

ISSN 0032-874X

ПРИРОДА

12 17



ОТ РОМАНТИКИ ДО ПРАКТИКИ

60 лет в космосе

При всей противоположности взглядов на советское наследие, вновь оказавшееся в фокусе дискуссий в год столетия Октябрьской революции, по одному вопросу расхождений нет — успех наших космических первопроходцев общепризнан предметом законной гордости страны. Прорыв в космос заставил миллионы людей на всей Земле по-иному взглянуть на небо, почувствовать мирную силу науки, увидеть реальную почву для мечтаний о дальних мирах и встречах с инопланетным разумом. На фоне романтических устремлений не обходилось и без скептиков, задающих сакраментальный вопрос об оправданности связанных с освоением космического пространства затрат на отвлеченные, как тогда казалось, идеи. И на него в очередной раз получен ясный ответ: при изучении фундаментальных научных проблем в итоге решаются такие практические задачи, о которых раньше даже не догадывались. Плоды современной космической индустрии — спутниковая связь, трансляция, навигация и др. — прочно укоренились в нашей обыденной жизни; стало рутинным и регулярное дистанционное зондирование наземных, океанических и воздушных систем планеты в самых различных целях. Взгляд ученых обращен уже далеко за пределы околоземных орбит. К сожалению, сейчас нельзя утверждать, что Россия играет первую скрипку в космосе — это неудивительно, поскольку траты на космические программы США (где полет на Марс объявлен национальным приоритетом) более чем на порядок превышают наши; обгоняет нас в несколько раз по этому показателю не только Евросоюз, но и Китай. Каждый из серьезных космических игроков, к которым присоединилась и Индия, имеет свои амбициозные планы, но будущее, бе-

зусловно, за объединенными усилиями всего человечества. И пока сохраняется отечественная школа космических исследований, мы можем претендовать на заметную роль в общем деле. За становлением этой отрасли знаний можно проследить по публикациям в «Природе». Заметка о запуске первого спутника появилась уже в ноябрьском номере 1957 г., а в дальнейшем на страницах журнала о новых успехах регулярно рассказывали как космонавты (среди них Г.С.Титов, А.Г.Николаев, П.Р.Попович, К.П.Феоктистов), так и ведущие ученые (М.В.Келдыш, Б.В.Раушенбах, Д.В.Скобельцын, В.Л.Гинзбург, И.С.Шкловский, Р.З.Сагдеев — и это далеко не полный список). К юбилейным датам редакция готовила целый номер журнала (а иногда и не один), посвященный космической науке, или хотя бы подборки материалов. Подобную подборку, позволяющую вспомнить какие-то моменты пройденного пути и подискутировать о будущем, мы предлагаем вашему вниманию и сейчас.

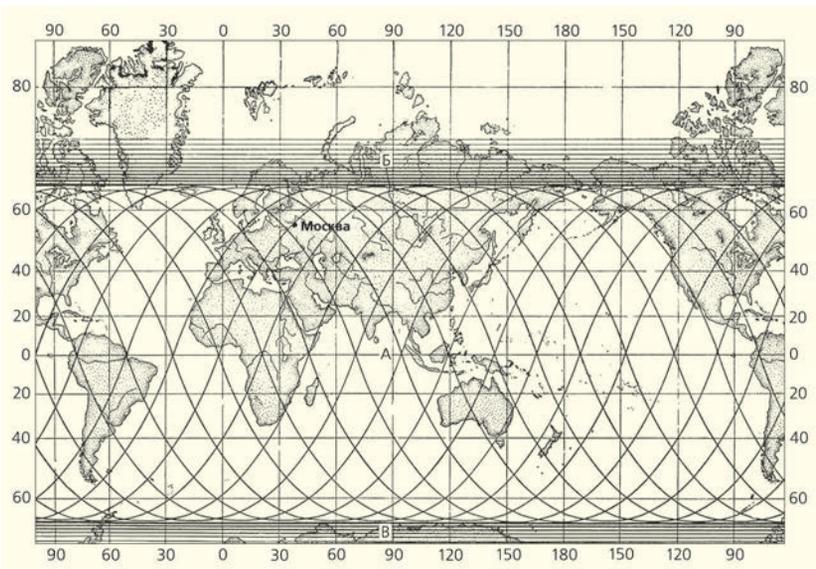


Иллюстрация из первого в журнале информационного сообщения «Советский искусственный спутник Земли» (Природа. 1957. №11) показывает схематическую карту движения аппарата и зоны (А, Б, В), из которых было возможно визуальное наблюдение за ним (зона радионаблюдений охватывала весь земной шар).

Первые спутниковые научные исследования

Ю.М.Батурин

Институт истории естествознания и техники имени С.И.Вавилова РАН (Москва, Россия)

4 октября 1957 года — день, который всегда будут помнить в течение всей истории человечества. С этого дня началась космическая эра. Это событие позволило создать новую науку — космические исследования. После простой возможности детектировать радиосигналы в ионосфере с помощью примитивного оборудования Первого спутника следующим шагом был запуск менее, чем через месяц, второго спутника, в шесть раз тяжелее первого и несшего на себе, помимо сложных физических приборов, первое живое существо в космосе — собаку Лайку. Главной задачей запуска первых спутников было практическое доказательство возможности проводить физические и медико-биологические исследования непосредственно в космическом пространстве.

Ключевые слова: простейший спутник, «Explorer», космические исследования, космос.

Четвертого октября 1957 г. в 22 ч 28 мин по московскому времени запуском первого искусственного спутника Земли началась космическая эра человечества. О первом спутнике много писали, подчеркивая его военно-политическое значение. Научной функции этого полета уделялось значительно меньше внимания. Действительно, о какой науке на спутнике стоит говорить, если аппарат нес только примитивный радиопередатчик, транслирующий сигнал «бип-бип-бип»?



Юрий Михайлович Батурин, член-корреспондент РАН, доктор юридических наук, главный научный сотрудник Института истории естествознания и техники имени С.И.Вавилова РАН, профессор Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, летчик-космонавт России, Герой России, лауреат Премии правительства РФ (2009). Область научных интересов — история космонавтики, постановка научных экспериментов на борту пилотируемых космических аппаратов, международное космическое право.

Простейший спутник был не так прост

На самом деле два радиопередатчика не просто излучали сигналы длительностью 0.4 с (в сообщении ТАСС называлась иная длительность — 0.3 с) попеременно на волнах 7.5 и 15 м. Длительность сигналов изменялась при повышении (более 50°C) или понижении (менее 0°C) температуры и при падении давления ниже 0.35 кгс/см² благодаря срабатыванию сдвоенного термореле и контрольных термо- и барореле. Таким образом на Земле получали грубые данные о состоянии атмосферы в гермообъеме [1]. Состав аппаратуры спутника реле не ограничивался: туда входили еще антенно-фидерное устройство, блок электропитания из трех батарей на основе серебряно-цинковых элементов, дистанционный переключатель и вентилятор простейшей

системы терморегулирования, а также система связи спутника с ракетой-носителем.

Простейший спутник представлял собой контейнер сферической формы диаметром 58 см. Его корпус состоял из двух полуболочек со стыковочными шпангоутами, соединенных между собой 36 болтами. Герметичность стыка обеспечивалась резиновой прокладкой. После сборки контейнер заполнялся осушенным азотом до давления 1.3 кгс/см². В верхней полуболочке располагались две уголкового антенны. Антенна на волну 7.5 м имела штыри длиной 2.4 м, антенна на волну 15 м — 2.9-метровые штыри, а также пружинный механизм, разводящий и те, и другие штыри на угол 35° от продольной оси контейнера. Снаружи верхняя полуболочка была покрыта защитным экраном, а на ее внутренней поверхности находился кронштейн для крепления радиопередатчика. Материал сферы — алюминий-магний-свинец-титановый сплав АМГБТ толщиной 2 мм. Вес спутника составлял 83 кг.

Целями запуска Первого спутника были:

- изучение прохождения через ионосферу радиоволн, излучаемых передатчиками спутника;
- экспериментальное определение плотности верхних слоев атмосферы по торможению спутника;
- проверка расчетов и основных технических решений, принятых для запуска аппарата в космос;
- исследование теплового режима и других условий работы аппаратуры.

И эти первые для искусственных космических объектов научные задачи были успешно решены.

Как принимались решения

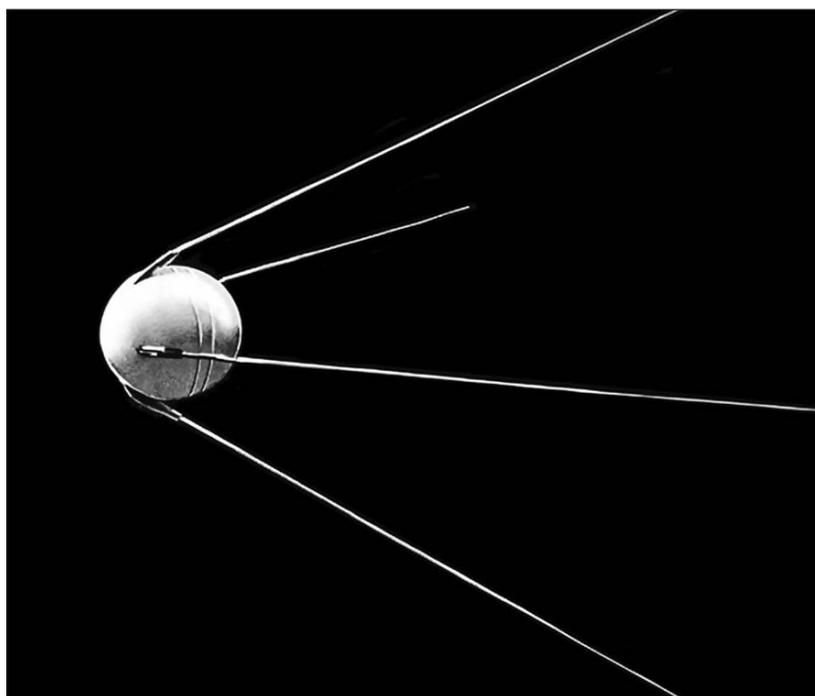
История спутника началась сразу после войны. В мае 1945 г. оказавшийся в США В.фон Браун подготовил доклад для американской армии о возможности создания искусственного спутника Земли (ИСЗ). На уровень государственного руководства проблема вышла в 1952 г.: для президента Г.Трумэна была составлена специальная записка «О проблеме искусственного спутника Земли», причем президент подробно обсуждал ее со своим личным научным консультантом — физиком, бригадным генералом У.Грэмом. Трумэн затребовал более подробную информацию, такой материал был подготовлен, но доложен был уже президенту Эйзенхауэру 24 сентября 1953 г. В сентябре 1954 г. были сформулированы предложения фон Брауна по малому спутнику. Впоследствии военные остановились на этом проекте в качестве кандидата в программу Международного геофизического года, но от него потом отказались в пользу проекта «Vanguard».

В СССР М.К.Тихонравов, на основе идеи «ракетного пакета» еще в 1948 г. пришел к выводу: достигнутая технологическая база дает техническую возможность вывести на орбиту искусственный спутник Земли. В марте 1950 г. он сделал на научной конференции публичный доклад, в котором затронул перспективу создания ИСЗ вплоть до полета на нем человека. Создать искусственный спутник С.П.Королев предложил 16 марта 1954 г. на совещании у академика М.В.Келдыша. Тот, в свою очередь, получил одобрение этого предложения у президента Академии наук СССР А.Н.Несмеянова. 27 мая 1954 г. Королев обратился к министру вооружения Д.Ф.Устинову с докладной запиской «Об искусст-

венном спутнике Земли», подготовленной Тихонравовым. В августе 1954 г. Совет Министров СССР утвердил предложения по проработке научно-теоретических вопросов, связанных с космическим полетом.

Осенью 1950 г. на Первом международном астрономическом конгрессе в Париже была создана Международная федерация астрономии, одной из первых инициатив которой стало проведение с 1 июля 1957 г. по 31 декабря 1958 г. Международного геофизического года (МГГ) — совместной программы ученых 67 стран. Президент Эйзенхауэр принял решение о запуске научного спутника в качестве части американского вклада в программу МГГ, чтобы помочь картографированию Земли — проекту, который еще в октябре 1954 г. принял Международный совет научных союзов. США предложили ряд геофизических исследований и заявили о возможности запуска своего спутника к началу 1958 г.

В начале августа 1955 г. М.В.Хруничев, В.М.Рябиков и С.П.Королев направляют первому секретарю ЦК КПСС Н.С.Хрущеву и председателю Совета Министров СССР Н.А.Булганину записку в связи с заявлением американцев о планах запуска спутника. И уже 8 августа 1955 г. на заседании Президиума ЦК КПСС было принято постановление «О создании искусственного спутника Земли» [2, с.66]. Полгода спустя вышло Постановление ЦК КПСС «Об участии Академии наук СССР в международных конференциях по проведению Международного геофизического года», в котором Академии разрешалось делать сообщения



Первый спутник.

«в общем виде о научных исследованиях на искусственном спутнике Земли» [2, с.71].

В начале 1956 г. Совет Министров СССР вынес решение «О создании объекта “Д” — большого научного спутника, который предполагалась запустить в 1957–1958 гг. [3, с.31]. Спутник должен был нести аппаратуру для геофизических измерений и весить 1200 кг. Головной организацией было определено ОКБ-1 Королева (ныне Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П.Королева). Поскольку оказалось, что работы по объекту «Д» идут с отставанием от графика (об этом Президиум Академии наук СССР вынес 14 сентября 1956 г. специальное постановление [3, с.52–54]), Президиум ЦК КПСС принял предложение ОКБ-1 и Академии наук «о проведении двух пробных пусков упрощенных искусственных спутников Земли» [3, с.56]. Первый из них получил индекс «ПС» (Простейший спутник). Его планировали отправить в полет даже до начала Международного геофизического года, но реально это можно было сделать лишь после успешных испытаний ракеты Р-7, что произошло только 21 августа 1957 г.

«Баскетбольная» спутниковая программа

Совет национальной безопасности (СНБ) США первоначально согласовал выделение 20 млн долл. на спутниковую программу «Vanguard», которую предполагалось осуществить в рамках МГГ. Но стоимость программы быстро начала расти и к апрелю 1957 г. достигла 100 млн долл. При этом предполагалось, что по меньшей мере один из шести спутников будет успешно выведен на орбиту. (В 1955 г., т.е. до денежной реформы 1961 г., изготовление первого научного спутника весом 1.5–2 т без учета стоимости ракеты оценивалась в СССР в 250 млн руб. [3, с.24]). Президент Эйзенхауэр пребывал в нерешительности относительно программы в МГГ (и вообще участия в нем). Министр обороны США Ч.Уилсон также не был впечатлен проектом. «“Чертов апельсин”, выбрасываемый на ветер», — отзывался он о научном спутнике в своем ближнем кругу. «У этих спутников, какими бы достоинствами они ни обладали, слишком много лоббистов и слишком мало банкиров», — сказал он президенту [4, р.224–225]. 3 мая 1957 г. президент получил соответствующий меморандум с подробным изложением ситуации, заставивший его вынести вопрос о научной спутниковой программе на обсуждение СНБ, которое состоялось через неделю.

Примечателен диалог Эйзенхауэра и помощника министра обороны по науке У.Холадея. Выслушав мнения участников, президент заметил, что изготовление спутника будет легче и дешевле, если не ставить на него такое большое количество научной аппаратуры, как планировалось. (Обратим внимание на схожую логику — президента

США, с одной стороны, и Академии наук СССР и ОКБ-1, с другой. Но в СССР это поняли на год раньше американцев). Холадей уточнил, что диаметр проектируемого спутника уже пришлось уменьшить с 30 дюймов (76.2 см) до 20 (50.8 см), и при этом научная аппаратура становится «если не золотой, то уж точно хромированной». Президент возразил, что, несмотря на уменьшение диаметра спутника до 20 дюймов, он все еще остается «размером больше баскетбольного мяча», о котором шла речь на заседании СНБ, когда вопрос о спутнике ставился первый раз [4, р.324–325].

Подводя итог, президент подчеркнул, что уже не остается возможности выйти из начатой спутниковой программы и он не видит иного выхода, как обратиться в соответствующие комитеты Конгресса и попросить выделить дополнительные средства.

Фон Браун и Ван Аллен

В.фон Браун со своей командой, состоящей преимущественно из немецких ракетчиков, прибывших после окончания Второй мировой войны в США, работал в Хантсвилле (штат Алабама), в военном агентстве, занимающемся разработкой баллистических ракет (Редстоунский арсенал). Заместитель фон Брауна по научным вопросам (директор отдела исследовательских проектов), тоже немец, Э.Штулингер (воевал на восточном фронте, ранен под Москвой, в 1943 г. переведен в Пенемюнде под начало фон Брауна), хотя и был физиком по образованию, аспирантуру заканчивал по кафедре биологии и особенно интересовался будущими биологическими исследованиями на спутниках, которые предлагал фон Браун. Он даже написал посвященную шефу поэму о слабой маленькой клетке морского ежа, которая, летая в невесомости, подверглась воздействию космических лучей и начала делиться, открывая постепенно человеку путь к его дерзкой мечте — жить в космосе, «возможно, через десять или одиннадцать лет» [5, р.268–269].

В 1956 г. Штулингер побывал по приглашению Дж.Ван Аллена на физическом факультете Университета штата Айова. Он рассказал об исследованиях Ван Аллена, которые тот планирует проводить на спутниках, когда они появятся, фон Брауну. В частности, Ван Аллен собрал и обобщил большое количество данных по интенсивности космического излучения в зависимости от высоты, полученных в экспериментах на высотных ракетах. Фон Браун был впечатлен и через Штулингера пригласил Ван Аллена приехать с визитом в Хантсвилл. 13 февраля 1957 г. Ван Аллен ответил Штулингеру подробным письмом, в котором высказал большую заинтересованность в участии Университета штата Айова в программе фон Брауна и перечислил эксперименты, которые хотел бы поставить на борту спутника. Среди них:

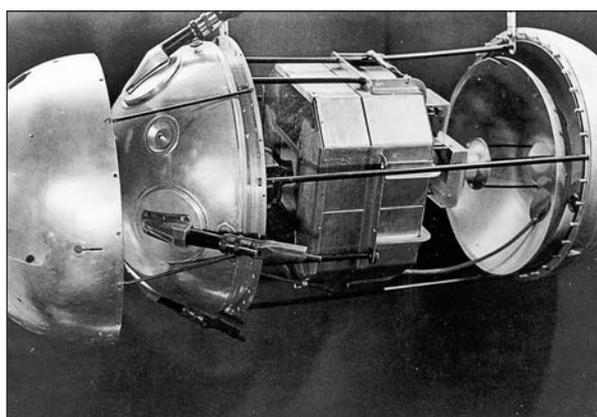
- изучение космических лучей;
- вариации во времени коротковолнового ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца;
- соударения с микрометеоритами и микрометеоритная эрозия;
- изучение плотности атмосферы на больших высотах;
- излучения в энергетическом балансе Земли;
- облачный покров и слежение за погодой;
- ионосферные измерения с использованием двух бортовых передатчиков, работающих на разных частотах [6, с.69].

Последний пункт был в точности выполнен на первом ИСЗ. Остальные в значительной части пересекались с советской научной спутниковой программой.

Ван Аллен угадал правильно. Хотя фон Брауну долго не давали заказ на запуск первого американского спутника после взрыва на стартовой позиции ракеты-носителя со спутником «Vanguard» 6 декабря 1957 г. (поразительно, но сам спутник уцелел и даже подавал сигналы из кустов, куда был отброшен; теперь он выставлен в Национальном музее авиации и космонавтики Смитсоновского института в Вашингтоне, округ Колумбия), было принято решение о запуске объекта RTV-7, который готовил фон Браун. Название «Explorer» появилось уже после запуска. «Explorer-1» массой 8,3 кг (научная аппаратура 4,5 кг) был запущен 31 января 1958 г. (на советской территории уже наступило 1 февраля). Научной аппаратурой спутника занимался Ван Аллен. На «Explorer-1» был размещен счетчик Гейгера, датчик попадания микрометеоритов и ультразвуковой микрофон, регистрировавший соударения. Всего были успешно запущены 14 аппаратов «Explorer», восемь запусков окончились неудачей.

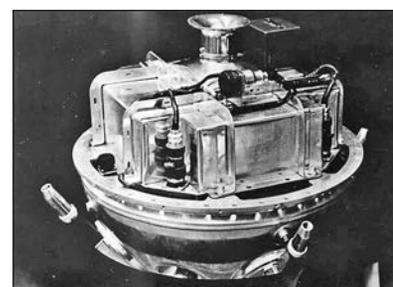
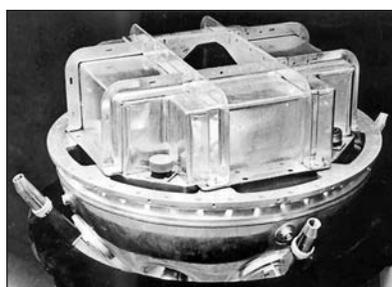
Космическая эра наступила на два дня раньше

17 сентября 1957 г., в день столетия со дня рождения К.Э.Циолковского, который американская разведка назвала вероятным днем запуска спутника, Королев, выступая с докладом, посвященным

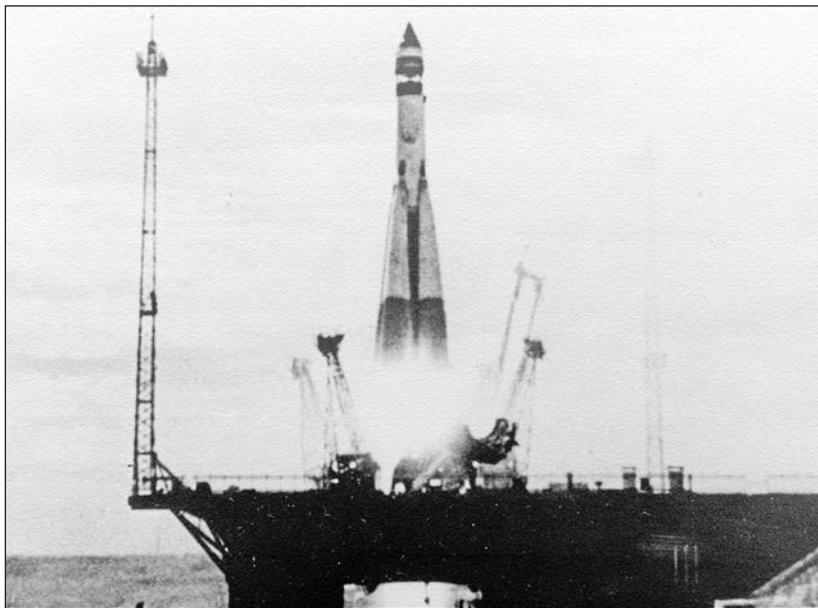


Простейший спутник — вид снаружи и внутри.

