекта у потенциально возможных обитателей других миров, как можно было бы установить с ними контакт, если программа поиска внеземных цивилизаций окажется успешной?

Обсуждение всех вышеперечисленных проблем неизбежно приводит автора к вопросу о том, каково наше будущее. Естественной основой для ответа на столь сложный (и, очевидно, не имеющий однозначного ответа) вопрос он считает математические модели, осознавая вместе с тем их уязвимость даже для незначительных флуктуационных воздействий, известных как «бабочка Бредбери». Численные реализации столь сложных моделей при недостаточности начальных и граничных условиях и многочисленных параметризациях требуют гигантской вычислительной производительности и едва ли перспективны. Более реалистичными представляются попытки заглянуть в будущее отдельных направлений человеческой деятельности, скажем, таких как ядерная физика, астрофизика, нанотехнологии, биология, биомедицина, информатика, робототехника. И, конечно, Биньями не может не упомянуть о перспективах проникновения в самые сокровенные тайны природы — объединения сущности материи и физических взаимодействий (сильного, слабого, электромагнитного, гравитационного) на основе единой теории («Теории всего» — ТОВЕ), или «Великого объединения», о котором мечтал еще Эйнштейн. Первым шагом на пути

создания такой теории служит Стандартная модель, подкрепленная недавним вероятным открытием бозона Хиггса. Это фундаментальное знание позволит неизмеримо расширить наши представления о мире, включая природу темной материи и темной энергии, и откроет перед человечеством новые грандиозные возможности.

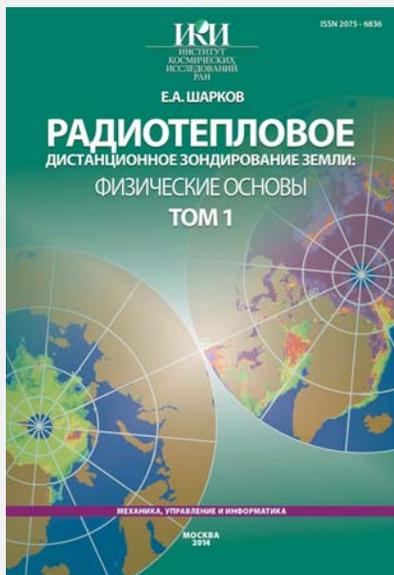
Что касается перспектив общественно-политического развития, то помочь уменьшить неопределенность прогноза может разве что опыт инопланетянина, с которым, как уже упоминалось, автор «поддерживает телепатическую связь». Но он признает, что даже такая помощь носит весьма ограниченный характер и касается, например, организации жизни в городах или транспорта на ближайшие 50 лет...

Об открытиях, которые действительно могли бы, по мнению автора, оказать сильное воздействие на жизнь социума, говорится в заключительной части книги. Свежим примером такого бытового переворота служит мобильная связь. Сопоставимыми по своему значению автор считает появление квантового компьютера, конструирование на молекулярном уровне, управление глобальным климатом, обнаружение внеземной жизни, чтение мыслей на расстоянии, копирование информации в мозге на кремниевые чипы, отмену бумажных и металлических денег, создание генных продуктов (известное на западе как «карни-культура»). Этот список можно было бы, конечно, изменить или расширить. Насколько справедливы ожидания автора при том невероятном уровне научно-технического прогресса, который мы наблюдаем на рубеже XX—XXI вв., покажет уже ближайшее будущее.

Думаю, перевод на русский язык и издание у нас этой во многом необычной, но поучительной и увлекательно написанной книги, представит несомненный интерес для широкого круга читателей. ■

Физика

Е.А.Шарков. РАДИОТЕПЛОВОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ: В 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с. (Серия «Механика, управление и информатика»).



Данная книга обладает достоинствами как учебника (курса лекций по радиофизическим дистанционным методам и средствам), так и монографии. В ней представлены систематизированные идеи о возможностях и современных достижениях микроволновой диагностики, о квантовом механизме собственного излучения природных сред, о прикладных аспектах современных методов анализа случайных сигналов и полей, об основных методах и схемах измерения естественного электромагнитного флуктуационного излучения. Первый том посвящен рассмотрению следующих вопросов: роль микроволновых методов и средств в общей системе микроволнового дистанционного зондирования, описание случайных сигналов и полей, методология построения высокочувствительных микроволновых приемников шумовых сигналов, основные характеристики собственного излучения и антенных систем. Даны фундаментальные основы тепловых флуктуаций электромагнитного поля, включая законы чернотельного излучения и радиоизлучения серых тел, а также основные релаксационные модели диэлектрических свойств и излучательные характеристики водных сред и земных покровов. Рассмотрены феноменологические основы теории переноса излучения для полидисперсных систем различных классов в атмосфере Земли и в приземном слое над морской поверхностью, основы квантово-механической модели теории переноса для селективных излучений газовых компонент земной атмосферы.