ученому, в Колонном зале Дома союзов, произнес одну знаменательную фразу: «В ближайшее время с научными целями в СССР и США будут произведены первые пробные пуски искусственных спутников Земли». И действительно, 26 сентября 1957 г. Президиум ЦК КПСС, а затем в тот же день и Совет Министров СССР принимают текстуально совпадающие (за исключением одного слова) постановления с одинаковым названием «О запуске искусственного спутника Земли» [3, с.59–60]. В постановлении определялось: «Запуск спутника произвести в середине октября с.г.» Вскоре, как тогда говорили, «инстанции» утвердили и точную дату — 6 октября.



Узлы простейшего спутника: радиопередатчик, блок источников питания, вентилятор системы терморегулирования и коммутационный блок.



Старт ракеты-носителя с первым искусственным спутником.

Но случилось так, что Королев без всякого согласования с политическим руководством в Москве, своей властью прямо на Байконуре сдвинул сроки пуска. Причиной тому был листок экспресс-информации в сборнике новостей науки и техники, в котором говорилось, что на совещании по координации запусков ракет и спутников, которое происходило в Вашингтоне по линии МГГ, на 6 октября намечен американский доклад «Спутник над планетой». Королев позвонил в КГБ. Ему сказали, что никаких сведений о том, что американцы запустят на днях спутник, советская разведка не имеет. Королев знал, что Дж.Хаген, руководитель проекта «Vanguard», заявил как-то неопределенно: «Быть может, мы предпримем испытания до исхода этого года...» И несмотря на то, что работы шли по очень напряженному графику, Королев принимает решение: сдвинуть старт на два дня. Пуск ракеты-носителя «Спутник» (это был пятый пуск ракеты Р-7) с первым ИСЗ состоялся 4 октября 1957 г.

При старте ракеты было отмечено запаздывание выхода на тягу основного двигателя бокового блока «Г». Тем из наблюдавших пуск, кто повидал уже старты ракет, даже показалась, что ракета вот-вот взорвется. Однако на последней секунде временного контроля блок вышел на режим. На 16-й секунде полета отказала система опорожнения баков, следствием чего был повышенный расход керосина. Из-за этого двигатель выключился на секунду раньше. Как результат, спутник оказался на орбите на 90 км ниже расчетной.

Через 295 с после старта спутник вышел на орбиту с перигеем 228 и апогеем 947 км и временем одного оборота вокруг Земли 96 мин 10 с.

В тот же день мир узнал, что Советский Союз запустил первый искусственный спутник Земли,

начав отсчет космической эры. Полет первого спутника получил невероятный мировой резонанс. Практически вся мировая пресса говорила об этом событии. Буквально за один день международный статус СССР неизменно вырос. Русское слово «спутник» сразу вошло в языки всех народов мира.

Первые 24 ч после сообщения о советском спутнике обстановка в Белом доме была совершенно спокойной, пока не стала известна общественная реакция на это событие. Тогда вспомнили, что Эйзенхауэра много раз предупреждали о пропагандистском значении запуска спутника, но он каждый раз отмахивался.

Одним из следствий запуска Советским Союзом первого спутника было то, что в Соединенных Штатах всерьез задумались

о привлечении ученых к формированию государственной политики на высшем уровне. Глава государства учредил должность специального помощника президента по вопросам науки и техники и перевел консультативный комитет по науке в непосредственное подчинение Белому дому. В 1958 г. было образовано Национальное агентство по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) [7].

Без чертежей

Уже 10 октября по личной просьбе Хрущева осуществить следующий запуск к 40-летию Октябрьской революции в ОКБ-1 приступили к изготовлению второго спутника. Создавали его так, как совершенно недопустимо в ракетно-космической отрасли, но к счастью, это произошло в первый и последний раз. Рабочих чертежей практически не было, за исключением трех сборок, без которых было не обойтись. Конструкторы и инженеры КБ непрерывно находились в цехе, объясняя рабочим, что надо делать, и контролируя их. Нечто похожее показали киношники в недавнем художественном фильме «Время первых», совершенно неправдоподобно расположив инженеров с кульманами в цехе, где собирался космический корабль «Восход-2». Макетирование проводилось одновременно с изготовлением летного образца спутника. Все делалось с лета: идеи, минуя стадию документирования, превращения в чертежи и схемы, обсуждения и утверждения, сразу воплощались в «железе». М.В.Келдыш однажды в субботу вечером, сам сидя за рулем, повез ученых и инженеров в КБ, потому что срочно надо было решить вопрос об изменении разме-



Первый космонавт — собака Лайка.

щения приборов, освободив пространство для Лайки, чтобы она могла выгнуть спину.

Второй спутник массой 508 кг был запущен 3 ноября 1957 г. На нем, помимо научной аппаратуры, предназначенной для изучения ультрафиолетового излучения Солнца и космических лучей, впервые выполняло полет высокоорганизованное живое существо — собака Лайка. От эксперимента с Лайкой зависел ответ на вопрос: сможет ли человек полететь в космос? И человек отправился в космос в 1961 г., а не «через десять-одиннадцать лет», как мечтал Штулингер.

Подготовка к этому полету продолжалась около года. Собак приучали к ношению ассенизационной одежды, к новой пище и способу ее принятия, постепенно уменьшали размеры клеток, приближая их к объему кабины спутника (диаметр 64 и длина 80 см). Собак вращали на центрифуге, тренировали на вибростенде, испытывали в барокамере. Наконец, отобрали трех — Альбину, Лайку и Муху. После долгих обсуждений было решено отправить в полет Лайку — двухлетнюю светлую самку массой 6 кг [8]. Светлая масть Лайки способствовала более четкому различению деталей ее поведения на фотографиях и кадрах киноплёнки во время ее подготовки к полету.

Возвращать запущенные объекты из космоса еще никто не умел. Лайку отправили на верную гибель, но научные результаты стоили этой жертвы. Имя Лайки указано на памятной доске с именами погибших космонавтов, установленной в Звездном городке. Люди поставили памятник Лайке в Москве, а также памятники другим верным друзьям человека, которые помогли им выйти в космос: Звездочке в Ижевске, Белке и Стрелке в Челябинске, Чернушке в Татарстане, Лайке, Белке и Стрелке в Греции, на Крите. Существует также общий памятник собаке-космонавту в парке Кекенхоф (Лисс, Голландия). В их честь выпускались почтовые марки в разных странах, создавались песни и фильмы.



Аналог аппарата «Спутник-2».



Памятник легендарной Лайке, установленный в 2008 г. в Москве, на территории Института военной медицины (скульптор — Павел Медведев).

Научные результаты

На первом и втором спутниках получены интереснейшие данные.

Было изучено поведение и состояние подопытного животного на наиболее трудном с биологической точки зрения этапе полета — при выведении спутника на орбиту и далее в условиях невесомости. Сразу после старта частота сердечных сокращений у Лайки возросла в три раза. В дальнейшем, когда перегрузки не только продолжались, но и нарастали, частота сердцебиений уменьшилась. Анализ кардиограммы не показал каких-либо болезненных признаков. Отмечалась типичная картина учащения сердцебиений, так называемая синусовая тахикардия. По завершению эксперимента медики пришли к выводу, что Лайка переносила условия космического полета удовлетворительно.

Исследование ионосферы при пусках первого и второго спутников дали ученым новые данные распределения электронов и ионов в верхних слоях земной атмосферы и позволило определить порядок величины концентрации электронов на больших высотах (Институт радиотехники и электроники АН СССР, Научно-исследовательский институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн Министерства связи СССР и НИИ-4 Министерства обороны). Анализ этих данных позволил прийти к выводам о плотности нейтральных частиц на больших высотах и о плотности межпланетного газа. Получены данные о прохождении радиоволн в ионосфере на разных высотах и их затухании.

В результате работ (Научно-исследовательский институт ядерной физики Министерства высшего образования СССР) по изучению вариаций первичного космического излучения были получены новые экспериментальные данные по космическим лучам на больших высотах вплоть до 700 км (без спутников зависимость интенсивности космических лучей от высоты была известна до 200 км). Полученные данные позволили также уточнить структуру магнитного экватора.

Астрономический совет Академии наук СССР вел наблюдения за спутниками, определял параметры орбиты и прогнозировал дальнейшее движение спутников. Были получены их первые фотографии. По изменению блеска даны оценки вращения ракеты-носителя и второго спутника при орбитальном полете.

Проведены измерения температуры в элементах конструкции спутников (ОКБ-1 Госкомитета по оборонной технике, НИИ-1 Госкомитета по авиационной технике и НИИ-4 Министерства обороны). Полученный экспериментальный материал позволил разработать методы расчета температур в конструкции космических аппаратов.

На основании радиопеленгаторных измерений и оптических наблюдений проводилось вычисление параметров орбиты спутников и их из-

менений во времени (Отделение прикладной математики АН СССР, ныне Институт прикладной математики имени М.В.Келдыша РАН; НИИ-4 Министерства обороны). Элементы орбиты определялись с точностью значительно выше ожидавшейся. По торможению спутника впервые с высокой точностью были получены опытные данные по плотности атмосферы на высотах 200–250 км. Впервые были осуществлены радиоизмерения доплеровского эффекта при продолжительном космическом полете.

Лишь один эксперимент оказался неудачным: в ходе исследования коротковолнового ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца не удалось получить четкой регистрации излучений [9].

Первый спутник находился на орбите до 4 января 1958 г., совершив 1440 оборотов. Второй спутник совершил 2570 оборотов вокруг Земли и прекратил существование 14 апреля 1958 г. Между этими двумя датами 31 января и 26 марта 1958 г. и американцы запустили свои первые два спутника «Explorer-1 и -3» («Explorer-2» не вышел на орбиту), опередившие программу «Vanguard» с ее неудачами. 17 марта 1958 г. наконец был запущен и спутник «Vanguard-1» (диаметр 16,3 см, масса 1,5 кг).



В память о начале космической эры на площадке 1 космодрома Байконур установлена стела по проекту испытателей космодрома Е.Н.Корнилова и В.В.Евтеева с надписью: «Здесь гением советского человека начался дерзновенный штурм космоса (1957 г.)».

Несколько пренебрежительное сравнение с «апельсином», которое любили использовать в Советском Союзе (вспомним ставшее крылатым выражение Чарльза Уилсона), относится именно к «Vanguard-1», а вовсе не к подготовленному под руководством фон Брауна «Explorer», первому американскому спутнику, кстати, имевшему форму прямой трубки (точнее, «карандаша») длиной около 2 м и диаметром 15 см, а не сферы.

Эксперименты, проведенные на «Explorer-1 и -3» подтвердили гипотезу Ван Аллена. Оба они обнаружили существование внутреннего радиационного пояса, в котором плотность заряженных частиц увеличивалась с высотой. Второй советский спутник также был оборудован счетчиком Гейгера и фактически обеспечил первое наблюдение внутреннего радиационного пояса, но, как мы знаем, советским ученым было разрешено рассказывать о научных результатах спутниковых

исследований только «в самом общем виде». В мае 1958 г. на научной сессии Ван Аллен объявил об открытии радиационного пояса, который с тех пор и носит его имя. Внешний радиационный пояс был обнаружен годом позже на значительно больших высотах.

15 мая 1958 г. СССР запустил «Спутник-3» (объект «Д») с богатым комплектом научно-исследовательской аппаратуры. Он успешно работал до 6 апреля 1960 г., т.е. в течение 692 сут, более чем в два раза превысив расчетное время. Среди прочего он подтвердил и, благодаря более совершенному научному оборудованию, уточнил структуру радиационного пояса.

Такова увлекательная и драматическая история начала спутниковых научных исследований, которые потом стали проводить и с помощью межпланетных станций, и на пилотируемых космических объектах. ■

Литература / Reference

1. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева. Б.м., 1996: 88–90. [S.P.Korolev Rocket and Space Corporation «Energia». 1996: 88–90. (In Russ.)]
2. Советская космическая инициатива в государственных документах. 1946–1964 гг. Под ред. Ю.М.Батурина. М., 2008. [Soviet Space Initiative in State Papers. 1946–1964. Yu.M.Baturin (ed). Moscow, 2008. (In Russ.)]
3. Вестник Архива Президента Российской Федерации. Советский космос. Специальное издание к 50-летию полета Юрия Гагарина. М., 2011. [Bulletin of Archive of the President of the Russian Federation: Soviet cosmos. A Special Issue Devoted to the 50th Anniversary of the flight of Yuri Gagarin. M., 2011. (In Russ.)]
4. Exploring the Unknown. Selected documents in the History of the U.S. Civil Space Program. V.I: Organizing for Exploration. J.M.Logsdon, L.J.Lear, J.Warren-Findley, R.A.Williamson, D.A.Day (eds). Washington D.C., 1995.
5. Exploring the Unknown. Selected documents in the History of the U.S. Civil Space Program. V.VI: Space and Earth Science. J. M.Logsdon, S.J.Garber, R.D.Launius, R.A.Williamson (eds). Washington D.C., 2004.
6. Exploring the Unknown. Selected documents in the History of the U.S. Civil Space Program. V.V: Exploring the Cosmos. J. M.Logsdon, A.P.Snyder, R.D.Launius, S.J.Garber, R.A.Newport (eds). Washington D.C., 2001.
7. Батурин Ю.М. Космическая дипломатия. Звездный городок, 2006. С.15–23, 33–38. [Baturin Yu.M. Space Diplomacy. Star City, 2006: 15–23, 33–38. (In Russ.)]
8. Башилова Е.Ю. «Так что решили — будем запускать...». Космос. Время московское: Сборник документов. М., 2011: 223–226. [Bashilova E.Yu. «So we have taken a decision to launch...». Space. Moscow time. Set of documents. Moscow, 2011: 223–226. (In Russ.)]
9. Записка А.Несмеянова, М.Келдыша, С.Королева и других от 1 марта 1958 г. в ЦК КПСС. Вестник Архива Президента Российской Федерации: Советский космос. М., 2011: 80–82. [The note by A.Nesmeyanov, M.Keldysh, S.Korolev et al. of March 1st, 1958, to KPSS CK. Bulletin of Archive of the President of the Russian Federation: Soviet cosmos. Moscow, 2011: 80–82. (In Russ.)]

Satellite First Scientific Researches

Yu.M.Baturin

S.I.Vavilov Institute for the History of Science and Technology, RAS (Moscow, Russia)

October 4, 1957 is the date that will live in fame for all the human history. This was the day on which the Space Age began. This event enabled to create a new science — space research. After the simple possibility to detect radiosignals at the ionosphere with the Sputnik-1 facilities, the next step was the launch of Sputnik-2 less than a month later. It was six times heavier than the Simplest sputnik and carried complicated physical instruments and moreover, the first living creature in space — dog Laika. The first satellites were mainly designed to prove possibility of conducting physical, medical, and biological researches directly in the outer space.

Keywords: the simplest sputnik, "Explorer", space research, outer space.

Радиационные пояса Земли: открытие и первые исследования

Ю.И.Логачев

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Неожиданное открытие радиационных поясов Земли, кроме некоторой растерянности ученых, вызвало шквал объясняющих гипотез и анализ уже существовавших представлений о движении заряженных частиц в магнитных полях. Возникли попытки связать новое явление с давно известными полярными сияниями, магнитными бурями и солнечными частицами. Такой натиск не мог не привести к нахождению истины (захваченные магнитным полем Земли частицы действительно связаны с перечисленными явлениями), и буквально через месяц природа нового явления прояснилась. Кто внес основной вклад в разгадку тайны феномена и почему, к некоторому неудобству, открытию присвоили имя только одного участника эпопеи?

Ключевые слова: «Спутник-1», «Спутник-2», внешний и внутренний радиационные пояса Земли.

Нет сомнения, что созданные в войну 1939–1945 гг. ракеты рано или поздно полетели бы в космос. Начало этому положил «Спутник-1», запущенный в СССР 60 лет назад. Через месяц вывели на орбиту «Спутник-2», потом в дело вступили США («Explorer-1 и -3», а также «Vanguard-1»), затем были «Спутник-3», «Explorer-4», а впоследствии и многие другие. К настоящему времени в космосе побывало более 10 тыс. различных аппаратов — научных, военных и прикладных.

Про первый спутник написано немало, но гораздо менее известны следующие пять, результаты которых принесли важное открытие: были обнаружены радиационные пояса Земли. Неожиданно оказалось, что за пределами своей атмосферы Земля, находящаяся, как ожидалось, в совершенно пустом космическом пространстве, окружена интенсивными потоками заряженных частиц, которые захвачены магнитным полем планеты. Эти пояса радиации имеют сложную пространственную структуру и испытывают сильные вариации, связанные с активностью Солнца. К настоящему времени радиационные пояса хорошо изучены, понятия физика явления, найдены источники частиц (это космические лучи; частицы, ускоренные во время вспышек на Солнце; частицы из ионосферы и атмосферы Земли), определена их важность и связанные с ними опасности для человечества. Пояса радиации исследовались многими различными аппаратами, в том числе и для реше-



Юрий Иванович Логачев, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Участник исследований радиации в космосе начиная с первых полетов искусственных спутников Земли, соавтор открытия внешнего радиационного пояса Земли.

ния прикладных задач, без которых мы уже не можем обойтись. Достаточно перечислить телеретрансляторы на геостационарной орбите, навигационные системы (GPS и Глонасс), метеоспутники, аппараты для поисков полезных ископаемых из космоса. Важная задача — обеспечение радиационной безопасности космических полетов, в частности при планировании освоения Луны и полетов человека на Марс.

Календарь первых космических событий

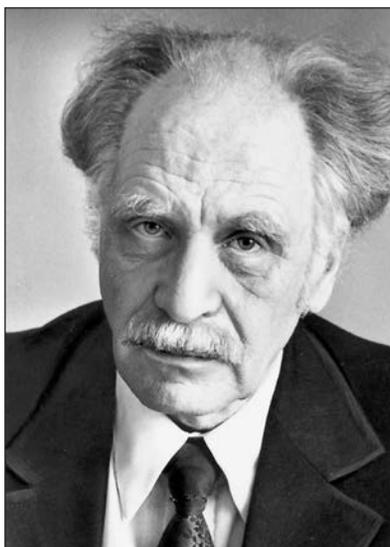
О том, что Земля постоянно облучается заряженными частицами высокой энергии — космическими лучами, ученые узнали в 1912 г. После открытия будущего нобелевского лауреата В.Гесса исследователи все время стремились забраться повыше — поближе к их возможному источнику. В 30-е годы для изучения космических лучей в стратосферу запускались аэростаты, шары-зонды, а сразу после окончания войны — ракеты (сначала немецкие

ФАУ, затем США и СССР стали делать свои ракеты). Интерес представляли не только космические лучи: для измерения ультрафиолетового излучения Солнца тоже нужно уйти выше слоя озона, эффективного УФ-поглотителя. Магнитное поле Земли и ионосфера также требовали измерений на больших высотах. Уже в 50-е годы идея создания искусственных спутников активно обсуждалась научным сообществом, особенно в связи с намечавшимися исследованиями в Международном геофизическом году (МГГ, 1957–1958).

В СССР подготовка экспериментов на спутниках началась в середине 1956 г. На совещании в Академии наук СССР ведущие специалисты по физике верхней атмосферы Земли, магнитного поля, ионосферы и космических лучей получили задание подготовить предложения-проекты экспериментов на искусственных спутниках Земли. Собранные заявки охватывали широкий спектр исследований от атмосферы до микрометеоров (и космической радиации в том числе), причем предполагалось все измерения проводить на одном аппарате. У каждого эксперимента были свои требования, и столь большой набор приборов нуждался в длительной подготовке спутника. Забегая чуть вперед, скажем, что запуск такого спутника (он оказался уже третьим) состоялся лишь 15 мая 1958 г.

Между тем было известно, что США также готовят к полету космический аппарат. В ситуации жесткой конкуренции возникло естественное желание быть первыми. Успешный запуск баллистической ракеты в СССР в августе 1957 г. подтолкнул руководителей спутниковой программы не дожидаться готовности основного научного аппарата, а запустить более простой, лишь бы обогнать США. Цель, как все знают, была достигнута, первым спутником в космосе стал советский.

На борту следующего, «Спутника-2», вышедшего на орбиту через месяц после «Спутника-1» (3 ноября 1957 г.), кроме научной аппаратуры находилась собака по имени Лайка. Она была гвоздем проекта, весь полет задумывался для ответа на вопрос: смогут ли летать в космос люди? Но была и научная программа, которая включала изучение ультрафиолетового излучения Солнца (под руководством С.Л.Мандельштама) и космических лучей (экспериментом руководил С.Н.Вернов). Хотя запуск «Спутника-2» был приурочен к 40-летию Великой Октябрьской революции, его работа освещалась менее шумно, а результаты были опубликованы только в научных журналах, причем значительно позднее.



С.Н.Вернов (1910–1982).



Дж.Ван Аллен (1914–2006).

Следующими успешными, как теперь говорят, миссиями, стали аппараты США «Explorer-1 и -3», запущенные 31 января и 26 марта 1958 г. с приборами для изучения космических лучей (научный руководитель эксперимента Дж.Ван Аллен). 15 мая наконец стартовал наш «Спутник-3» с большим набором измерительной аппаратуры. Полеты перечисленных спутников не только положили начало научным исследованиям космоса, но и помогли сделать важное геофизическое открытие — обнаружить радиационные пояса Земли.

Результаты полетов спутников «Explorer-1, -3» были представлены общественности 1 мая 1958 г. на заседании Академии наук США. В период с мая по август 1958 г. новое явление бурно обсуждалось, чему способствовала проводившаяся в Москве 29 июля — 9 августа V Генеральная ассамблея Международного геофизического союза, посвященная итогам МГГ. Доклады и обсуждения результатов полетов «Explorer-1, -3» и «Спутника-3» помогли выяснить в общих чертах картину захваченных магнитным полем Земли энергичных заряженных частиц, обсудить их источники. Эксперименты «Спутника-3» показали, что повышенная радиация характерна для двух четко разделенных областей: экваториальной и приполярной, названных впоследствии внутренним и внешним радиационными поясами. Радиация в экваториальной области, по данным «Спутника-3», состоит главным образом из протонов с энергией 100 МэВ (приборы американских спутников «Explorer-1, -3» не могли идентифицировать природу частиц), приполярные районы заполнены в основном электронами с энергией 100 кэВ (спутники «Explorer-1, -3» на эти широты не залетали, наклон их орбит был не очень большим, рис.1).

В период заседания Ассамблеи МГГ научный лексикон обогатился новыми понятиями: захва-

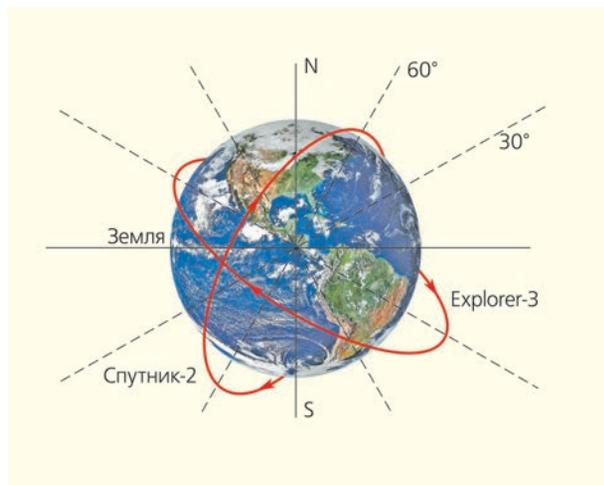


Рис.1. Орбиты двух спутников Земли — советского и американского. Наклон плоскости орбиты «Спутника-2» к плоскости экватора Земли — 65°, спутника «Explorer-3» — 33°. Перигеи орбит находятся на широтах места запуска, апогеи — в противоположном полушарии. Масштабы орбит и Земли почти соблюдены.

ченные магнитным полем заряженные частицы, нейтроны альbedo космических лучей, проникновение солнечных частиц в магнитное поле Земли и их захват; именно тогда был введен общепринятый ныне термин «радиационные пояса Земли». И это несмотря на то, что ученым еще не были известны данные следующего американского спутника «Explorer-4» (запущенного 26 июля 1958 г.), который был укомплектован более широким набором аппаратуры по сравнению с предыдущими. Впереди было и очень важное событие — создание искусственных поясов радиации в магнитном поле Земли с помощью атомного взрыва небольшой мощности (американский эксперимент «Argus» в августе 1958 г.).

Первые полеты — первые неожиданности

При подготовке наших экспериментов на спутниках сроки были сжатыми, дело новым, а ракетчики выдавали очень жесткие лимиты на вес, габариты и энергопотребление приборов. В этих условиях, естественно, нам пришлось ограничиться простейшими устройствами, способными регистрировать заряженные частицы: детекторами служили газоразрядные счетчики; электроника в то время уже появилась более легкая — полупроводниковая. На первых спутниках США были практически такие же приборы. Особенность газоразрядных счетчиков (счетчиков Гейгера) состоит в том, что они не различают вид частиц (их заряд или массу), вызвавших разряд, а регистрируют только факт попадания частицы в счетчик, делая это непрерывно и сообщая исследователям число

разрядов в единицу времени. «Мертвое время» счетчиков, пока идет разряд, составляет десятки микросекунд, так что счетчик может надежно считать до 10^4 частиц/с.

Значительная разница в экспериментах Вернова и Ван Аллена состояла в траекториях запущенных спутников и, соответственно, в обследованных областях пространства. Прибор Вернова был установлен на «Спутнике-2» с наклоном орбиты к земному экватору около 65°, тогда как американские «Explorer-1, -3» имели около 33° (рис.1). Информация с советского аппарата передавалась каждый день с трех витков, проходящих над территорией СССР. «Спутник-2» совершал каждый день 14 оборотов вокруг Земли, период обращения составлял 103 мин, на каждом витке аппарат смещался по долготе на 26°, так что витки покрывали всю поверхность Земли. Передатчики на «наших» витках работали непрерывно, но их сигнал регистрировался советскими приемными станциями, расположенными только в пределах границ страны, а поскольку запоминающих устройств на спутнике не было, данные с остальной, большей, части витков были нам недоступны. На остальных 11 витках спутник молчал.

Как потом стало ясно, это несовершенство эксперимента лишило нас очень важной информации, фактически приоритета обнаружения повышенной радиации на больших высотах над значительной частью поверхности Земли.

На «Спутнике-2» было установлено два идентичных прибора, которые показывали практически одинаковые результаты, согласующиеся с имеющимися представлениями о потоках космических лучей на различных широтах и высотах до 300–600 км. Было ощущение полного восторга: все отлично работает и дает ожидаемый результат. Но 7 ноября 1957 г. на одном из витков были зарегистрированы флуктуационные возрастания скоростей счета приборов (рис.2). Участок повышен-

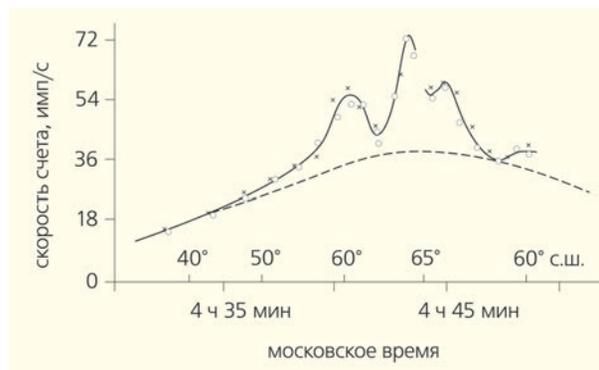
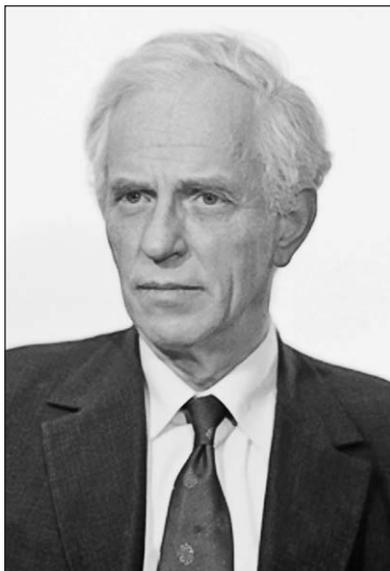


Рис.2. Данные «Спутника-2». Интенсивность космической радиации на одном из витков при пролете над северными районами СССР 7 ноября 1957 г. Как теперь ясно, это был сброс частиц из внешнего радиационного пояса во время слабого магнитного возмущения.

ного счета продолжался 13 мин и приходился на высокие геомагнитные широты (в районе перигея орбиты спутника, на высоте до 300 км). Мы пообсуждали различные, вплоть до фантастических, источники зарегистрированной повышенной радиации и остановились на протонах от слабой солнечной вспышки. Но в первой публикации результатов полета «Спутника-2» [1] даже этого сказано не было, упоминался только сам факт: надежно зарегистрировано 50%-е возрастание скорости счета приборов на одном из витков полета спутника на высоких широтах. То, что в статье не обсуждался обнаруженный эффект, можно объяснить узкой целенаправленностью наших устремлений: все, что в стороне от главного направления — изучения космических лучей, — откладывалось на потом... Все были перегружены «неотложными» проблемами, и мелкие неожиданности отвлекали внимание. Поэтому мы и ограничились вариантом солнечных космических лучей, которые в принципе могут проникнуть на высокие широты, особенно при возмущенном магнитном поле. О возможностях ускорения частиц в магнитосфере Земли серьезно не говорили, а о сбросе захваченных частиц даже не упоминали. Обнаруженное возрастание потока было небольшим, длилось недолго. Сильных вспышек в это время не наблюдалось, поэтому решили, что оно вызвано небольшой вспышкой на Солнце, о наличии которых к тому времени было уже хорошо известно.

Приборы Ван Аллена сразу после запуска оказались в экваториальных областях повышенной радиации, скорость счета частиц быстро нарастала и даже попадала в режим перегрузки, приборы зашкаливали, счетчики переставали работать. Ван Аллен с коллегами правильно интерпретировали ситуацию и зафиксировали наличие потоков радиации в экваториальных районах Земли на высотах, больших 500 км. О его докладе 1 мая 1958 г. [2] мы тогда не знали, в СССР эти результаты на первых порах стали известны только по краткой публикации в «Scientific American» (май 1958 г.); более подробные сведения приведены в работах [3–5]. В этих сообщениях, как и в советских, нет никакого упоминания о частицах, захваченных магнитным полем Земли. Авторы предполагали: зарегистрированные ими частицы имеют авроральное происхождение, проникая каким-то образом от высоких широт в экваториальную область.

Ошибочная интерпретация авторами первых измерений энергичных заряженных частиц на спутниках говорит о том, что обе группы, совет-



А.Е.Чудаков (1921–2001).

ская и американская, были не готовы к восприятию обнаруженного нового явления. Однако результаты, доложенные Ван Алленом, всколыхнули научную общественность, начались бурные обсуждения в различных научных коллективах, в основном на Западе (в Советский Союз в те времена информация, даже чисто научная, просачивалась с трудом). Результаты же полета «Спутника-2» стали известны специалистам только в июне 1958 г. (когда вышла статья [2]), да и то в основном русскоязычным читателям. Такое катастрофическое отставание в популяризации своих достижений было характерно для советского периода, оно объясняется рядом причин, среди которых секретность стоит не на последнем месте.

Важный этап в понимании нового явления приходится на май 1958 г., когда был запущен наш «Спутник-3». На нем установили более информативный по сравнению с предыдущим прибор для изучения радиации в космосе. Необходимость такой модификации осознал А.Е.Чудаков. Он усомнился, что зарегистрированное на «Спутнике-2» возрастание обусловлено протонами. Счетчик там находился под алюминиевым кожухом и оболочкой аппарата общей толщиной $\approx 2\text{--}3$ г/см², и до него, по идее, могли добраться лишь протоны с энергией $>30\text{--}50$ МэВ. Для солнечных событий небольшой мощности такие протоны маловероятны, а электроны не очень больших энергий (≤ 1 МэВ) тоже тормозятся, не достигают счетчика. Их тормозное излучение счетчиком хотя и регистрируется, но с очень малой эффективностью. Получается, что мы засекали космические лучи (энергичные протоны) и небольшое добавочное число тормозных квантов от значительного потока электронов с энергией < 1 МэВ.

Чтобы проверить эту гипотезу, для уже почти готового научного аппарата был срочно подготовлен минимально экранированный сцинтилляционный счетчик (кристалл NaJ(Tl) размером 40×40 мм), место для которого выкроили снаружи спутника. Так как этот счетчик был установлен «вдогонку», в уже скомпонованную конструкцию, информацию о потоках частиц с него пришлось транслировать через сигнальный радиопередатчик «Маяк», который на первых спутниках передавал только «бип-бип-бип». В полете «Спутника-3» модулированный радиосигнал «Маяка» уже нес полезную информацию нашего прибора. Регистрировались скорости счета энерговыделений в кристалле счетчика, больших 35 кэВ, и полная ионизация в кристалле фотоумножителя сцин-

тилляционного счетчика позволяла оценивать среднюю ионизацию частиц в кристалле, т.е. в какой-то степени судить о природе детектируемых частиц. Отметим, что на всех первых американских спутниках («Explorer-1, -3, -4») определение природы частиц не проводилось.

Сигнал «Маяка» мог приниматься по всему земному шару — как в полярных широтах, так и в экваториальных районах — простейшими, даже радиоловительскими, станциями. Обработка записей нескольких приемников, расположенных в разных точках планеты, позволила установить, что повышенная радиация наблюдается в двух различных областях: экваториальной и высокоширотной зонах. Кроме того, оказалось, что выделенные зоны сильно различаются не только по расположению в пространстве, но и по составу частиц. Экваториальная зона занимает интервал в пределах меньше 45° северной и южной широты и заполнена в основном протонами со средней энергией около 100 МэВ, тогда как приполярная располагается выше 45° северной и южной геомагнитной широты и содержит электроны с энергией около 100 кэВ. Позднее, как уже упоминалось, эти зоны назвали внутренним и внешним радиационными поясами Земли.

Дальнейшее изучение внутреннего и внешнего поясов показало их существенное различие, разную природу, пространственные и временные характеристики. Самое важное отличие — стабильность структуры поясов и их источников. Частицы внутреннего пояса — протоны, их источник стабилен: это космические лучи; источники электронов внешнего пояса разнообразны, чаще всего это ускоренные частицы в самой магнитосфере, во время магнитных бурь, связанных с солнечной и геомагнитной активностью [6–8].

Проведенные исследования и их обсуждение на различных собраниях ученых подкреплялись новыми экспериментами в космосе. Результаты спутника «Explorer-4», траектория которого уже частично захватывала внешний радиационный пояс (наклон плоскости орбиты у экватора составлял 51°), подтвердили существование двух зон повышенной радиации, разделенных небольшой щелью [9].

Следующий важный этап в понимании природы обнаруженной радиации — эксперимент «Argus». Для заполнения ловушки частицами использовался ядерный взрыв в верхних слоях атмосферы Земли. Возникший тонкий пояс захваченных частиц существовал несколько недель — его регистрировал «Explorer-4». Операцию «Argus» можно рассматривать как заключительный эксперимент, проявивший в общих чертах феномен существования захваченной радиации в магнитосфере Земли. Последующие эксперименты и теоретические исследования были нацелены на детальное изучение радиационных поясов, о чем имеется обширная литература, например [10–13].

От гипотез к осмыслению нового явления

Процесс понимания новых результатов, полученных на первых спутниках, любопытен сам по себе и важен для осмысленной расстановки акцентов в приоритетах открытия радиационных поясов.

В последние перед открытием радиационных поясов годы ученые уже понимали, что полярное (а иногда и более южное) свечение ночного неба вызвано заряженными частицами, возбуждающими атомы атмосферы Земли. Естественно, подозрение пало на Солнце, так как приход частиц от него к тому времени был уже установлен. Чтобы проследить траекторию движения солнечных частиц в магнитном поле Земли, проводились многочисленные расчеты.

Норвежский ученый К.Стёрмер вычислял траектории входящих в магнитное поле Земли солнечных и космических лучей [14]. Он обнаружил, что в земном поле возможны замкнутые траектории, но не обратил на них внимания, поскольку расчеты запрещали заряженным частицам попадать в область этих траекторий извне. Возможный источник — нейтроны — не рассматривался, хотя нейтроны могли свободно залетать в найденные каверны и, распадаясь там на протоны и электроны, заполнять их. Помимо космических лучей Стёрмер занимался и проблемами геофизики, в его работах говорится о магнитном отражении заряженных частиц, приходящих от Солнца, и о существовании периодических траекторий в магнитном поле Земли. Это не совсем то, что рисуют сейчас, иллюстрируя движение частиц внутри каверны с отражением их на севере и юге (рис.3), но в обсуждениях на V Ассамблее МГГ книга Стёрмера [15] и его численные результаты были упомянуты много раз, и концепция устойчивого захвата обсуждалась, может быть, впервые на международной конференции. Сегодняшний просмотр работ Стёрмера показывает, что он многое подготовил для правильного понимания геомагнитных явлений.

Предположения о стабильном захвате частиц в магнитном поле Земли было также выдвинуто Н.Кристофилосом еще в 1957 г., но соответствующие работы не публиковались до 1959 г. [16, 17], по-видимому, из-за секретности — в связи с подготовкой проекта «Argus», инициатором которого он был. До этого проекта Кристофилос работал с установками для получения управляемых термоядерных реакций и распространил идею удержания частиц в магнитных ловушках лабораторных размеров на масштабы Земли. Он предположил, что магнитное поле Земли способно захватывать и удерживать энергичные частицы и что ядерный взрыв может служить приемлемым источником для заполнения геомагнитной ловушки частицами. И действительно, «Explorer-4» зарегистрировал пояса частиц, образованных в результате каждого из трех взрывов операции «Argus». Наиболее



К.Стёрмер (1874–1957).



Н.Кристофилос (1916–1972).



Ф.Сингер (р.1924).

интересным результатом этих взрывов было появление частиц на магнитной оболочке с $L = 2$ (L — расстояние магнитной оболочки от центра Земли в экваториальной плоскости, выраженное в радиусах Земли), сохранявшейся устойчивой в течение нескольких недель. Искусственные пояса имели поперечные размеры около 100 км, они не дрейфовали по радиусу, расширение их было незначительным (рис.4). Результаты операции «Argus»

опубликованы в августе 1959 г. [17] и в более поздней книге Кристофилоса [18].

В 1957 г. Ф.Сингер (США) для объяснения магнитных бурь предположил, что главная фаза бури обусловлена долготным дрейфом частиц, захваченных магнитным полем Земли [19]. Эта идея уже содержала некоторые представления, которыми сейчас описываются основные явления в радиационных поясах Земли.

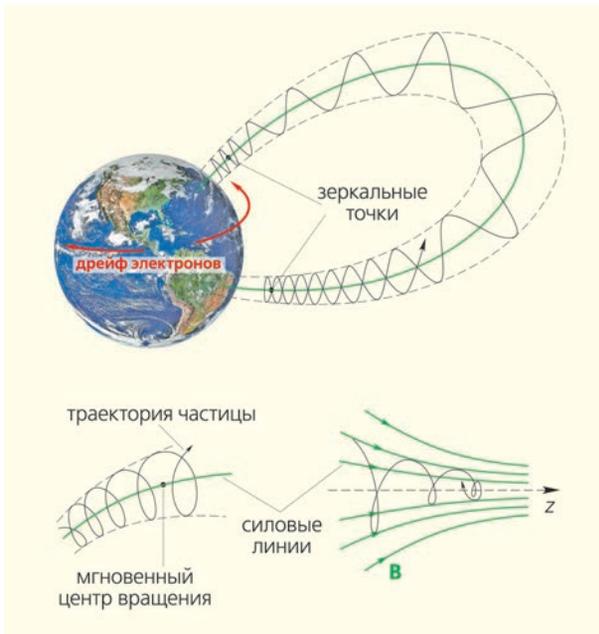


Рис.3. Траектории частиц, захваченных в ловушку магнитного диполя Земли. Движение заряженной частицы в геомагнитной ловушке (вверху). Внизу показаны траектория перемещения частицы по спирали на силовой линии магнитного поля (слева) и процесс отражения частицы в сильно неоднородном магнитном поле (магнитная пробка, справа).

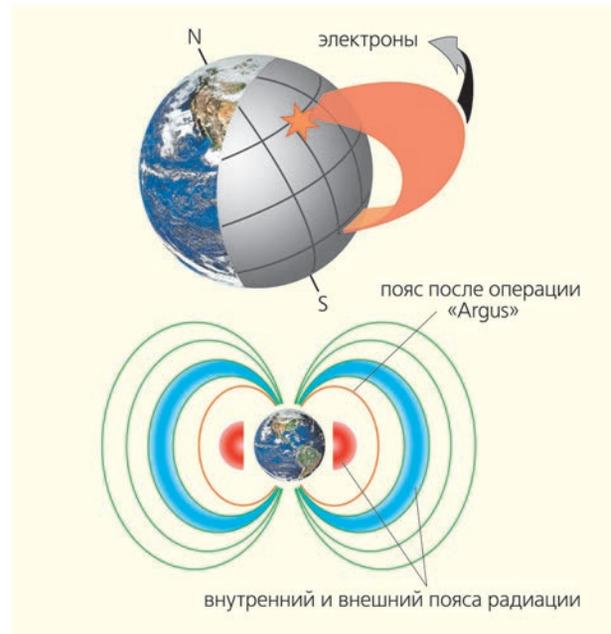


Рис.4. Движение частиц после их импульсной инъекции в магнитное поле Земли. Начальный период долготного дрейфа частиц после атомного взрыва (вверху). Электроны дрейфуют в одну сторону, протоны (и другие положительно заряженные частицы) — в другую. Примерное расположение пояса электронов после операции «Argus» (внизу).