Космонавтика

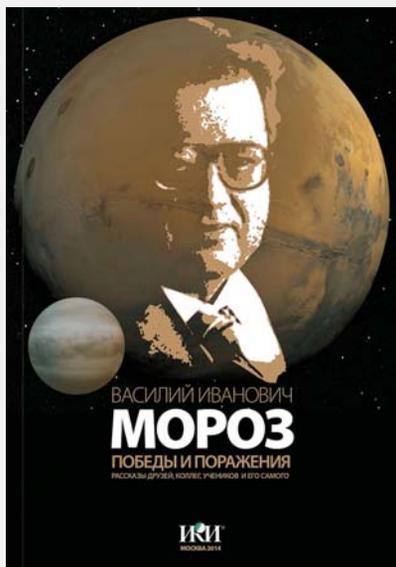
ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ НА МИКРО-, НАНО- И ПИКОСПУТНИКАХ. Материалы научной сессии Секции солнечно-земных связей Совета по космосу Российской академии наук / Под ред. А.А.Петруковича. М.: ИКИ РАН, 2015. 184 с. (Серия «Механика, управление и информатика»).

Микро- (до 50 кг), нано- (до 10 кг) и пико- (до 1 кг) спутники — бурно развивающийся класс космических аппаратов. В силу своей малости и дешевизны такие спутники могут полностью изготавливаться широким кругом научных и учебных организаций. Это создает жесткую конкуренцию за научные и технические идеи, а также их реализацию. Из-за малости размеров спутников и ограничений по орбитам выбор действительно важных научных задач для таких проектов затруднен. Основная российская научная космическая программа ориентирована на весьма редкие крупные проекты, поэтому возможность постановки относительно быстрых и малозатратных научных экспериментов довольно привлекательна. Наряду с существенным увеличением числа запусков это делает возможным оперативное решение отдельных актуальных задач, тестирование приборов и методик, ведет к общему оживлению научной космической деятельности. Сборник включает материалы научной сессии, прошедшей 3 декабря 2014 г. в Институте космических исследований РАН и посвященной обсуждению задач и проектов российских и зарубежных исследований солнечно-земных связей на микро-, нано- и пикоспутниках.



История науки

ВАСИЛИЙ ИВАНОВИЧ МОРОЗ. ПОБЕДЫ И ПОРАЖЕНИЯ. РАССКАЗЫ ДРУЗЕЙ, КОЛЛЕГ, УЧЕНИКОВ И ЕГО САМОГО. М.: ИКИ РАН, 2014. 375 с.



Профессор Василий Иванович Мороз (1931—2004) — известный ученый, исследователь планет наземными и космическими средствами, постоянный автор журнала «Природа». Начав свой путь в науке в 1954 г. в Астрофизическом институте АН Казахской ССР (в обсерватории «Каменное плато» под Алма-Атой), в 1956 г. он перешел на работу в Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова. В 1974 г. Мороз возглавил отдел физики планет и малых тел Солнечной системы в недавно созданном Институте космических исследований АН СССР. Первые научные работы по регистрации инфракрасных спектров планет с помощью наземных наблюдений на телескопах Южной станции ГАИШ и Крымской обсерватории позволили ему получить ряд выдающихся результатов: обнаружить ледяной покров на поверхности спутников Юпитера, связанную воду в марсианских породах, определить давление в атмосфере Марса и содержание CO_2 в атмосфере Венеры. С 1967 г. он стал активным участником исследований планет космическими аппаратами, а позже и научным руководителем многих экспериментов на советских космических аппаратах серии «Венера», «Марс», «Фобос», а также в зарубежных проектах. Ученый получил пионерские результаты, касающиеся свойств и строения атмосфер Марса и Венеры, кометы Галлея, состава поверхности Фобоса. Василий Иванович заложил основы отечественной школы инфракрасной астрономии и воспитал коллектив специалистов, которые успешно участвуют в международных космических программах. Значение развивавшейся его трудами инфракрасной астрономии трудно переоценить, ведь ИК-спектрометр на орбите — это эффективное средство исследования, так как спектр планеты содержит характерные полосы присутствующих в атмосфере газов и может дать информацию о вертикальном профиле температуры в атмосфере, о температуре и составе поверхности, о составе и распределении аэрозольной компоненты. Полученные данные позволяют судить об условиях на планете, в частности о динамике процессов, и используются для расчета моделей атмосфер. Книга объединяет автобиографические записки Василия Ивановича «На пыльных тропинках далеких планет: о былом и несбывшемся» и воспоминания его коллег, друзей и учеников в России и за рубежом, которые с Морозом разделяли радость побед 1970—1980-х годов и горечь поражений конца века и восхищались его талантом, мудростью, стойкостью и силой духа. Воспоминания воскрешают черты личности Мороза в годы учебы на физико-техническом и механико-математическом факультетах МГУ, первых наблюдений в обсерваториях и начала работ над космическими проектами. Читатель может увидеть, каким был Василий Иванович как друг, коллега, руководитель, учитель и ученый-исследователь.