Приведенные примеры показывают: к 1957 г. были группы исследователей, в основном геофизиков, которые серьезно обсуждали природу частиц в магнитосфере Земли для объяснения полярных сияний, выясняли траектории солнечных и космических частиц в магнитном поле Земли и были готовы к восприятию новых открытий. Исследователи космических лучей (Вернов и Ван Аллен) этими вопросами не занимались, и успехи геофизиков были им неизвестны. Разобщенность геофизиков и физиков-космиков — одна из причин непонимания полученных последними результатов.

Первые же тесные встречи-обсуждения с участием специалистов разного профиля произошли в июле 1958 г. в Москве во время V Ассамблеи МГТ, где присутствовали ученые США (Е.Рэй, Ф.Сингер и др.) и СССР (С.Н.Вернов, А.Е.Чудаков, С.Л.Мандельштам, В.И.Красовский и др.). На специально организованных лекциях коллеги-сотрудники Ван Аллена и Вернов с Чудаковым сделали доклады о результатах полетов всех спутников Земли («Спутника-2», «Explorer-1 и -3» и «Спутника-3»). Результаты этих экспериментов были не только поняты и приняты научной общественностью, но и сразу подтверждены операцией «Argus» и измерениями искусственно созданных поясов спутником «Explorer-4» [20].

На ассамблее обсуждалась и количественно анализировалась идея, что протоны внутреннего пояса появляются в процессе распада нейтронов, образующихся при реакциях взаимодействия высокоэнергичных частиц космических лучей с ядрами атомов атмосферы Земли и вылетающих из нее (их назвали нейтронами альbedo космических

лучей). При распаде нейтронов образуются протоны и электроны, которые попадают в магнитную ловушку и захватываются там (рис.5). В СССР эта гипотеза впервые прозвучала на семинаре в Физическом институте АН СССР уже 6 июня 1958 г., когда Вернов рассказывал о расчетах по нейтронному источнику протонов*. На V ассамблее МГТ доклад был повторен. Докладывали на эту тему и другие исследователи — Ф.Сингер и П.Келлог. С.Н.Вернов и А.Е.Чудаков представили также доклады на X съезде Международного астрономического союза (Москва, август 1958 г.) и на 2-й Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, сентябрь 1958 г.) [6].

Первая публикация по протонам от распада нейтронов альbedo принадлежит, по-видимому, Сингеру [21]. И это несмотря на то, что Вернов рассматривал идею нейтронов альbedo на две недели раньше Сингера, как известно из переписки М.И.Панасюка с Сингером, где тот признает первенство Вернова**. Потом были и другие публикации, например [22, 23].

Таким образом, можно констатировать, что к концу лета 1958 г. научное сообщество узнало о существовании вокруг Земли областей повышенной радиации и о том, что эта радиация разделена на две зоны, внутреннюю (экваториальную) и внешнюю (приполярную). Внутренняя зона заполнена в основном протонами с энергией 100 МэВ, внешняя — электронами с энергией от 100 кэВ. Было установлено, что эти частицы захвачены магнитным полем Земли, и найден возможный источник наполнения поясов частицами — распад нейтронов альbedo космических лучей. Существенно, что захват и длительное удержание частиц были сразу подтверждены искусственными радиационными поясами в операции «Argus». Возникшее на V ассамблее МГТ очень удачное название открытого явления — «радиационные пояса Земли» — в печати, вероятно, впервые появилось в работах Сингера [21], опубликованных почти сразу после окончания конференции.

О приоритете и сотрудничестве

До сих пор в истории физики стоит вопрос: кого же считать автором открытия радиационных поясов Земли? Суммируем различные сведения и соображения, которые могут помочь составить некоторое представление о вкладе различных групп и отдельных ученых в обнаружение и объяснение этого явления.

Прежде всего — о самом открытии. Оно не могло не произойти, будучи таким же неизбежным, как

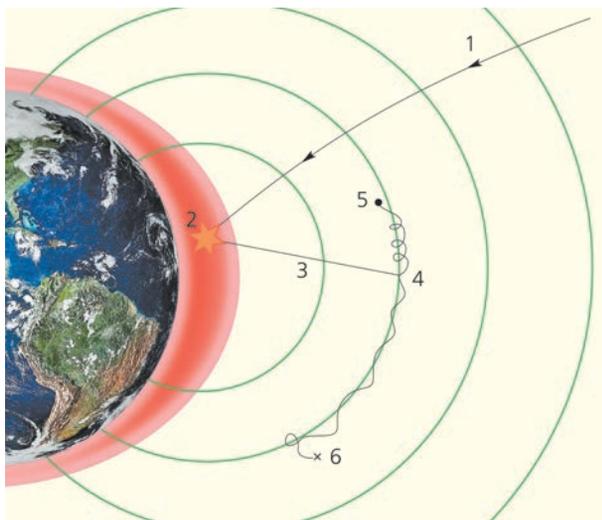


Рис.5. Нейтронный источник протонов во внутреннем поясе (нейтронное альbedo). Модель образования внутренней зоны радиации: протоны галактических космических лучей (1) испытывают столкновения в атмосфере (2) и рождают нейтроны (3), которые, выходя из атмосферы, распадаются (4), создавая захваченные электроны (5) и протоны (6).

* Доклад С.Н.Вернова «Возможный механизм создания “земного излучения” под действием космических лучей» на семинаре ФИАН 6 июня 1958 г. Текст доклада существует.

** М.И.Панасюк, частное сообщение.

открытие Америки. Развитие ракетной техники, вызванное общим прогрессом, а не только политическими и военными запросами, неминуемо привело бы к попаданию приборов в области повышенной радиации, и кто первый залетел бы туда, тот и открыл бы. Но просто попасть в пояса радиации недостаточно, нужно зарегистрировать потоки частиц и понять, что именно зарегистрировано...

В нашем случае ситуация оказалась несколько сложнее: столкнулись с поясами одни исследователи, а разгадали эффект другие.

Первыми обнаружили частицы поясов в СССР, вторыми в США, но никто сначала не понял природу явления. Мы зарегистрированные частицы сочли солнечными, а не магнитосферными и не сразу уделили им должное внимание. Потом исправились, решили подробнее исследовать обнаруженный казус и на «Спутник-3» поставили прибор, решивший эту проблему. Американцы тоже сначала заподозрили Солнце, впрыснувшее частицы в полярные районы, где раньше Ван Аллен наблюдал что-то подобное [24]. Правда, для переноса частиц от полюсов к экватору механизма не нашлось... Причина недоразумений — сосредоточенность мыслей на одной задаче — изучении космических лучей. Проблем геофизики для физиков-космиков просто не существовало, мысли были далеко и высоко, а магнитное поле Земли было помехой, хотя иногда оно и использовалось как магнитный спектрометр, помогавший определить энергетический спектр и состав космических лучей [25]. Может быть, виновата загруженность другими проблемами. Трудно поверить, что физикам-космикам не хватало знаний предшествующих исследований по траекториям частиц в магнитном поле Земли.

Доклад Ван Аллена 1 мая 1958 г. [2], возбудивший научное общество, стал толчком к пониманию процессов в геомагнитном поле. Результаты и обсуждения предшествующих исследований позволили уже ко времени открытия V ассамблеи МГТ в июле 1958 г. сформулировать концепцию захвата и удержания частиц в магнитном поле Земли. И в своей специальной лекции на ассамблее Вернов и Чудаков рассказывали о внешнем поясе, о составе частиц в обоих поясах, о границах поясов. В докладе же от группы Ван Аллена не было даже упоминаний о стабильных потоках захваченных магнитным полем частиц, говорилось только об обнаруженной ими «радиации». Вероятно, его сотрудники-докладчики не осознали природы нового явления и не успели или не решились в отсутствие руководителя (Ван Аллена на ассамблее не было) перестроиться...

Обоснованно ли именовать Ван Аллена автором открытия радиационных поясов? Почему сложилось подобное мнение? Причин несколько.

Прежде всего, Ван Аллен первым широко оповестил о своих результатах, затем последовало много публикаций, хотя нигде до полета «Explorer-4» по реальной физике явления он не высказывался. Ис-

тинную природу феномена поняли другие. Работа Ван Аллена с уже установившейся терминологией была опубликована лишь в конце 1959 г. [26]. Данные СССР нигде за границей до июля 1958 г. не докладывались, первая публикация была представлена в печать только 4 мая 1958 г. Результаты «Спутника-3» международная общественность узнала тоже только на V ассамблее МГТ.

Вторая причина — неосведомленность исследователей о работах в смежных областях науки. Основное внимание уделялось космическим лучам. В 1958 г. под руководством Вернова велись работы на ШАЛ-установке в МГУ (исследовались так называемые широкие атмосферные ливни частиц), создавалась большая ШАЛ-установка в Якутске, проводились опыты на Памире, наблюдения на шарах-зондах и многие другие исследовательские работы. Такое обилие экспериментов и привело к потере ориентации, не было сразу нащупано главное направление исследований, осознание ситуации пришло позднее. Когда все устоялось, Вернов признал: «Если бы физики в то время знали больше о геофизике и геофизики лучше знали физику, мы могли бы сделать гораздо больше открытий».

Третья причина — изолированность СССР, плохая связь и недостаточный обмен информацией с зарубежными учеными. Этому состоянию способствовала напряженность отношений с США и секретность, связанная со всем, что касалось военно-промышленного комплекса, поставляющего ракеты-носители. Не исключено, что запоздалая публикация результатов «Спутника-2» была вызвана согласованием материалов статьи с соответствующими инстанциями. Может быть, поэтому статья и попала в журнал только 4 мая 1958 г., хотя в тот день все соавторы уже около двух недель были на полигоне, готовили к запуску «Спутник-3» и физически не могли сами послать статью в журнал.

Все вместе привело к тому, что Вернов со своими спутниковыми результатами просто не был известен широкой научной и массовой общественности, тогда как Ван Аллен — у всех на слуху и в блеске новых перспективных исследований. Естественно, научная общественность и признала последнего автором открытия радиационных поясов Земли. А вы кому бы отдали пальму первенства в этих условиях?

В заключение хотелось бы все-таки зафиксировать, что, несмотря на споры о приоритетах обнаружения радиационных поясов Земли, открытие внешнего радиационного пояса безусловно принадлежит СССР. Внешний пояс был впервые зарегистрирован на «Спутнике-3», сообщение на V ассамблее МГТ было сделано, когда данных с американского «Explorer-4», который тоже залетал во внешний пояс, еще не было. Повторим, что «Спутник-3» получил очень важные результаты: определил природу частиц внешнего пояса (электроны с энергией 100 кэВ), установил внутреннюю и внешнюю границы внешнего радиацион-

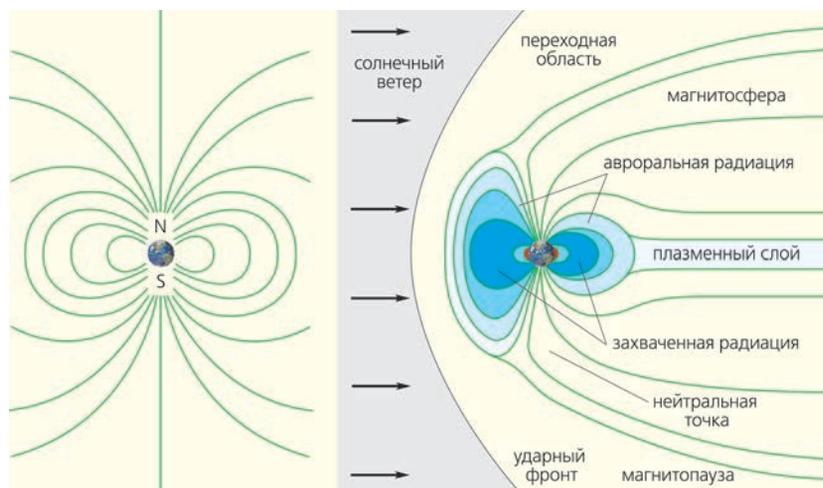


Рис.6. Представление об околоземном пространстве до (слева) и после (справа) открытия радиационных поясов Земли.

ного пояса, его изменчивость под действием геомагнитной активности, положения максимумов интенсивности частиц. Для внутреннего пояса «Спутник-3» также нашел состав частиц, его границы на всех долготах в Северном и Южном полушариях по всему земному шару. Таких данных о внешнем поясе к моменту V ассамблеи еще ни у кого не было. Конечно, открытие внешнего пояса в определенной степени вторично, но тем не менее это достойный результат.

Вообще-то у СССР был шанс первым открыть радиационные пояса Земли. Вот выдержка из воспоминаний Сингера, опубликованная в сборнике ИКИ к 50-летию запуска «Спутника-1» [27].

Вернов потерял право первооткрывателя радиационного пояса из-за секретности русских. Частицы радиационного пояса были зарегистрированы в эксперименте Вернова на «Спутнике-2» на шесть месяцев раньше, чем их зарегистрировал прибор Ван Алена на «Explorer-1». Однако эллиптическая орбита «Спутника» значительно проникла в пояс лишь в Южном полушарии, а русские ни с кем не стали делиться телеметри-

ческим кодом (Прим. автора: С.Н.Вернов этого кода не знал, передачу вели другие службы, и код был засекречен). Во время Конгресса по космическим лучам в Москве в 1959 г. в гостиничном номере (по-моему, это было в гостинице «Москва») профессор Гарри Мессел, известный исследователь космических лучей и глава Физической школы в Университете Сиднея, рассказал мне, как все происходило. Он записывал сигнал со «Спутника-2» каждый раз, когда тот пролетал над Австралией, однако кода ему не дали. Когда же они наконец попросили у него копию записанных данных, он послал их к черту (как это мог сделать только Гарри Мессел).

Гарри, украинец из Канады, рассказывал эту историю с большим юмором. Конечно, если бы они получили данные наблюдений вплоть до апогея орбиты «Спутника-2», расположенной на высоте 1680 км, сомнений бы не осталось.

Есть и другие «если бы». Они связаны даже не столько с секретностью, сколько с необычайной срочностью проведения всех работ. Можно пожалеть о нашей близорукости, но ведь легко судить задним числом о том, как бы надо было сделать. И все-таки за три месяца обсуждений ученые всего мира смогли понять новое явление природы. Изучение радиационных поясов Земли показало важность совместных работ и бесперспективность разобщенности. Каким было наше представление о магнитном поле Земли и окружающем Землю пространстве до открытия радиационных поясов и какова реальная картина, известная в настоящее время, демонстрирует рис.6.

Но самое главное — полет первых спутников указал путь к дальнейшему прогрессу науки. Был сделан начальный шаг к полному освоению Солнечной системы и, помечтаем, Вселенной. ■

Литература / Reference

1. Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Логачев Ю.И., Чудаков А.Е. Измерения космического излучения на искусственном спутнике Земли. Доклады АН СССР. 1958; 120(6): 1231–1233 и Сб. «Искусственные спутники Земли». 1958; 1: 5–8. [Vernov S.N., Grigorov N.L., Logachev Yu.I., Chudakov A.E. Measurements of the spaceradiation on the Earth's artificial satellite. Doklady AN SSSR. 1959; 120(6): 5–8. (In Russ..)]
2. Van Allen J.A. Transcript of 1958 lecture, I.G.Y. Satellite Rep. 1961; 13.
3. Van Allen J.A., Ludwig G.H., Ray E.C., McIlwain C.E. Preliminary reports: Satellites 1958 Alpha and 1958 Gamma. Trans. Amer. Geophys. Union. 1958; 39(4): 767–769.
4. Van Allen J.A., Ludwig G.H., Ray E.C., McIlwain C.E. Preliminary reports: Satellites 1958 Alpha and 1958 Gamma. IGY Satellite Rep. Ser. 1958; 3: 73–92.
5. Van Allen J.A., Ludwig G.H., Ray E.C., McIlwain C.E. Observation of high intensity radiation by satellites 1958 alpha and gamma (Explorers I and III). Jet Propulsion. 1958; 28(9): 588–592.
6. Вернов С.Н., Чудаков А.Е. Изучение космических лучей с помощью ракет и спутников в СССР. Труды 2-й Международной. конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958). М., 1959;

- 1: 267–271. [Vernov S.N., Chudakov A.E. The study of cosmic rays with rockets and the satellites in the USSR. Proceedings of the 2nd International conference on the peaceful uses of atomic energy (Geneva, 1958). Moscow, 1959; 1: 267–271.]
7. Vernov S.N., Chudakov A.E. Terrestrial corpuscular and cosmic rays. Space Research. H.Kallmann Bijl (eds). Amsterdam, 1960; 751–796.
 8. Vernov S.N., Vakulov P.V., Gorbakov E.V. et al. Study of the cosmic-ray soft component by the 3rd Soviet Earth satellite Planet and Space Science. 1959; 1(2): 86–93.
 9. Van Allen J.A., McIlwain C.E., Ludwig G.H. Radiation observations with satellite 1958-e. J. Geophys. Res. 1959; 64(2): 271–286.
 10. Hess W.N. The Radiation Belt and Magnetosphere. Blaisdell Publishing Company, 1968.
 11. Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М., 1968. [Tverskoy B.A. Dynamics of the Earth's Radiation Belts. Moscow, 1968. (In Russ.)]
 12. Шабанский В.П. Явления в околоземном пространстве. М., 1972. [Shabanskiy V.P. Phenomena in near-earth space. Moscow, 1972. (In Russ.)]
 13. Gombosi T.I., Baker D.N., Balogh A. et al. Anthropogenic space weather. Space Sci. Rev. 2017. DOI 10.1007/s11214-017-0357-514.
 14. Stormer C. On the trajectories of electric particles in the field of magnetic dipole with applications to the theory of cosmic radiation. Astrophysics. 1930; 1: 237.
 15. Stormer C. The Polar Aurora. Cambridge, 1955.
 16. Christofilos N. The Argus experiment. Proc. Natl. Acad. Sci. 1959; 45: 1144–1152.
 17. Christofilos N.C. The Argus experiment. J. Geophys. Res. 1959; 64(8): 869–875.
 18. Christofilos N. Sources of Artificial Radiation Belts. Radiation Trapped in the Earth's Magnetic Field. D. Reidel, Holland, 1966.
 19. Singer S.F. A new model of magnetic storms and aurorae. Trans. Amer. Geophys. Union. 1957; 38: 175.
 20. Van Allen J.A., McIlwain C.E., Ludwig G.H. Satellite observations of electrons artificially injected into the geomagnetic field. J. Geophys. Res. 1959; 64(8): 877–891.
 21. Singer S.F. Trapped albedo neutron theory of the radiation belt. Phys. Rev. Lett. 1958; 1: 181–183.
 22. Kellogg P.J. Possible explanation of the radiation observed by Van Allen at high altitude In satellites. Nuovo Cimento. 1959; 11(1): 48–66.
 23. Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Иваненко И.П. и др. Возможный механизм создания «земного корпускулярного излучения» под действием космических лучей. Доклады АН СССР. 1959; 124(5): 1022–1025. [Vernov S.N., Grigorov N.L., Ivanenko I.P. et al. The possible mechanism of creation of «terrestrial corpuscular radiation» under the action of cosmic rays. Doklady an SSSR. 1959; 124(5): 1022–1025. (In Russ.)]
 24. Van Allen J.A. Direct detection of Auroral radiation with rocket equipment. Pric. Nat. Acad. Sci. 1957; 43: 57–62.
 25. Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Добротин Н.А. и др. Определение знака заряда первичных частиц космических лучей по измерениям азимутальной асимметрии в стратосфере в районе экватора. Доклады АН СССР. 1949; 68: 253–255. [Vernov S.N., Grigorov N.L., Dobrotin N.A. et al. Determination of the sign of the charge the primary particles of cosmic rays by measuring azimuthal asymmetries in the stratosphere near the equator. Doklady AN SSSR. 1949; 68: 253–255. (In Russ.)]
 26. Van Allen J.A. The geomagnetically trapped corpuscular radiation. J. Geophys. Res. 1959; 64: 1683–1689.
 27. Ф.Сингер. Эпоха до запуска спутника и его ранние открытия. Первая космическая... М., 2007: 216–223. [F.Singer. The era before the satellite launch and its first discoveries / The first space... Moscow, 2007: 216–223. (In Russ.)]

Earth's Radiation Belts: Discovery and First Explorations

Yu.I. Logachev

Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

Unexpected discovery of radiation belts around the Earth resulted in a number of new hypotheses explaining movements of charged particles in magnetic fields, as well as re-analyses of the existing beliefs. Attempts were made to relate the new discovery with well-known natural phenomena such as polar aurora, geomagnetic storms, and solar energetic particles. As expected, these research efforts led to the truth (particles captured by the magnetic field of the Earth are indeed related to the abovementioned phenomena), and within just one month the nature of the new discovery became quite clear. Who were the main contributors to unveiling the mystery of the new phenomenon and why the discovery was named after just one of the participating scientists?

Keywords: «Sputnik-1», «Sputnik-2», Earth's external and internal radiation belts.

Спутник: шестьдесят лет по дороге открытий

Л.М.Зеленый

Институт космических исследований РАН (Москва, Россия)

В рамках празднования шестидесятилетия наступления космической эры Российская академия наук и Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос» 3–4 октября провели Международный форум «Спутник: шестьдесят лет по дороге открытий». В подготовленном специально для читателей «Природы» тексте изложены основные тезисы выступления автора. Как дерзкая мечта воплотилась в жизнь, как Спутник стал не только техническим, но и культурным явлением, что последовало за ним и какие эксперименты нас ожидают в будущем? Полный вариант доклада будет опубликован в сборнике трудов форума, который планируется к изданию в 2018 г.

Ключевые слова: первый спутник, космические исследования, Федеральная космическая программа России, планетные исследования, Солнечная система, магнитосферные исследования, астрофизика, Луна, Марс, Венера, международное сотрудничество, космос.