Правила для авторов

Журнал «Природа» публикует работы по всем разделам естествознания: результаты оригинальных экспериментальных исследований; проблемные и обзорные статьи; научные сообщения и краткие рефераты наиболее примечательных статей из научных журналов мира; рецензии; персоналии; материалы и документы по истории естественных наук. Поскольку статьи адресуются неспециалистам, желающим знать, что происходит в смежных областях науки, суть проблемы необходимо излагать ясно и просто, избегая узкопрофессиональных терминов и математически сложных выражений. Авторами могут быть специалисты, работающие в том направлении, тема которого раскрывается в статье. Без предварительной апробации научным сообществом статьи не принимаются, а принятые к публикации в «Природе» рецензируют-

ся и проходят редакционную подготовку.

Допустимый объем статьи — до 30 тыс. знаков (с пробелами). В редакцию статьи можно прислать по электронной почте прикрепленными файлами или на любом из следующих носителей: компакт-дисках CD-R или CD-RW; дисках DVD+R или DVD+RW; дисках Zip 100 Mb; на устройствах, поддерживающих USB. Для сжатых файлов необходимо представить свой архиватор. Самораспаковывающиеся архивированные файлы не принимаются.

Текст статьи, внутри которого библиографические ссылки нумеруются по мере цитирования, аннотация (на русском и английском языках), таблицы, список литературы и подписи к иллюстрациям оформляются одним файлом в формате MS с расширением doc, txt или rtf. Иллюстрации присылаются отдельными файлами. Если пере-

сылаемый материал велик по объему, следует архивировать его в формат ZIP или RAR.

Принимаются растровые изображения в форматах: EPS или TIFF — без LZW-компрессии. Цветные и полутоновые изображения должны иметь разрешение не ниже 300 dpi, черно-белые (B/W, Bitmap) — не менее 800 dpi. Принимаются векторные изображения в формате COREL DRAW CDR (версии 9.0—11.0) и Adobe Illustrator EPS (версий 5.0—8.0).

Редакция высылает автору статью для согласования только в виде корректуры. Все авторские исправления необходимо выделять цветом, курсивом, полужирным шрифтом и т.д. и не трогать формулы и специальные символы (греческие буквы, математические знаки и т.п.), в которых ошибки не допущены.

Поступление статьи в редакцию подтверждает полное согласие автора с правилами журнала.

Над номером работали

Ответственный секретарь

Е.А.КУДРЯШОВА

Научные редакторы

О.О.АСТАХОВА

М.Б.БУРЗИН

К.Л.СОРОКИНА

Н.В.УЛЬЯНОВА

Литературный редактор

Е.Е.ЖУКОВА

Художественный редактор

Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией

И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Перевод:

С.В.ЧУДОВ

Корректоры:

М.В.КУТКИНА

Л.М.ФЕДОРОВА

Графика, верстка:

А.В.АЛЕКСАНДРОВА

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Российская академия наук,
президиум
Адрес издателя: 117997,
Москва, Профсоюзная, 90

Адрес редакции: 119049,
Москва, Мароновский пер., 26
Тел.: (499) 238-24-56, 238-25-77
Факс: (499) 238-24-56
E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 18.08.2015
Формат 60×88 1/8
Бумага офсетная. Офсетная печать
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2
Тираж 416 экз.
Заказ 524
Цена свободная
Набрано и сверстано в редакции

Отпечатано в ППП типографии «Наука»
121099, Москва, Шубинский пер., 6

www.ras.ru/publishing/nature.aspx

При использовании материалов ссылка на журнал «ПРИРОДА» обязательна.

в следующем номере



Алексей Иванович Абрикосов — выдающийся отечественный медик-патологоанатом, действительный член АН СССР, один из организаторов и руководителей Академии медицинских наук СССР, Герой Социалистического Труда. Именно он давал заключения о причинах смерти руководителей Коммунистической партии и Советского правительства. В феврале 1953 г. в связи с «делом врачей-вредителей» был отстранен от должности заведующего кафедрой патологической анатомии Первого медицинского института, которой руководил более 30 лет, и от работы в Кремлевской больнице вместе с женой Фанни Давидовной. Абрикосову принадлежат труды по морфологии туберкулеза, аллергических реакций, сепсиса, раневой инфекции, по патологии вегетативной нервной системы. Его учебники были настольными книгами для нескольких поколений врачей. Именем Абрикосова назван переулок в Москве, где находятся 1-й медицинский институт и клиники, в которых он много лет работал. Но каким человеком был Алексей Иванович? Как и в каких условиях работал и отдыхал? Какие взаимоотношения были в семье? Об этом читатели «Природы» узнают из автобиографической публикации и писем жене и детям из санатория «Гаспра», подготовленных к печати Наталией Юрьевной Абрикосовой, внучкой ученого.

АЛЕКСЕЙ ИВАНОВИЧ АБРИКОСОВ

К 140-летию со дня рождения и 60-летию со дня смерти