Третьего-четвертого октября весь мир, и в том числе Российская академия наук, отмечали шестидесятилетие со дня запуска первого искусственного спутника Земли, «Спутника-1», как его называют за рубежом. С этого дня (даже с точного времени 22:28:34 04.10.1957 по Москве) отсчитывают космическую эру человечества, в которой космосу принадлежит огромная роль: и в быту, и в науке, и в культуре, во всем мировоззрении человечества.

Один из интересных вопросов сегодня: что стало основой успеха СССР в космосе, хотя в 1950-х годах наша страна не была одной из самых развитых индустриальных держав? Что стало движущей силой — требования обороны или мечта? И что стоит за современными космическими исследованиями?

Мечта, теория, воплощение...

В России еще задолго до революции возникло такое явление, как философия русского космизма. К ее представителям относятся Николай Федорович Федоров, Николай Александрович Морозов, отчасти академик Владимир Иванович Вернадский, Александр Леонидович Чижевский и, безус-



Лев Матвеевич Зеленый, академик, доктор физико-математических наук, директор Института космических исследований (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.

ловно, Константин Эдуардович Циолковский. Именно последний был тем, кого мы бы сегодня назвали визионером: он планировал будущее человечества исходя из того, что люди не останутся вечно на Земле. Вместе с тем Циолковский много занимался техническими вопросами, стал одним из основоположников практической космонавтики и одним из первых заговорил об искусственных спутниках Земли. Эта его «визионерская» работа повела в космос многих людей из поколения Сергея Павловича Королева, его старших коллег, которые фактически на голом энтузиазме начали разрабатывать в 1920–1930-х годах в Советском Союзе ракетные двигатели. Достаточно вспомнить энтузиастов Группы изучения реактивного движения (ГИРД), которую возглавлял в 30-х годах Фридрих Артурович Цандер. Ее члены и стали основными разработчиками советской ракетной техники. В шутку они расшифровывали на-

звание своей организации как «Группа инженеров, работающих даром».

Кроме Циолковского и Королева, роль которых хорошо известна, надо вспомнить о математике, академике, вице-президенте и президенте Академии наук СССР Мстиславе Всеволодовиче Келдыше. Еще когда я учился в школе, об их работах в космонавтике никто толком ничего не знал. Имя Королева вообще не упоминалось, он был «зашифрован» как «главный конструктор», а Келдыш, хотя и был гораздо более публичной фигурой, но до определенного момента не ассоциировался с космической деятельностью, в газетах фигурировал лишь безымянный «главный теоретик космонавтики». Их содружество, их работы действительно дали науке очень много. К сожалению, узнали мы об этом только после их ухода из жизни.

Математик Келдыш, инженер Королев, но как же без физики?! И физики тоже поучаствовали в становлении отечественной космонавтики; известно, что ракетостроение стало развиваться для того, чтобы обеспечить средства доставки ядерных зарядов на территорию «вероятного противника». Но для таких целей не были нужны столь мощные ракеты, какой была Р-7. В мемуарах академика Андрея Дмитриевича Сахарова я нашел очень интересный материал: трижды Герой Социалистического Труда и «отец водородной бомбы», а позже один из главных диссидентов и противников советской власти в 1950-х годах занимался расчетами термоядерного устройства.

В частности, он рассчитывал массу термоядерного заряда, под который «подгонялась» масса ракеты. По его первоначальным расчетам бомба получалась очень тяжелой, около 5 т, и вот под такую огромную бомбу стали делать ракету, знаменитую Р-7. Потом оказалось, что он сильно преувеличил в своих расчетах требуемую массу, но ракета уже была сделана, и ее мощности оказалось достаточно, чтобы вывести в космос первый спутник, а потом и корабль Юрия Гагарина, и в целом она оказалась востребованной именно для космонавтики, не только для оборонных целей. И Борис Евсеевич Черток, «правая рука Королева», пишет об этом: «Я не могу судить о том, в какой мере Андрей Сахаров лично определил конструкцию заряда, но, безусловно, именно то, что делал Сахаров, потребовало создания такой мощной ракеты, какую мы разработали под шифром Р-7. И имя Сахарова тоже должно упоминаться в истории космонавтики!». Ошибка гениального человека может дать полезный результат! Первый успешный старт ракеты Р-7 состоялся в августе 1957 г., всего за несколько месяцев до запуска первого спутника.

Вся эта работа делалась на оборонном предприятии и была строго засекречена. Но 1955 г. — время после смерти Сталина, когда в Советском Союзе уже появилась определенная открытость, и по личной инициативе генерального секретаря Н.С.Хрущева было решено, что СССР примет учас-

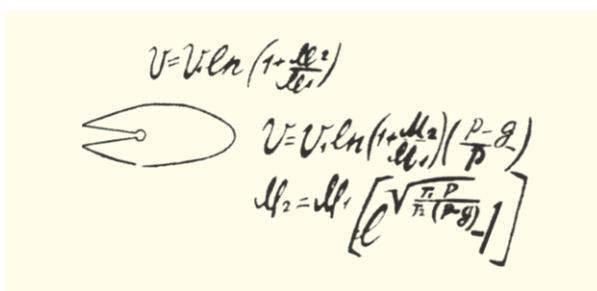
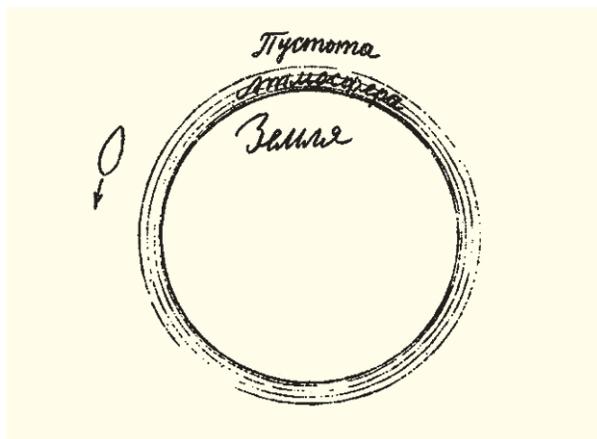


Схема движения искусственного спутника Земли и формула Циолковского (автограф).

тие в проведении Международного геофизического года (он планировался на 1957–1958 гг.) и, в частности, выведет в космос искусственный спутник Земли с «научной аппаратурой для исследования физических свойств околоземного космического пространства». Политические и оборонные цели совпали с научными. В одном из документов есть фраза: «...разрешить Академии наук провести в открытом порядке подготовительные



М.В.Келдыш и С.П.Королев.



А.Д.Сахаров и И.В.Курчатов.

работы по привлечению радиолюбителей и астрономов добровольных обществ и обсерваторий для наблюдения за полетом Спутника». Иными словами, с самого начала космическая деятельность понималась в контексте международного сотрудничества и пропаганды науки.

Но объявление, что в рамках Международного геофизического года СССР собирается запустить

искусственный спутник Земли, никто не воспринял тогда всерьез, потому что наша страна все еще оставалась в очень сложном экономическом положении после конца Великой Отечественной войны. К запуску готовились и в США, поэтому мировая общественность ждала результатов скорее из-за океана.

Старт «космической гонке» был дан. В СССР строился тяжелый аппарат с большим комплексом научной аппаратуры (научной программой руководила Академия наук, председателем был тогда еще вице-президент Келдыш), но его не успевали сделать к осени 1957 г., а время не ждало — были сведения, что в США аппарат к запуску готов. Поэтому уже в середине 1957 г. было принято решение

отложить намеченный запуск тяжелого научного спутника (он был запущен позже, 15 мая 1958 г., третьим) и сделать «простейший» аппарат массой всего несколько десятков килограммов. Эта идея Королева была одобрена ЦК партии.

Главным прибором первого спутника был радиопередатчик, передававший знаменитые сигналы «бип-бип-бип». Его сделал Константин Иосифович Грингауз, ставший в будущем сотрудником ИКИ (ИКИ в то время еще не существовал), и именно он был последним человеком, чья рука коснулась Спутника.

Итак, первый спутник был запущен 4 октября 1957 г. с территории Казахстана, и он существовал на орбите несколько месяцев, пока в январе 1958 г. не сгорел в атмосфере, выполнив 1400 витков.

Сообщение ТАСС было опубликовано в «Правде» на следующий же день, но не представляло собой ничего особенного — материал стоял в одном ряду с другими. Видимо, советское правительство еще не до конца осознавало важность этого события. По контрасту с этим международный резонанс в тот же день поражает. Спутник оказался на первых полосах крупных зарубежных изданий. «New York Times» писала: «Советы запустили искусственный спутник...».

Кто-то тут же сочинил ехидное стихотворение:

*О маленький Спутник, летящий высоко,
С московским сигналом «бип-бип»,
Расскажи всему миру о том, что это небо
теперь принадлежит Коммунистам,
А дядюшка Сэм все проспал...*

Но американские коллеги (впрочем, тогда еще их так не называли), конечно, не спали, они тоже работали, и весьма серьезно. В США было некое соревнование между армией и военным флотом,

Общество по распространению политических и научных знаний РСФСР
Московский Дом научно-технической пропаганды
имени Ф. Э. Дзержинского
Москва, Цирк, ул. Карла, 7

10
МАРТА

ВОСКРЕСНОЕ ЧТЕНИЕ

10
МАРТА

**ЗНАЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ
ЗЕМЛИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ
ПРЕДСТОЯЩЕГО МЕЖДУНАРОДНОГО
ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ГОДА**

(Проводится совместно с секцией астрономии Центрального аэроклуба СССР)

С сообщениями выступают:

<p>1. Председатель секции астрономии Н. А. БАРБАРОВ Проблемы, подлежащие исследованию атмосферы Земли и космического пространства</p> <p>2. Заместитель председателя секции, доктор филозофических наук, профессор В. В. ДОБРОВАЛОВ Теоретические основы создания искусственных спутников Земли</p>	<p>3. Председатель Научно-технического комитета по реактивной технике, конструктор И. А. МЕРКУЛОВ Способы запуска и принципиальная конструкция искусственных спутников Земли</p> <p>4. Председатель Научно-технического комитета по космической медицине, кандидат биологических наук П. К. ИСАКОВ Условия пребывания подопытных животных на искусственных спутниках Земли</p>
---	--

Демонстрация научно-популярных кинофильмов

Вход свободный Начало в 12 час. Справки по телефонам: БФ-10-07 и К 5-93-13

Афиша популярной лекции в Московском доме научно-технической пропаганды 10 марта 1957 г.

делалось реально два аппарата, и после успеха СССР фактически приоритет был отдан проекту, который вел Вернер фон Браун, чего изначально американское правительство не очень хотело.

Полет второго спутника Земли, отправленного в космос через месяц после первого, уже активно освещался в газетах. Правительство быстро поняло громадную пропагандистскую роль исследований космоса, и последующие годы стали «золотыми» для космической науки, когда нашим предшественникам не было отказа в финансах, лишь бы они могли двигаться вперед.

Второй спутник тоже стал знаменитым — на нем в космос была отправлена собака Лайка. Она оказалась первым живым существом в космосе: многочисленные запуски с собаками и другими животными, проводившиеся до этого, выполнялись на геофизических ракетах, которые возвращались на Землю. Так начинались космические медицина и биология.

Академия наук подключилась к космической тематике практически с самого начала. Выше уже говорилось про подготовку приборов для третьего спутника; материалы, которые предоставили первые два, анализировали ученые Академии. Подписи на документах ставят Келдыш, Королев и Александр Николаевич Несмеянов — тогда президент Академии.

В мае 1958 г. отправился в полет третий спутник — тот самый, который должен был лететь первым. Это уже серьезный научный аппарат с большим количеством научных приборов. Примерно тогда же, но чуть раньше (31 января 1958 г.), наши американские коллеги запустили свой первый спутник — «Explorer-1», его конструктором был Джеймс Ван Аллен. Первое, что удалось сделать, — и это стало огромным успехом космической науки, который наши коллеги, а тогда соперники активно пропагандировали, — были обнаружены радиационные пояса Земли, области, где захватываются заряженные частицы с очень высокими энергиями. С этого результата и началась эпоха «великих космических открытий».

А спутник стал частью повседневной жизни, важной частью культуры. Проводились научные чтения, посвященные науке на первых космических аппаратах; множество людей выходило на улицы, чтобы понаблюдать за тем, как небо прочерчивает маленькая рукотворная звездочка. Само слово «спутник» стало жить своей жизнью и превратилось в имя нарицательное, без изменений вошло во многие языки. В английском языке на его основе появилось много новых слов. Так, например, космические аппараты, запуск которых окончился неудачей, стали именоваться *florpnik* и *karutpnik*. Далеко не все неологизмы действительно стали употребляться широко, но есть один пример, который сегодня стал историей литературы, — это слово «битник». Оно было придумано журналистом Гербом Каеном в статье в «San

Francisco Chronicle» от 2 апреля 1958 г. Он добавил русский суффикс «-ник» к английскому выражению «поколение бита» (Beat Generation), чтобы назвать ту часть молодежи, которая в целом вела себя асоциально и не принимала традиционных культурных ценностей США.

Хронологию дальнейших запусков можно проследить по многим источникам: практически сразу же начались полеты к Луне, конструкторы стали прорабатывать экспедиции на Марс и Венеру, физики задумались над исследованием околоземного пространства; полным ходом пошла подготовка к первому пилотируемому запуску, триумфом стал полет Белки и Стрелки — первых живых существ, вернувшихся из космоса на Землю. Параллельно руководители и ракетной промышленности, и Академии задумались над организацией космических исследований. 5 мая 1963 г. в своем письме в «директивные органы» Келдыш, уже президент Академии наук СССР, выдвигает предложение о создании в ее системе Объединенного института космических исследований, основной задачей которого стало бы систематическое исследование космического пространства. Спустя два года, 15 мая 1965 г., Постановлением Совета министров СССР создается Институт космических исследований АН СССР. Еще годом ранее был создан Институт медико-биологических проблем, тоже в составе Академии наук, — головная организация по медицинскому обеспечению космических полетов, биологическим экспериментам в космосе. Разворачивались большие космические программы, которые предусматривали систематическое исследование космоса (а вернее, разных объектов и явлений), так что довольно скоро космическая наука превратилась в то, что мы понимаем под ней сегодня: целый «букет» или «куст» направлений, в развитии которых участвует не только физика, но и химия, геология, биология, математика, вычислительные науки. А наблюдения в космосе, в свою очередь, стали для этих дисциплин источником новых открытий, которых, находясь на Земле, мы бы не сделали.

Все краски Вселенной

На знаменитой гравюре, впервые опубликованной в труде Фламариона, изображен средневековый монах, который пробивает головой небесный свод и видит совершенно другое небо и другую Землю. Именно такую роль для нас сыграл первый спутник. Благодаря ему мы получили новое представление о космосе.

В каждом диапазоне электромагнитного излучения, от радио- до гамма-лучей, есть свои интересные процессы. Очень важно взглянуть на Вселенную во всем этом спектре. Но до запусков космических аппаратов мы не могли это сделать, поскольку атмосфера и ионосфера задерживает



Гравюра из труда К.Фламариона «Атмосфера: популярная метеорология» (1888).

практически все излучения, приходящие из космоса (что, безусловно, замечательно для жителей Земли). В полной мере нам доступен только видимый и частично — радиоволновой диапазон.

Это же касается и заряженных частиц — магнитное поле Земли очень сильно влияет на их распространение. Благоприятное обстоятельство с точки зрения живых организмов, потому что такие частицы высоких энергий для нас опасны, но разочаровывающее для науки: огромный комплекс явлений выпадает из поля зрения ученых на Земле.

После выхода в космос открытия посыпались как из рога изобилия. Многие из того, что было теоретически предсказано, удалось «пощупать» (как это было с радиационными поясами Земли или потоками солнечного ветра). С другой стороны, были неожиданности — самой «громкой» из них, вероятно, стало открытие в конце XX в. темной энергии. Постепенно человек приспособился к достаточно длительному пребыванию в космосе. Юрий Гагарин сделал в космосе один виток вокруг планеты, а недавно из экспедиции вернулись космонавты, которые провели на орбите уже почти полтора года. Космос в целом враждебен человеку, но усилиями медиков удалось нейтрализовать негативное влияние космической среды, по крайней мере на околоземной орбите. Одновременно стало понятно, сколь сильно само наше существование связано не только с родной планетой, но и с космическим пространством: начиная от приспособленности человека к многочисленным циклам солнечной активности и заканчивая гипотезой о том, что вся вода или часть ее была принесена на Землю кометами.

Даже краткий обзор всех важных результатов, достигнутых за 60 лет космической эры, займет весьма толстую книгу. Поэтому в дальнейшем изложении, безусловно, будут большие пропуски. Но цель его более скромная. С одной стороны, я

хочу показать, насколько повлияла космическая техника на наши представления о мире; с другой — представить те вопросы и задачи, которые научное сообщество ставит перед собой сегодня.

Что касается исследований в разных диапазонах спектра, то самый простой пример здесь — Солнце. Если посмотреть на него в оптических длинах волн, то мы видим в целом довольно спокойную картину, которую лишь иногда «омрачают» пятна и протуберанцы. Но совершенно по-иному наше светило выглядит в радио-, рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах: мы увидим множество активных областей, вспышек и других явлений, отражающих бурные процессы на поверхности звезды.

То же происходит и с наблюдениями других звезд и галактик: если использовать только оптические и радиотелескопы, не удастся увидеть, в каких именно процессах происходит основное энерговыделение.

В космической программе России есть целый комплекс аппаратов под названием «Спектр», которые предназначены для изучения Вселенной в разных диапазонах.

Самый первый спутник из серии — «Спектр-Р» (или «Радиоастрон») — был успешно выведен в космос в 2011 г. Он проводит исследования в радиодиапазоне — казалось бы, в «обычном», земном, участке спектра, — но космическая техника позволила рекордно увеличить базу для работы в режиме интерферометра и, как следствие, — угловое разрешение (длина базы, когда аппарат максимально удален от нашей планеты, сравнима с расстоянием до Луны; такого на Земле достичь невозможно).



Аппарат «Спектр-Р» в НПО имени С.А.Лавочкина.

Фотография предоставлена НПО имени С.А.Лавочкина и Астрокосмическим центром Физического института имени П.Н.Лебедева РАН



Космический аппарат «Спектр-РГ».

Следующий космический аппарат — «Спектр-Рентген-Гамма» (запуск 2019 г.), который будет проводить обзор Вселенной в рентгеновском и гамма-диапазонах. Главные цели проекта — найти все достаточно массивные скопления галактик в наблюдаемой Вселенной, а также активные сверхмассивные черные дыры в ядрах далеких галактик. Благодаря этому будут исследованы процессы эволюции Вселенной и та роль, которую играла в ней темная энергия (ее действие можно наблюдать именно по распределению массы).

Наконец, международная космическая обсерватория «Спектр-УФ» (или «Всемирная космическая обсерватория — Ультрафиолет») будет работать в ультрафиолетовом диапазоне (запуск планируется в 2022–2023 гг.). В частности, так можно наблюдать физические процессы на молодых горячих звездах, физику формирования звезд и звездных скоплений.

Множественность (не)обитаемых миров?

Настоящему исследователю, разумеется, всегда хочется перейти от дистанционных наблюдений к непосредственным экспериментам. Пока мы не можем долететь до далеких и даже близких звезд (кроме, конечно, Солнца), но совершенно новые миры открываются и в нашей Солнечной системе. Эксперименты *in situ* (т.е. «на месте» — лат.) очень сильно изменили наши представления о том, как образовывались планеты у нашего светила и что происходило с ними на протяжении нескольких миллиардов лет существования Солнечной системы.

Начать следует с самой близкой планеты, фактически нашего первого естественного спутни-

ка — Луны. Полеты на Луну стали следующим объектом космической гонки после запуска первого космического аппарата и первого пилотируемого полета. Множество советских и американских аппаратов исследовали ее, и каждая страна многого добилась. Советский Союз первым провел фотосъемку обратной стороны земного спутника, осуществил три успешных доставки грунта с него, отправил на его поверхность два успешно и подолгу проработавших автоматических лунохода. У США состоялось шесть пилотируемых миссий на Луну в рамках знаменитой программы «Аполлон», провозглашенной президентом Джоном Кеннеди. Ирония для ученых состоит в том, что успех «Аполлонов» и доставки грунта исчерпали интерес к Луне политиков, в результате чего гонка была завершена, а с ней и запуски исследовательских аппаратов к Луне. Интерес к нашему спутнику надолго угас, внимание перешло на изучение околоземного пространства и пилотируемые полеты, где огромным достижением стала работа станции «Мир», которая во многом определила и сегодняшний успех Международной космической станции (МКС).

Но вернемся к Луне. В начале XXI в. интерес к ней снова вспыхнул, и это было связано с исследованиями аппаратов «Lunar Prospector» (США) и позднее «Chandrayaan» (Индия), которые показали, что поверхность нашего спутника не везде одинаковая: полярные области сильно отличаются от экваториальных областей. Подобное, в принципе, характерно для всех планет, но в полярных областях Луны было обнаружено присутствие водяного льда под поверхностью — а этого уже не ожидали; скорее, бытовало представление, что Луна должна быть совершенно «сухой». Позже наличие воды подтвердили исследования с борта американского аппарата «Lunar Reconnaissance Orbiter», на котором установлен российский нейтронный телескоп ЛЕНД. Именно он исследовал распределение водорода в верхнем слое лунного грунта и показал, что в отдельных местах доля воды по массе может достигать нескольких процентов.

Есть несколько моделей, объясняющих присутствие на Луне льда. Одна из них связывает его с активной бомбардировкой поверхности кометами, ядра которых, как в «холодильнике», сохранились в затененных кратерах на полюсах, куда не попадает свет Солнца. Это может быть интересным, поскольку такой лед способен сохранить предбиологические соединения, если они присутствуют в кометах.

Российская лунная программа в том виде, в котором она существует сейчас, нацелена на изучение именно полярных областей нашей космической соседки. Сейчас идет работа над посадочными аппаратами «Луна-25 и -27» («отсчет» идет от «Луны-24», последнего проекта советской лунной программы, доставившего на Землю лунный реголит в 1976 г.). «Луна-26» — орбитальный аппарат.



Орбитальная и посадочная станции, входящие в современную лунную программу России: «Луна-26» и «Луна-28». Последняя предназначена для криогенного забора образцов грунта Луны и их доставки на Землю.

Следующая задача, которая ставится, — доставка грунта из полярных областей земного спутника. Однако при этом важен не столько сам грунт, сколько летучие компоненты, присутствующие в нем, и сложной технической задачей становится их доставка на Землю в «нетронутом» виде.

Обсуждается также проект окололунной пилотируемой станции, которая могла бы стать прелюдией перед полномасштабным освоением спутника как полигона для исследовательских, а может быть, и каких-то технологических целей.

Россия в этих планах не одинока. До 2023 г. космические аппараты на наш спутник планируют отправить Индия, Китай, Южная Корея. Заинтересованы в исследовании и освоении Луны Европа, Япония и США.

Вторая планета Солнечной системы, которая представляет гипотетический интерес для освоения, хотя и в гораздо более далекой перспективе, — Марс. К сожалению, науке все еще не известно, есть ли жизнь на Марсе. Попытки поиска жизни прошлых лет, как мы сейчас понимаем, были обречены на неудачу, поскольку методы исследования не были достаточно чувствительными. Тем не менее некоторые обнадеживающие факты удалось обнаружить.

Уже более десятилетия назад на Марсе — и в полярных, и в экваториальных областях под поверхностью — была найдена вода (вернее, водяной лед). Но самое интересное открытие последних двух десятилетий — в атмосфере Марса есть метан. Как известно, этот газ довольно быстро — за несколько сотен лет — разлагается под действием ультрафиолета. Поэтому можно сделать вы-

вод, что его запас в атмосфере должен каким-то образом пополняться. Одна из очень заманчивых гипотез, объясняющих это несоответствие, — биологическая активность. Чтобы понять феномен, сейчас реализуется совместный российско-европейский проект «ЭкзоМарс», который включает несколько космических аппаратов. Первый из них — орбитальный зонд «Trace Gas Orbiter» (TGO) — был запущен в марте прошлого года, он успешно вышел на расчетную орбиту вокруг Марса и в настоящее время (до весны следующего года) находится в процессе выхода на рабочую низкую круговую орбиту. После этого он начнет первые исследования атмосферы.

Уже во время перелета приборы TGO проводили некоторые измерения, и первые результаты касаются набранной дозы радиации. Эти измерения проводил модуль «Люлин-МО» (Болгария и Россия) в составе нейтронного спектрометра ФРЕНД. Такие данные очень важны, поскольку космическая радиация — одна из основных угроз для пилотируемого полета на Марс.

Для второго этапа миссии в ИКИ РАН и в НПО имени С.А.Лавочкина готовится большая посадочная платформа с многочисленными научными приборами. Она доставит на планету марсоход, который делает Европейское космическое агентство, а затем начнет работать как автономная научная станция.

«ЭкзоМарс» рассчитан на период примерно до 2022–2023 гг., возможно, аппараты смогут проработать и дольше. Но уже сейчас мы думаем о продолжении этих исследований, и в частности возврате к Фобосу. Это малое тело Солнечной систе-



Аппарат «Trace Gas Orbiter» проекта «ЭкзоМарс-2016». Сейчас он находится у Марса в стадии торможения с помощью атмосферы, с целью выйти на круговую рабочую орбиту.

мы, спутник Марса, интересно прежде всего тем, что его вещество представляет собой «первородное вещество» Солнечной системы, не претерпевшее экзогенных изменений со времени появления планет. К сожалению, предыдущие миссии к Фобосу не дали результатов в этом отношении, хотя космический аппарат «Фобос-2», отправленный к Марсу в 1988 г., успел провести довольно интересные орбитальные измерения.

Венчать же это направление марсианских исследований должен проект по доставке грунта с Марса. Эта задача гораздо сложнее, чем доставка вещества Луны, из-за относительно большой массы Марса. Здесь не обойтись одним аппаратом — необходима перегрузка грунта на орбите. Вокруг этого проекта уже собирается большая международная кооперация, в которой Россия также предполагает участвовать.

Наконец, планета, которую часто называют сестрой Земли, — Венера. Она почти одинакового размера с Землей, имеет очень похожее внутреннее строение. До начала космической эры часто, и особенно в фантастической литературе (вспомним «Прыжок в ничто» А. Беляева или «Страну багровых туч» братьев Стругацких), ее представляли как вариацию на тему ранней Земли с непроходимыми джунглями и разнообразной живностью. Но действительность оказалась совсем другой. На Венере возник самораскачавшийся парниковый эффект, давление достигло почти 100 атм, температура поверхности почти 700 К, т.е. перед нами в буквальном смысле слова раскаленный ад.

И тем не менее этот ад очень интересен для исследований. Во-первых, важно понять, говоря не-

сколько грубовато, как Венера «дошла до жизни такой» — почему парниковый эффект (который, кстати, действует и на Земле и благодаря которому температура на нашей планете в целом комфортна для жизни) на соседней с нами планете достиг таких невероятных масштабов. Во-вторых, интересно, что происходило и происходит внутри Венеры — как устроена эта планета и почему у нее, как и у Марса, нет магнитного поля. Наконец, понимание того, как работает «климатическая машина» Венеры (равно и как Марса), важно, чтобы понять, как устроена несравненно более сложная климатическая машина Земли.

Сейчас Венеру изучает японский орбитальный аппарат «Akatsuki», а совсем недавно на орбите вокруг планеты работал европейский зонд «Венера-Экспресс», на котором были установлены и российские приборы.

Но Венера, в отличие от Марса, обладает очень плотной атмосферой и толстым облачным слоем, поэтому исследования с орбиты нацелены в большей степени на загадки атмосферы. Понять же детально, что происходит на планете, можно только с помощью посадочных аппаратов или аэростатных зондов либо других более или менее долгоживущих аппаратов.

Венера интересует не только нас, но и исследователей из США, и относительно недавно была создана рабочая группа российских и американских ученых для обсуждения совместных интересов по исследованию Венеры. За основу взят российский проект посадочной станции «Венера-Д», которая должна продолжить успешную серию советских экспедиций к Венере. Были предложения по вклю-



«Венера-Д» у Венеры — возможный облик аппарата.

чению в него орбитального и посадочного аппаратов, возможно добавление аэростатов или атмосферных платформ, которые смогут довольно долго жить в плотной атмосфере Венеры (посадочный аппарат сможет работать все-таки в пределах нескольких часов). Это замечательный пример международного сотрудничества, пусть и в условиях непростой политической обстановки.

В последние десятилетия большое внимание обращалось на исследование малых тел Солнечной системы — в первую очередь астероидов, но также и комет. Огромный успех имел недавний проект Европейского космического агентства «Розетта» по исследованию кометы Чурюмова—Герасименко. Сама миссия названа в честь розеттского камня: так же, как он послужил для Шампольона ключом для расшифровки египетских иероглифов, она должна была стать для ученых ключом к пониманию зарождения жизни.

Получилось ли это, пока судить сложно, но очевидно, что результаты двухлетнего исследования (2014–2016) дали для науки очень и очень много. Например, стало понятно, что комета Чурюмова—Герасименко пришла к нам из весьма близких областей, тогда как комета Галлея, которую в 1986 г. исследовали, в частности, советские аппараты «Вега», — из гораздо более далекого облака Оорта, само существование которого пока представляется гипотезой, хотя и весьма обоснованной. Ключ к пониманию этого дало сравнение состава комет, в особенности соотношение дейтерия и водорода.

В космических исследованиях последних лет не были забыты и Меркурий, и планеты-гиганты Юпитер и Сатурн, а также их спутники, каждый из которых представляет собой отдельный мир. Философский вопрос, который можно задать сейчас, — какое новое знание в итоге мы получили?

В прошлом представления о зоне возможной обитаемости — т.е. зоне, где энергии Солнца достаточно, чтобы было возможно существование воды в жидком состоянии и могла зародиться жизнь, — были довольно скромны. Фактически туда входили только Земля и частично Марс. Но благодаря новым данным стало известно, что на спутниках планет-гигантов тоже существует жидкая вода, которую в этом состоянии поддерживает нагрев за счет приливных сил, так что зона обитаемости может простираться и за пределы земной орбиты. Океаны жидкой соленой воды открыли на трех галилеевых спутниках Юпитера и на Энцеладе — спутнике Сатурна. Условия там кажутся отнюдь не благо-

приятными для живых организмов, но даже на Земле бактерии существуют в местах, где, казалось бы, жизнь невозможна.

В связи с этим большое «брожение умов» вызывают открытия экзопланет. Сейчас их число достигает нескольких тысяч, и среди них уже довольно много похожих на Землю. Но ответить на вопрос, есть ли там жизнь, мы пока не можем. Тем не менее эта мечта может стать мощной движущей силой новых свершений.

Плазменная лаборатория в космосе

Возможность исследовать другие планеты — наверное, самый понятный из результатов, которые были получены благодаря первому спутнику. Однако космические исследования не заключаются только в планетологии, и если говорить о важнейших открытиях, то одним из них стало обнаружение магнитосферы Земли — той области, где поведение заряженных частиц контролируется магнитным полем нашей планеты. Это было сделано в самые первые годы космических исследований. Тогда же ученые поняли структурные особенности магнитосферы: наличие хвоста, границы (магнитной структуры, на которой останавливается солнечный ветер), ударной волны, тормозящей сверхзвуковой солнечный ветер, и др.

Концепция магнитосферы оказалась очень продуктивной, и позже выяснилось, что схожие (с учетом разных масштабов) магнитосферы есть у многих планет: у Меркурия, Сатурна, Юпитера — и не только у них, магнитосферы существуют и у далеких нейтронных звезд. Таким образом, исследуя околоземное пространство, можно получить представление о процессах, которые идут

у совсем других объектов. Если, говоря о планетах, мы имели в виду скорее «географические» открытия, то сейчас речь идет о физических — новых явлениях и процессах, которые сложно наблюдать где-либо еще.

Есть несколько фундаментальных процессов, которые исследованы в космосе, но важны также для плазмы в лаборатории и в термоядерных исследованиях. Это, например, токовые слои и пересоединение магнитного поля, бесстолкнительные ударные волны (этот термин был введен вторым директором ИКИ, академиком Роеальдом Зиннуровичем Сагдеевым), сильнейшие взаимодействия волн и частиц.

В последнее время стали активно изучаться феномены, связанные с проявлениями сильной нелинейности. Ранее более распространенной была квазинелинейная теория, которая включает слабую турбулентность, когда различные моды колебаний имеют разные фазы и слабо взаимодействуют между собой. Но взаимодействия между ними и эффекты оказались гораздо сильнее. Собственно, такая слабая турбулентность наблюдается довольно редко. Например, в магнитосфере внутри так называемых пограничных слоев на границе плазменного слоя возникают сильные нелинейные волны. Похожие структуры рождаются и в совсем другой области — внутренней магнитосфере, в ее радиационных поясах — уже за счет особенностей нелинейного взаимодействия частиц. Другими словами, исследования магнитосферы дают очень важные данные для нелинейной фундаментальной физики. Таким образом, космос постепенно становится настоящей лабораторией. Чем больше активных экспериментов мы будем проводить в ней, тем лучше поймем как принципиальные физические явления в плазме, так и взаимосвязи магнитосферы, ионосферы и атмосферы Земли и, в свою очередь, тем более изощренные физические опыты мы сможем там проводить.

Примером одного из таких активных экспериментов был советско-французский проект АРКАД (1971 г.). С о.Кергелен (территория Франции) пучки электронов запускались в магнитную трубку, второй конец которой «входил» в Землю около Архангельска, где и проводились наблюдения. Сейчас подобные работы планируется продолжать, но уже на новом уровне.

Интересное и отчасти парадоксальное положение вещей заключается в том, что такие исследования в космосе помогают решать и проблемы термоядерной энергетики. В частности, в космической среде большую роль играет пересоединение магнитных полей, когда силовые линии одного магнитного поля «соединяются» с силовыми линиями другого (например, полей солнечного ветра и Земли) и затем воссоединяются уже в иной комбинации. При этом качественно свойства пограничного слоя, возникающего на границе двух плазм, сходны со свойствами граничной области,

существующей при удержании горячей (в будущем термоядерной) плазмы в токамаке. В обеих системах создается сильный ток, текущий по плазме. Сравнение безразмерных параметров этих систем показывает: то, что наблюдается в космическом пространстве, близко к тем процессам, которые происходят в термоядерных установках. Именно такие безразмерные параметры важны для теории.

Если же говорить об эволюции космических экспериментов в магнитосфере, надо подчеркнуть, что во всем мире происходит переход от исследования больших масштабов ко все более и более мелким. В 1990-х годах были реализованы проекты «Geotail» (США) и многоспутниковый ИНТЕРБОЛ (международный проект, ведущая страна — Россия). В рамках второго в космос были выведены две пары спутник—субспутник, которые проводили исследования в авроральной и хвостовой областях магнитосферы, что дало ключ к пониманию многих глобальных плазменных процессов в системе Земля—Солнце.

Следующий этап развития относится к 2000-м годам. Совместный европейско-китайский проект «Cluster» (четыре аппарата) — «Double Star» (два аппарата) пытался изучать систему уже на более мелких, так называемых кинетических масштабах, определяющихся ларморовским радиусом ионов.

Самые новые достижения в этой области принадлежат американскому проекту «Magnetospheric Multiscale», или MMS (четыре аппарата), который исследует процессы уже на самых маленьких, электронных масштабах. И это очень важно, поскольку все явления, которые происходят в этой среде, мультимасштабны, но в лабораторных условиях на Земле далеко не всегда удастся изучить многие из них из-за конечного размера любых, даже самых маленьких измерительных зондов, помещаемых в лабораторную установку.

В помощь экспериментаторам приходят специалисты в области вычислительного моделирования. Сегодня магнитогидродинамическое моделирование достигло фантастических высот, оно может показать, например, все, что происходит от выброса корональной массы (солнечной плазмы) до его распространения в межпланетном пространстве и до процессов внутри магнитосферы Земли. Так мы переходим к тому уровню, который теперь называется космической погодой — это совокупность факторов, связанных с влиянием космического пространства на биологические и технологические системы Земли. Само понятие «космическая погода» возникло благодаря космическим исследованиям. С другой стороны, неблагоприятные «погодные условия» в космосе опасны в первую очередь для спутников и космонавтов на орбите, а в особо тяжелых случаях — и для электрических сетей, а также трубопроводов на Земле. Таким образом, эти исследования критически важны для поддержания нашей современной техносферы (особенно в полярных областях Земли).

Вместо заключения

Сегодня, в 2017 г., международная политическая ситуация очень далека от спокойной и даже просто стабильной. Еще более напряженной она была 60 лет назад: шла холодная война, которая в любой момент могла перейти в реальные боевые действия. Может быть, самое главное достижение первого спутника состоит в том, что он стал своего рода «громоотводом» напряжения между странами, превратил непримиримую вражду в соперничество между социалистической и капиталистической системами, а потом глобализировал саму проблему и перевел ее из плоскости только политической в область науки и техники, постепенно превратив в мирное соревнование. Таковым оно по сути остается и сегодня, несмотря на то, что все большую роль играет международное сотрудничество.

Американский историк Уолтер Мак-Дугал позже писал: «Запуск Спутника полностью изменил суть холодной войны». Цитата Келдыша: «Еще неизвестно, что имело большее значение для обороны страны: боевая межконтинентальная ракета или первый спутник».

Космос был и остается той сферой, где сотрудничество продолжается даже во времена охлаждения отношений. В 1975 г. был организован замечательный эксперимент стыковки советского и американского кораблей «Союз» и «Аполлон», историческим стало рукопожатие космонавта Алексея Леонова и астронавта Томаса Стаффорда. Космос оказался мостиком между враждующими странами. Можно сказать, что из этой стыковки позже вырос проект Международной космической станции, который имел и имеет огромное политическое значение.

В сентябре 2017 г. в Аделаиде на Международном астронавтическом конгрессе было подписано соглашение о создании на Луне космопорта «Dee Space Gateway», который станет шлюзом для изучения лунной поверхности и промежуточным этапом перед отправкой астронавтов на Марс. Переговоры велись между НАСА и ГК «Роскосмос», но это открытая площадка, где могут участвовать

и другие страны, в частности КНР. Я думаю, если объединить наши усилия по исследованию Луны автоматическими, а затем и пилотируемыми аппаратами, то уже к 2030-м гг. может начаться строительство международной астрофизической обсерватории на нашем спутнике.

...Тридцать лет назад, в 1987 г., при поддержке тогдашнего Генерального секретаря ЦК КПСС М.С.Горбачева, ИКИ РАН провел Международный форум «Сотрудничество в космосе во имя мира на Земле». Это было одно из замечательных событий перестройки, вдохновленное надеждой на новый этап развития космической деятельности и космической науки.

Последовавшие за ним десятилетия оказались для нашей страны и российской науки слишком тяжелыми, и год 1997 прошел без крупных научных событий. Но в 2007 г., в полувекковой юбилей первого спутника, Академия наук организовала и провела масштабный международный форум «Космос: наука и проблемы XXI века», в котором приняли участие выдающиеся ученые и инженеры, руководители ведущих космических агентств мира. И наконец, в прошедшем 2017 г. РАН и ГК «Роскосмос» снова организовали международный научный форум «Спутник: шестьдесят лет по дороге открытий». Их инициаторами был ИКИ РАН, идею поддержали многие организации и вузы, связанные с исследованиями космоса.

Сегодня космические исследования стали мощным самостоятельным направлением науки, и очень важно регулярно проводить такие международные встречи ученых, чтобы понять, что было сделано и какие перспективы просматриваются впереди. Я выступаю с инициативой проводить раз в десятилетие такие форумы, подобные предшествовавшим (а может быть, уже в другом формате), которые станут своего рода вехами при анализе происходящего, а их материалы — вначале руководством к действию, а потом — историческими документами, фиксирующими развитие наших представлений о космосе. ■

**Материал подготовили
С.Е.Виноградова, О.В.Закутняя**

Sputnik: 60 years along the path of discoveries

L.M.Zelenyi

Space Research Institute, RAS (Moscow, Russia)

To mark the sixtieth anniversary of the beginning of Space Age the Russian Academy of Sciences and State Corporation "Roscosmos" held the International Forum "Sputnik: 60 Years Along the Path of Discoveries" on 3–4 October 2017. The text specially prepared for Priroda readers features the main points of the author's talk given at the opening of the Forum. How did an ambitious dream become true, how did Sputnik emerge as not only technological, but cultural phenomenon, what followed it and what kind of experiments are waiting for us in the future? A full text of the talk will be published in the Forum proceedings in 2018.

Keywords: Sputnik, space age, space exploration, space research, planetary research, Solar system, magnetosphere research, astrophysics, the Moon, Mars, Venus, international collaborations, space.

Плазменные двигатели и будущее космонавтики

М.В.Ковальчук¹, В.И.Ильгисонис¹, В.М.Кулыгин¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Москва, Россия)

Перспективы развития космонавтики напрямую связаны с развитием ракетных двигательных установок. Ожидаемый прогресс в этой области будет в значительной степени основан на имеющемся опыте эксплуатации плазменных ракетных двигателей и на результатах многолетних исследований по термоядерному синтезу и физике плазмы. Новые разработки позволяют рассчитывать на существенное увеличение тягово-энергетических характеристик таких двигателей по сравнению с традиционными электрореактивными двигателями.

Ключевые слова: электрореактивные двигатели, плазменные ракетные двигатели, плазменные потоки, резонансный нагрев.

Дальнейшие шаги в освоении космоса, в том числе расширение функциональных возможностей космических средств на околоземных орбитах, создание и регулярная эксплуатация лунных космических баз, масштабное изучение астероидов, планет и других тел Солнечной системы, а также зондирование дальнего космоса требуют, прежде всего, резкого увеличения возможностей и эффективности космических транспортных систем. В год 60-летия мировой космонавтики, днем рождения которой естественно считать 4 октября 1957 г. — дату успешного запуска первого искусственного спутника Земли, осуществленного в нашей стране, — полезно еще раз оглянуться на путь, пройденный за прошедшее время космонавтикой, и оценить перспективы и направления ее дальнейшего развития.

Приговор выносит Ы-формула

В безвоздушном пространстве космический аппарат может двигаться либо по инерции (в том числе под действием сил притяжения со стороны гравитирующих объектов), либо с использованием реактивных двигателей, т.е. жертвуя своей собственной массой. Как следует из школьного курса физики, для вывода на околоземную орбиту спутник необходимо разогнать как минимум до первой космической скорости в 7.9 км/с.

Начиная с первого спутника для запуска большинства космических кораблей (как пилотируемых, так и грузовых) в Советском Союзе, а затем и в Российской Федерации использовали ракету-носитель семейства Р-7 — так называемую «семерку». Первоначально ее спроектировали как двухступенчатую межконтинентальную баллистическую ракету, но позднее были разработаны различные

(в том числе трех- и даже четырехступенчатые — специально для космических задач) модификации «семерки», получившие разные собственные имена — «Спутник», «Восток», «Луна», «Восход», «Молния», многочисленные «Союзы». Эти ракеты, имевшие стартовый вес в диапазоне 260–315 т, могли вывести на околоземную орбиту аппараты массой 6–10 т. На старте у «семерки» параллельно включаются химические ракетные двигатели первой и второй ступеней на времена до 140 и 320 с соответственно, а затем, после их отделения, — двигатель третьей ступени еще примерно на 300 с. Стартовые параметры большинства других носителей, как отечественных, так и зарубежных, отличаются от этих лишь незначительно. Таким образом, искомая скорость (порядка первой космической) сообщается космическому аппарату за относительно короткое время и требует весьма и весьма значительной массы топлива, расходуемой на такой разгон.

Необходимость несоразмерно высокого отношения массы топлива и полезной нагрузки с очевидностью немедленно следует из нескольких хорошо известных формул. Движение космического летательного аппарата (КЛА) как объекта с переменной массой подчиняется уравнению Мещерского, где сила тяги пропорциональна скорости изменения массы объекта (секундному расходу топлива) и скорости, с которой это топливо покидает объект. Форма состояния рабочего тела, т.е. вещества, вылетающего из объекта, не важна — это могут быть раскаленные газы сгоревшего топлива, само топливо в жидком или газообразном виде, твердые тела и др. Значение имеют только скорость вылета рабочего тела из объекта (скорость истечения, приблизительно равная удельному импульсу — отношению создаваемого двигателем импульса к расходу топлива) и скорость потери объектом массы. Интегрирование уравнения Мещерского при постоянной скорости истечения дает формулу Циолковского, согласно которой ско-



Михаил Валентинович Ковальчук, член-корреспондент РАН, президент Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», руководитель межведомственной рабочей группы Совета при Президенте РФ по науке и образованию, декан физического факультета Санкт-Петербургского университета. Лауреат премий Правительства РФ в области науки и техники, в области образования, премии имени Е.С.Федорова РАН. Кавалер орденов «За заслуги перед Отечеством» III и IV степеней. Область научных интересов — кристаллография и кристаллофизика, физика конденсированного состояния, нанобиоорганические материалы и системы, применение рентгеновского, синхротронного излучения, нейтронов и электронов в материаловедении, ядерная медицина и ядерные технологии.



Виктор Игоревич Ильгисонис, доктор физико-математических наук, профессор, директор Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», заведующий кафедрой прикладной физики Российского университета дружбы народов. Специалист в области физики плазмы, магнитной гидродинамики, управляемого термоядерного синтеза.



Владимир Михайлович Кулыгин, кандидат физико-математических наук, заместитель руководителя Отделения плазменных технологий Курчатовского комплекса физико-химических технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Занимается физикой плазмы и ее техническими и технологическими приложениями.

рость КЛА, стартовавшего с нулевой скоростью, пропорциональна скорости истечения с коэффициентом пропорциональности, равным логарифму отношения конечной и начальной масс КЛА. Из-за слабой логарифмической зависимости в формуле Циолковского достижение большой по сравнению с удельным импульсом скорости полета потребует весьма и весьма значительной массы топлива. Так, чтобы аппарат с массой 10 т приобрел первую космическую скорость при удельном импульсе 2.5–3 км/с, понадобится ракета с массой горючего примерно 150–250 т, что по порядку величины как раз соответствует основным параметрам «семерки» (иногда удельный импульс измеряют в секундах, деля исходную величину на ускорение свободного падения $g = 9.81 \text{ м/с}^2$, хотя в этом слу-

чае более употребителен термин «удельная тяга»).

Повысить долю полезной массы ракеты и обеспечить возможность маневрирования при ограниченном расходе топлива можно, только увеличив удельный импульс. Простая термодинамика позволяет достаточно точно рассчитать его величину. Для адиабатического истечения раскаленных газов из ракеты несложные вычисления приводят к выражению, получившему неформальное название «Ы-формулы»*, в которую, помимо температуры в камере сгорания ракетного двигателя, входит еще отношение давлений газа на срезе сопла и собственно в камере. Как следует из «Ы-формулы», для увеличения удельного импульса нужно повышать рабочую температуру и использовать легкое топливо (в идеале — водород). При работе на химическом топливе температура определяется тепловыделением протекающих химических реакций, фиксированным для единицы массы топлива. Это ограничивает скорость истечения величиной не выше 4.5 км/с даже при работе на кислородно-водородном топливе (у «семерки» ее значения для двигателей разных ступеней лежат в диапазоне 2.5–3.2 км/с.

Куда и на чем летим?

Важность достижения высокой скорости истечения рабочего тела аполонеты космических полетов

прекрасно понимали задолго до начала практического освоения космоса. Еще в 1911 г. в своей знаменитой статье [1] К.Э.Циолковский высказал идею создания реактивной тяги с использованием электрических сил: «Может быть, с помощью электричества можно будет со временем придавать громадную скорость выбрасываемым из реактивного прибора частицам. И сейчас известно, что катод-

* Не имевшая собственного имени формула для удельного импульса ракетного двигателя с соплом Лаваля получила свое название по кинофильму «Операция «Ы» и другие приключения Шурика» (реж. Л.Гайдай), в одной из новелл которого студенты перед экзаменом выводят именно эту формулу. Сцена фильма отражает всеобщее увлечение космосом в начале 60-х годов XX в.

ные лучи в трубке Крукса, как и лучи радия, сопровождаются потоком электронов, масса которых, как мы говорили, в 4000 раз (на самом деле в 7372. — *Прим. авт.*) меньше массы гелия, а скорость достигает 30–100 тыс. км/с, т.е. она в 6–20 тыс. раз больше скорости обыкновенных продуктов горения, вытекающих из нашей реактивной трубы».

Иллюстрируя роль скорости истечения в космическом полете, изобретатель стационарных плазменных двигателей А.И.Морозов приводит в своей статье, посвященной разработке идеологии этих устройств [2], пример полета на Луну с посадкой и возвращением на Землю. При использовании американской ракеты-носителя «Сатурн-5», которая и по сей день остается самой грузоподъемной, мощной, тяжелой и большой из успешно летавших ракет, стартовая масса комплекса составляла 2900 т (с учетом многоступенчатости), а на Землю возвращался командный блок массой всего 5.5 т. Таким образом, совершенно очевидно, что для более дальних полетов необходимо увеличивать удельный импульс ракетных двигателей.

Ясно, что современные задачи, стоящие перед космической отраслью, — длительное крейсерование на околоземных орбитах, периодическое изменение плоскости орбиты, налаживание эксплуатации «парома» Земля—Луна, а также реальное освоение дальнего космоса — требуют экономии выбрасываемой массы и, следовательно, существенного увеличения скорости истечения, которое выходит за рамки возможностей химического топлива. Для полетов в далекие области Солнечной системы, например к внешним планетам, требуется разгон КЛА до 35–70 км/с. На долю топлива в такой ракете придется отвести более 99% стартовой массы, т.е. для полезной нагрузки места практически не останется.

Помимо высокого удельного импульса двигателя, предназначенные для межпланетных полетов, должны обеспечивать тяговые и мощностные характеристики, необходимые для решения стратегических задач космической экспансии в разумное время. Распространенные ориентировочные оценки требуемой мощности перспективных двигательных систем приведены на рис.1.

Используемые в настоящее время ракетные двигатели работают на химическом топливе. Лишь небольшие конструктивные усовершенствования и доработки отличают их от двигателей, с которых человечество начало свое проникновение в космос. Они обладают колоссальной мощностью и могут развивать большую тягу, необходимую для выведения полезной нагрузки на орбиту — в выполнении этой функции им нет конкуренции в настоящее время. Так, тяга РД-107 (рабочего двигателя «семерки») составляет 814 кН на ур.м. и 1 МН в космическом вакууме; близкие параметры и у американского J-2. Рекордсменами же среди летавших жидкостных ракетных двигателей являются российский РД-171 с тягой 7.26 МН на ур.м.

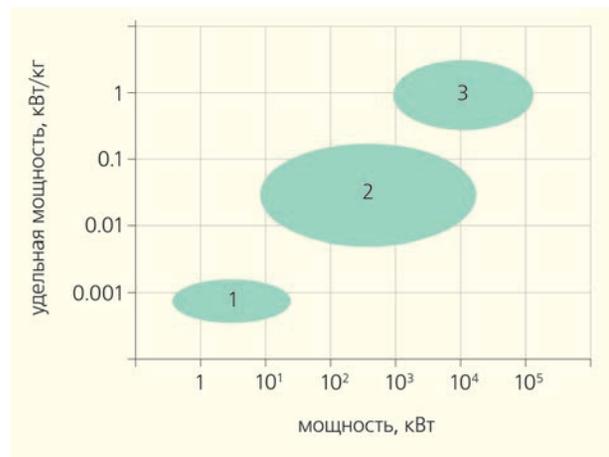


Рис.1. Требования к параметрам двигательной системы в соответствии с миссией КЛА. Аппараты и задачи: 1 — современные спутниковые системы, связь, наблюдение; 2 — межорбитальные буксиры, создание лунной базы, астероидный контроль, глобальные системы связи и контроля; 3 — дальние грузовые и пилотируемые полеты, зондирование дальнего космоса.

(7.91 МН в вакууме) и американский гигант F-1 с «Сатурна» с тягой у поверхности земли 6.77 МН (7.75 МН в вакууме). Такие двигатели способны быстро разогнать даже тяжелую ракету, но расходуют при этом огромное количество топлива, поскольку скорость истечения у лучших кислородно-водородных двигателей, как уже отмечалось выше, не превышает нескольких километров в секунду.

Альтернативой классическим ракетным двигателям, причем альтернативой реальной, проверенной на практике, могли бы стать различные электрореактивные двигатели (ЭРД), работы над которыми зачастую велись параллельно с работами над химическими двигателями и которые характеризуются значительно более высокими значениями удельного импульса. К категории ЭРД принято относить самые разнообразные конструкции, использующие для ускорения рабочего тела ракетного двигателя электричество. Их наиболее привлекательные схемы рассмотрены ниже.

Высокий удельный импульс достигим

29 декабря 1971 г. со стартовой площадки космодрома «Плесецк» был произведен пуск ракеты, выведшей на околоземную орбиту метеорологический спутник «Метеор-1-10». Это был обычный спутник, укомплектованный стандартной для метеорологических измерений телевизионной, инфракрасной и актинометрической аппаратурой; отличалась лишь высота его орбиты, составлявшая примерно 890 км против обычных 600–700 км для предыдущих «Метеоров». Главной его особенностью был плазменный двигатель Эол-1, впервые ус-

тановленный на спутник для проведения летных испытаний. После тестового включения на несколько минут, в течение которых Эол-1, названный в честь мифического полубога — повелителя ветров, продемонстрировал соответствие рабочих параметров плановым характеристикам, двигатель проработал более 170 ч, обеспечив подъем орбиты «Метеора» на 16,5 км.

Это событие, при всей его кажущейся неприемлемости, относится к числу важнейших достижений отечественной космонавтики, поскольку оно доказало возможность практического использования ЭРД в космосе. Справедливости ради отметим, что в 1964 и в 1970 гг. НАСА осуществило продолжительное тестирование работоспособности ЭРД несколько иной разновидности, так называемых ионных двигателей, первый из которых создал Г.Кауфман, в суборбитальном и космическом полетах (миссии SERT I и SERT II), однако переход к реальному использованию таких двигателей пришелся лишь на 1990-е годы.

Отличия в принципах работы ионных и плазменных двигателей мы рассмотрим ниже. Здесь нам важно лишь то, что и те и другие продемонстрировали способность обеспечивать удельный импульс на уровне 10–70 км/с.

Основными недостатками существующих ЭРД остаются небольшая мощность (100 Вт — 50 кВт) и невысокие тяговые характеристики (5–500 мН). Двигатель с тягой 10 мН на велосипеде будет разгонять его до обычной скорости ~30 км/ч около суток, а при тяге 100 мН — более двух часов, и то лишь в отсутствие какого-либо сопротивления движению! Но нет худа без добра: малая тяга снимает необходимость сверхточного расчета продолжительности работы двигателя для придания аппарату нужного импульса. Поэтому существующие ЭРД широко используются как рулевые и корректирующие.

В космосе сопротивление практически отсутствует, и, если двигатель способен работать долго, достижение требуемых высоких скоростей принципиально возможно. Так, автоматическая межпланетная станция «Dawn», запущенная НАСА 27 сентября 2007 г. для исследования астероида Веста и карликовой планеты Церера, была оснащена ионными двигателями с тягой всего 30 мН и с удельным импульсом 30,4 км/с. В качестве рабочего тела использовался ксенон, запас которого на борту аппарата был всего 425 кг. В середине 2011 г. станция достигла Весты и зондировала ее около года, а в марте 2015 г., преодолев 4,9 млрд км, была захвачена гравитационным полем Цереры, после чего ионные двигатели были успешно использованы для спуска на рабочую орбиту, последующих маневров и неоднократных изменений орбиты. Двигателей было три, хотя энергетики «Dawn» хватало на работу лишь одного из них — остальные служили страховочными, на случай сбоев, связанных в основном с попаданием

в работающее устройство космических частиц и с электрическими пробоями. Однако сбоев системы управления оказалось значительно больше; в этих случаях выручала перезагрузка системы.

Этих примеров вполне достаточно, чтобы заключить: космические ЭРД в XXI в. — не экзотика, они действительно способны обеспечить высокий удельный импульс. Совершенствование и оптимизация конструкций ЭРД наряду с повышением их тягово-мощностных характеристик сегодня представляется наиболее обоснованным путем развития ракетных двигательных систем.

Плазма как рабочее тело

Чтобы реализовать принцип реактивного движения, необходим источник энергии для ускорения выбрасываемого из ракеты рабочего тела. Такой источник может скрываться в самом рабочем теле (рис.2,а), как в случае химического топлива, но может быть и внешним (рис.2,б).

Если в качестве внешнего источника используется источник электроэнергии, ракетный двигатель относят к категории ЭРД независимо от способа ввода этой энергии в рабочее тело. Поэтому популяция ЭРД весьма многочисленна и включает множество разновидностей. Например, можно нагревать рабочее тело, пропуская через него ток, — так устроены электротермические и дуговые ЭРД (см. рис.2,б). Однако этот вариант малоэффективен и не обеспечивает высокие скорости истечения.

Ключевая идея заключается в переводе рабочего тела в состояние плазмы с последующим ускорением заряженных частиц. Способы такого ус-

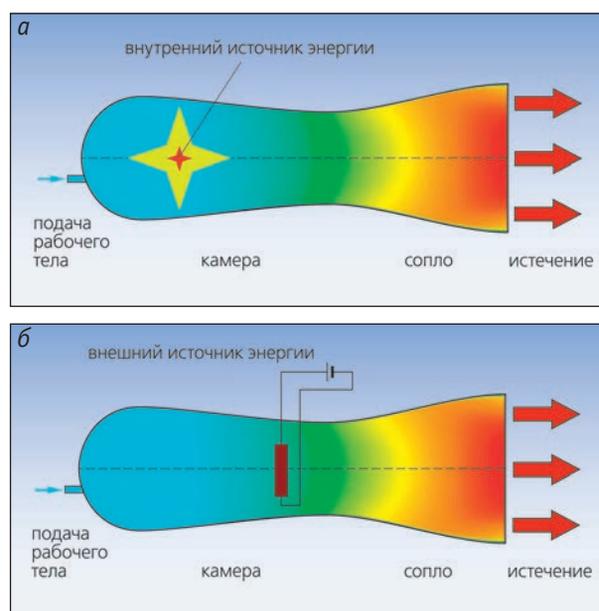


Рис.2. Схематическое изображение ракетного двигателя с внутренним источником энергии (а) и электротермического ЭРД (б).

корения также могут быть различны, по ним (и по методу нагрева) как раз и проводят внутреннюю классификацию ЭРД (рис.3). В принципе все ЭРД, в которых происходит ионизация рабочего тела и образование плазмы, могут быть отнесены к плазменным ракетным двигателям (ПРД), но на рис.3 такими называются ЭРД, обеспечивающие ускорение плазмы как целого, т.е. без разделения ее на различные составляющие — ионы и электроны.

Непосредственное ускорение заряженных частиц электрическим полем без обязательного нагрева рабочего тела — вот та «плодотворная дебютная идея», которая была реализована в плазменных двигателях, отнесенных на рис.3 к категории электростатических. Поясним разницу. Нагрев предусматривает сбалансированное поступление энергии во все степени свободы частиц вещества — атомов или молекул; при этом температура как мера нагрева характеризует среднюю кинетическую энергию хаотического движения частиц, находящихся в состоянии локального термодинамического равновесия. Для создания же реактивной тяги необходимо придать частицам направленный импульс, а энергия их движения в поперечных направлениях может быть невелика. Электростатические ЭРД основаны на том, что в статических электрическом и магнитном полях заряженные частицы на-

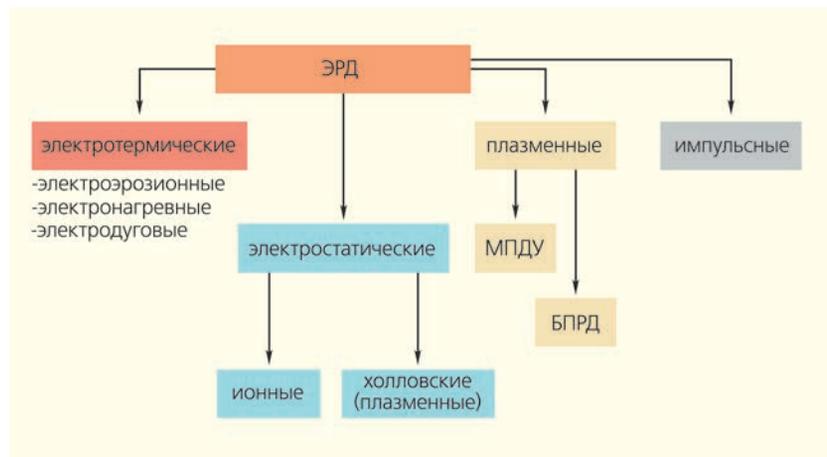


Рис.3. Возможная классификация ЭРД.

бирают энергию, когда движутся вдоль направления электрического поля.

Наиболее простым и естественным способом этот принцип реализуется в ионных двигателях — ионниках (рис.4). Положительные ионы, наиболее массивная компонента плазмы, ускоряются электростатическим полем конденсатора, пластины которого выполнены в виде сеток. Ионы образуются в области ионизации (возникающие при этом электроны уходят на специальные электроды-коллекторы) и поступают в объем конденсатора через сетчатый анод. Там они ускоряются электрическим полем и по инерции пролетают сквозь сетчатый катод. Такая система будет работать, если пролетевшие через катод ионы не вернуться на него обратно. Для этого в закатодное простран-

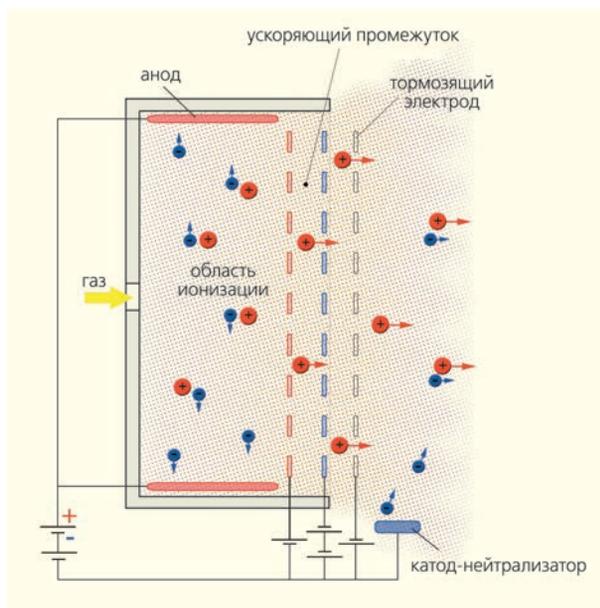


Рис.4. Принципиальная схема ионного двигателя и внешний вид ионного двигателя ИД-500 разработки Исследовательского центра имени М.В.Келдыша.

во инжектируется необходимое количество электронов, обеспечивающее электрическую нейтральность вытекающей из двигателя плазмы.

Способ ионизации не критичен для работы ионника: для ионизации могут быть использованы газовые разряды любого типа, обычный электродный или безэлектродный, под действием высокочастотного поля, соприкосновение с нагретой поверхностью (контактная ионизация), ультрафиолетовое или лазерное излучение, электронный пучок и др. Важны лишь энергозатраты на ионизацию, поскольку энергетическая цена иона — едва ли не самая существенная составляющая, влияющая на итоговую энергоэффективность ЭРД.

Именно исходя из желания минимизировать эти энергозатраты в качестве рабочего тела ионника часто выбирают ксенон. Последний имеет самый низкий потенциал ионизации (12.1 В) среди инертных газов и наименьшее отношение потенциала ионизации к атомному весу (0,387 В/а.е.). Лучшими характеристиками обладают только благородные, щелочные и некоторые другие металлы, но по сравнению с ними у ксенона имеются свои преимущества: химическая инертность, экологическая безвредность, коррозионная безопасность и др. При высоком давлении его можно хранить в жидком виде практически при комнатной температуре. Однако ксенон довольно дорог (более 2500 \$/кг): добывается он из воздуха, но его концентрация в атмосфере крайне невелика (в 1 м³ содержится всего лишь 0.08 мл ксенона). Мал (около 70 т в год) и объем мирового производства ксенона, хотя он несколько подрос за последние годы, что связано с новыми применениями данного газа — в источниках света и в медицине. Поэтому при крупномасштабном развитии техники ЭРД использование такого рабочего тела может служить определенным ограничением.

На сегодняшний день элементы конструкций ионных двигателей достаточно хорошо оптимизированы. Разработаны численные коды, детально рассчитывающие траектории ионов с учетом реальной геометрии и других особенностей различных ионников, что позволяет не только конструировать соответствующие ионно-оптические системы, но и определять скорость эрозии (прежде всего — ускоряющего электрода, основной лимитирующий фактор срока службы). Для качественного же повышения эксплуатационных характеристик ионников есть препятствия, связанные с самим принципом работы. В первую очередь это наличие объемного положительного заряда в ускоряющем промежутке. Такой заряд мешает проникновению новых ионов из зоны ионизации и, следовательно, повышению ионного тока. В физике плазмы хорошо известен закон трех вторых, или закон Ленгмюра, для вольт-амперной характеристики плазменного диода в режиме пространственного заряда. Однако сколько-нибудь зна-

чительное повышение рабочего тока устройства путем повышения напряжения в такой системе невозможно: диод переходит в режим насыщения, а в самом ускоряющем промежутке возможны пробой. По этой же причине малопродуктивны попытки заметно увеличить ионный поток, повышая концентрацию ионов в зоне ионизации. Каждый квадратный сантиметр апертуры ионника дает вклад в его тягу на уровне нескольких тысячных долей ньютона. Поэтому пока увеличение мощности и тяги ионной двигательной установки достигается простым увеличением либо диаметра двигателя, либо числа двигателей в установке.

Устранение объемного заряда, присутствие которого характерно для всех типов ионников, предусмотрено в конструкциях, получивших название «холловские двигатели». Компенсацию объемного заряда ионов можно осуществить электронами, ограничив их перемещение в пространстве посредством магнитного поля. Действительно, ситуация, когда ионы не замагничены и свободно ускоряются электрическим полем, а электроны «привязаны» к силовым линиям магнитного поля, вполне может быть реализована из-за большого различия в массах этих частиц (радиус поперечного вращения заряженной частицы в магнитном поле, называемый ларморовским, для электрона и иона с равной энергией отличается в корень квадратный из отношения масс). Относительно небольшое магнитное поле практически не воздействует на траекторию ионов, тогда как движение электронов поперек магнитных силовых линий имеет характер быстрого ларморовского вращения и относительно медленного дрейфа «ларморовских кружков». Последний приводит к электронному току в перпендикулярном по отношению к магнитному и электрическому полям направлении — разновидности известного эффекта Холла, что и дало название таким устройствам.

Данная идея, зародившаяся в Курчатовском институте, легла в основу двух разновидностей холловских двигателей — двигателя с анодным слоем (ДАС) и стационарного плазменного двигателя (СПД). Основное различие между ними состоит в размере ускоряющего промежутка с магнитным полем: в конструкциях ДАС, разрабатывавшихся А.В.Жариновым с сотрудниками — сначала в Курчатовском институте, затем в Центральном научно-исследовательском институте машиностроения (ЦНИИмаш) — ускорение происходит в относительно узком прианодном слое, а в СПД А.И.Морозова работает весь плазменный объем.

Принципиальная схема холловского двигателя представлена на рис.5 (подробнее см. [3, 4]). Синими линиями условно показаны траектории центров ларморовских орбит электронов, дрейфующих в азимутальном направлении. Этот дрейф и есть искомый холловский ток, давший название таким системам. Как и силовые линии

магнитного поля, дрейфовые траектории являются эквипотенциалами. В итоге формируется распределение электрического потенциала, градиент которого направлен в основном вдоль оси системы, образуя систему электростатического ускорения «незамагниченных» ионов. Небольшая кривизна магнитных силовых линий на выходе двигателя придает этой системе фокусирующие свойства. Ионы ускоряются и вылетают из двигателя, создавая реактивную тягу. Их объемный заряд нейтрализуется электронами, подаваемыми с катода-нейтрализатора, — так же, как и в ионном двигателе.

Сегодня СПД — это апробированная и весьма надежная конструкция (срок службы порядка 10^4 ч), обеспечивающая плотность ионного тока на выходе двигателя на уровне $\sim 10^{-1}$ – 10^{-2} А/см² при энергии ионов $\sim 10^2$ – 10^3 эВ и дающая удельный импульс до нескольких десятков километров в секунду. Двигатели этого семейства (рис.6) выпускаются серийно и устанавливаются в качестве двигателей коррекции и/или рулевых на самых различных КЛА, причем не только отечественных, но также французских и американских. Вместе с тем попытки масштабирования СПД (как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения мощности СПД по отношению к традиционному киловаттному диапазону) оказались не вполне успешны и породили уважительно-мистическое отношение к данной морозовской конструкции — простой инженерно, но крайне сложной с точки зрения физики происходящих процессов.

Углубленное понимание физики необходимо для дальнейшего развития и совершенствования холловских двигателей. Примером явления, требующего объяснения, могут служить так называемые споуки (от англ. spoke — спица) — плазменные образования, видимые с торца СПД (рис.7), формирование которых может играть как негативную (разрушающую разряд), так и позитив-

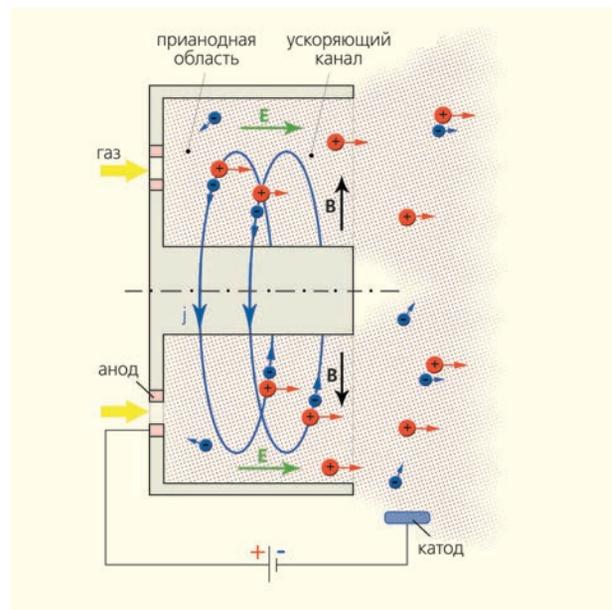


Рис.5. Принципиальная схема холловского двигателя.

ную (обеспечивающую повышенную транспортировку тока) роль для работы двигателя. Свидетельством неуклонно возрастающего интереса к физике ЭРД вообще и СПД в частности может служить существенное расширение в последние годы состава и географии участников представительных международных конференций, организуемых раз в два года Обществом ракетного электродвижения (Electric Rocket Propulsion Society)*. В 2005 г. Общество, отмечая столетие исследований в этой области, учредило награду — медаль «За выдающиеся достижения в области электроракетных двигателей». А.И.Морозов оказался среди первых шести награжденных, а когда ее стали

* См.: erps.spacegrant.org

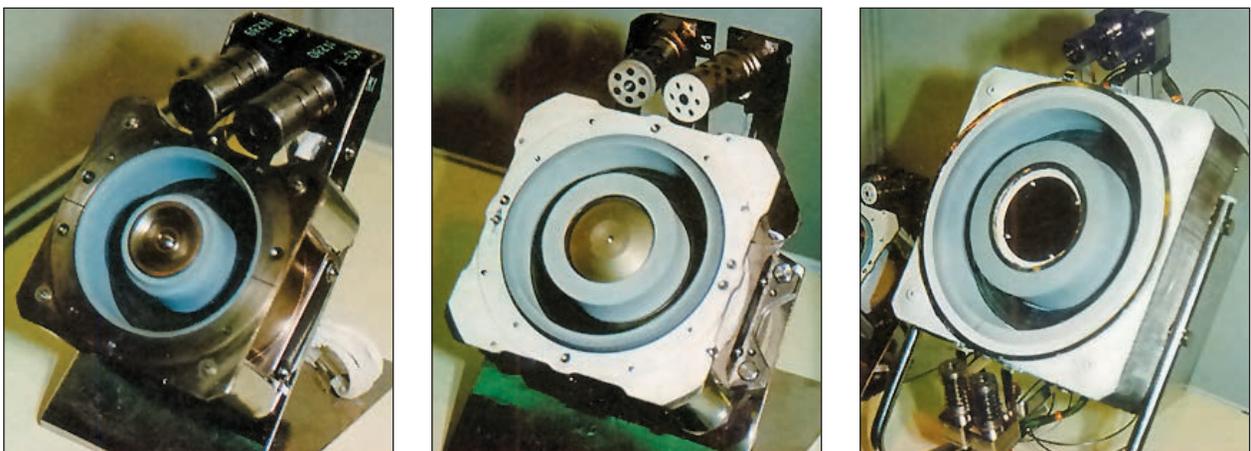


Рис.6. Линейка двигателей СПД разработки ОКБ «Факел» (г.Калининград) [7]. Слева направо: СПД-70, СПД-100, СПД-200 (индекс означает диаметр выходного канала в миллиметрах).

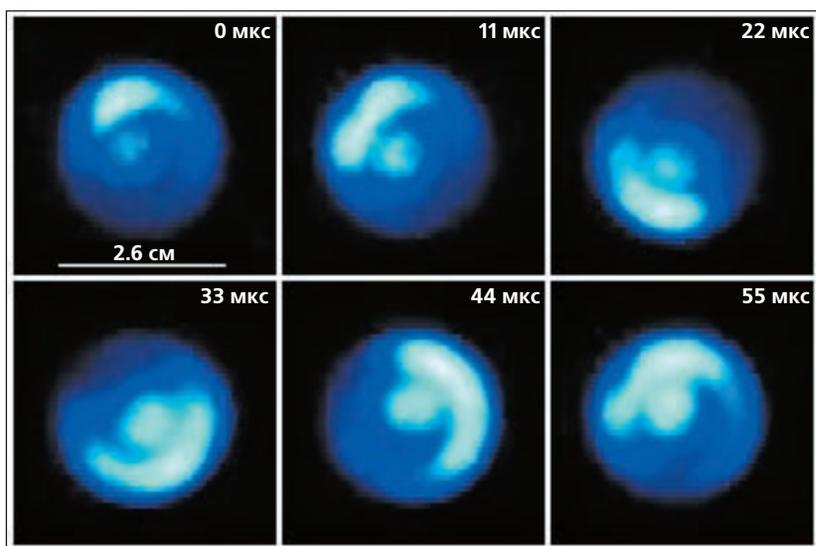


Рис.7. Изображения сплюсков (съемка высокоскоростной камерой) [8].

присуждать каждые два года, среди лауреатов оказались еще двое российских ученых: В.П.Ким (2007) и А.В.Жаринов (2011).

Немного истории

На волне общего энтузиазма, связанного с первыми космическими успехами, 2 июля 1959 г. в Курчатовском институте, в кабинете у академика Л.А.Арцимовича, который возглавлял здесь термоядерные исследования, состоялось совещание о возможности построить двигатель для марсианского корабля. В качестве ориентиров фигурировали тяга порядка 10 кгс, скорость истечения 100 км/с и мощность 10 МВт. А.М.Андрианов предложил плазменный импульсный двигатель, А.И.Морозов — магнитно-плазменный аналог сопла Лавалю и П.М.Морозов — двигательный вариант щелевого источника ионов, разработанного им ранее для электромагнитного разделения изотопов. Однако все эти проекты для тягового двигателя марсианской экспедиции не годились — не было источников питания необходимой мощности (проблема создания таких источников для космических двигателей продолжает оставаться весьма острой и поныне). Поэтому развитие получили сравнительно маломощные варианты ЭРД, которые можно было использовать для ориентации космических аппаратов и корректировки параметров их траекторий.

Из разработок этого направления в тот период самым продвинутым и отвечающим задаче оказался плазменно-эрозионный двигатель Андрианова. Он стал первым устройством такого типа, выведенным в космос: в 1964 г. его установили на аппарате «Зонд-2» в качестве двигателя ориентации с питанием от солнечных батарей. Это был импульсный

двигатель, дающий импульсы длительностью ~10–30 мкс с частотой 1 Гц. Энерговклад в импульс был всего ~57 Дж, скорость истечения — 2–5 км/с. Двигатель был выполнен в виде двух цилиндрических коаксиальных электродов, разделенных изолятором. К центральному электроду подсоединялась поджигающая игла, соединенная с конденсаторной батареей. При подключении конденсатора между иглой и электродом происходил разряд, вызывающий их испарение (эрозию) и ионизацию. Эта «затравочная» плазма поступала в промежуток между электродами, на которые основная конденсаторная батарея подавала высокое напряжение. Появление плазмы инициировало поверхностный разряд, испаряющий материал изолятора и ионизирующий его молекулы. Нагрев и взаимодействие тока с собственным магнитным полем ускоряли плазму.

Однако необходим был двигатель, способный работать постоянно, и в 1962 г. А.И.Морозов предложил свою, ныне широко используемую, схему плазменного двигателя — уже упоминавшийся СПД. В системе, в которой электроны замагничены, сняты ограничения на плотность тока ионов, обусловленные их объемным зарядом и характерные для схемы с ускорением униполярного потока в ионном двигателе.

Первоначально идея холловских двигателей была встречена «в штывки» не только космическим, но и плазменным сообществом. Вот что писал об этом сам Морозов (цитируем по [6]): «...После полугодовых мучений я пришел к следующей схеме. Основу составляет кольцевой канал с диэлектрическими стенками, в котором создается внешней системой квазирадialное магнитное поле. В глубине канала должен был помещаться анод и газораспределитель. На выходе из канала предлагалось поместить полый термокатод. Таким образом, в канале создавалось продольное электрическое поле. Вместе с радиальным магнитным полем (которое подавляло свободное перемещение электронов от катода к аноду) оно вызывало дрейф электронов по азимуту, создавая «холловский ток». В качестве рабочего вещества по ряду соображений было решено использовать ксенон. В целом процесс должен был проходить следующим образом. Атомы ксенона, поступающие в канал в районе анода, ионизируются в облаке вращающихся электронов и ускоряются в продольном электрическом поле, слабо чувствуя магнитное поле. Выйдя из канала, они «прихватывают» из катода электроны и покидают систему. Ка-

залось бы, все просто и бесспорно. Но стоило мне начать обсуждать эту схему с коллегами-газоразрядчиками, как те сразу переходили на возмущенный крик и буквально выгоняли меня из своих кабинетов. Они кричали, что Морозов невежда, что человечество за 50 лет не смогло создать надтепловое объемное электрическое поле в плазме, что невозможность этого «доказал» Д.Бом, а тут какой-то Морозов пытается все опровергнуть...»

Разумеется, ничего патологического в схеме Морозова не было. Сегодня любой студент, знакомый с основами магнитной гидродинамики, способен объяснить, что присутствие объемного электрического поля в хорошо проводящей среде не только возможно, оно обязательно в случае, когда эта среда движется под углом к магнитному полю. В этом случае условие квазинейтральности плазмы не нарушается и объемный заряд не формируется.

В ходе бурных дискуссий и экспериментальных проверок идея созрела, и во второй половине 1962 г. началась ее конструктивная проработка. В первом варианте была применена секционированная стенка разрядного канала — с тем, чтобы таким образом получать продольное распределение электрического потенциала. В ходе экспериментов выяснилось, что целикомая стенка из изолирующего материала обеспечивает гораздо более стабильную работу устройства. В конце 1968 г. была испытана модель, не требующая принудительного охлаждения. Появилась возможность ориентироваться на космические испытания. К работе подключилось ОКБ «Факел», и совместными усилиями лабораторная модель была доведена «до ума».

Однако при первой же попытке вывести новый двигатель на летные испытания разработчики столкнулись с глухим сопротивлением «космиков», не желавших иметь дело с сомнительным электрическим устройством. В ход пошла «тяжелая артиллерия»: во внедренческую кампанию включился директор Курчатовского института А.П.Александров. Наконец было достигнуто соглашение о постановке СПД на спутник «Метеор», который мы упоминали в начале статьи, — так было положено начало практическому применению ЭРД.

Возможны варианты

Как нетрудно понять из изложенного выше, ускорение плазмы как целого, без разделения на ионную и электронную компоненты, устраняет целый ряд проблем электростатических ЭРД, связанных с разделением

зарядов, последующей зарядовой компенсацией и др. Методы такого ускорения, разумеется, существуют, и наиболее очевидный из них — магнитогидродинамическое (МГД) ускорение, основанное на все том же эффекте Холла.

Как известно, на электрический ток, текущий поперек силовых линий магнитного поля, действует сила Ампера, пропорциональная величине тока и магнитного поля. Если ток течет по плазме, сила Ампера будет ускорять непосредственно саму плазму (рис.8). Такие устройства называют магнитоплазодинамическими ускорителями (МПДУ), они обратны традиционным МГД-генераторам, когда при прокачивании хорошо проводящей среды (плазмы, жидкого металла или электролита) поперек магнитного поля на границах проводника возникает разность потенциалов, которую можно использовать для токосъема.

При больших токах, необходимых для организации мощного плазменного потока, простейшее устройство (рис.8) неработоспособно: собственное поле тока порождает компоненту силы Ампера, которая отжимает плазму и протекающий по ней ток к боковым стенкам. Поэтому среди различных конструкций МПДУ доминируют цилиндрические с осевым сдвигом центрального электрода (катода) относительно анода. В этом случае осевая компонента тока создает азимутальное магнитное поле, взаимодействуя с которым радиальная компонента тока выбрасывает плазму в осевом направлении. Таким образом, можно вообще отказаться от использования внешнего магнитного поля.

Нетрудно понять, что основным фактором, лимитирующим увеличение параметров МПДУ и ограничивающим ресурс, будет износ электродов. Наилучшие результаты демонстрируют вольфрамовые электроды, через которые подается жид-

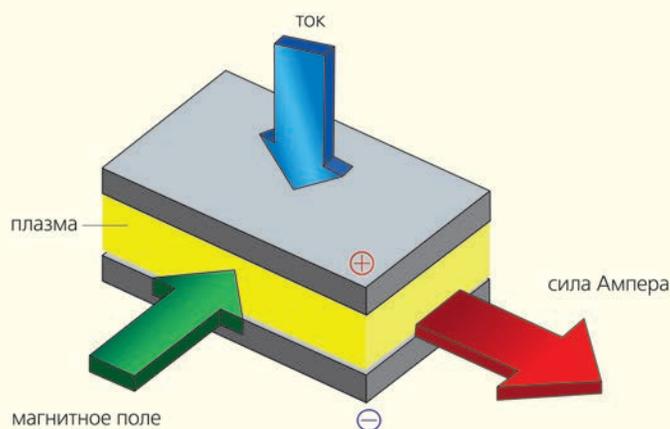


Рис.8. Принцип работы плазменного МГД-ускорителя.

кий литий — при этом его можно использовать и в качестве рабочего тела; полезную роль оказывает добавка бария, снижающая температуру анода и повышающая срок его службы [9].

МПДУ в России конструировали в разных организациях, среди которых ГНЦ «Центр Келдыша» и ОКБ «Факел», Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П.Королева, ЦНИИмаш, Московский авиационный институт и др. Достигнуты весьма впечатляющие параметры в различных МПДУ: мощность на уровне нескольких сот киловатт (вплоть до мегаватта), ресурс — от нескольких часов до нескольких суток, удельный импульс — от единиц до десятков километров в секунду. Но большинство разработчиков, отмечая чувствительность МПДУ к нюансам токово-магнитной конфигурации и к качеству и чистоте состава рабочего тела, а также быстрый износ электродов, считают подобные системы недостаточно надежными.

Возможны ли альтернативы МПДУ, не нарушающие принцип квазинейтральности плазмы? Утвердительный ответ на этот вопрос позволяют дать результаты работ в области управляемого термоядерного синтеза (УТС). Для создания эффективного плазменного ракетного двигателя важна главным образом температура плазмы, и она может быть вполне доведена до килоэлектронвольтового уровня с помощью развитой для задач УТС техники безэлектродного нагрева плазмы. В двигателе не требуется длительного удержания частиц плазмы, необходимого для протекания термоядерных реакций. В отсутствие последних снимается один из ключевых для проблемы УТС технологических вопросов о матери-

але первой стенки реактора, которая должна выдерживать нейтронный и тепловой потоки плотностью в несколько мегаватт на квадратный метр (в двигателе нейтронов нет, а основная энергия будет уноситься вылетающей плазмой, создающей тягу).

По сути, речь идет о возврате к классическому двигателю с нагревом рабочего тела от внешнего источника энергии, с той лишь разницей, что для степени нагрева плазмы высокочастотными волнами с использованием ионно-циклотронного резонанса (ИЦР) нет физических ограничений. В качестве рабочего тела в принципе может использоваться любое вещество: резонансные условия введения мощности обеспечиваются изменением частоты генератора. Возможная блок-схема такого безэлектродного плазменного ракетного двигателя (БПРД, рис.9) включает зону генерации плазмы, где происходит ионизация рабочего вещества и образование первичной плазмы; зону нагрева и ускорения, в которой нагреваются ионы плазменного потока; и магнитное сопло. Магнитное поле связывает эти три элемента в единый модуль, обеспечивает термоизоляцию плазменного потока от стенок и элементов конструкций. В зоне нагрева и ускорения магнитное поле образует асимметричную пробочную ловушку — для обеспечения истечения плазмы в нужном направлении магнитное поле на выходе из зоны генерации должно превышать магнитное поле на входе в сопло. Если мощность ВЧ-генератора достаточна для нагрева ионов за один проход, пробки на входе в сопло может не быть вовсе. Поток плазмы из магнитного сопла создает тягу, которая двигает космический корабль.

Наиболее очевидные резонансные эффекты, гарантирующие эффективный нагрев плазмы, связаны с циклотронным резонансом (ионным и электронным), при котором частота вводимой электромагнитной волны высокой частоты отвечает циклотронной частоте вращения заряженной частицы в магнитном поле. В генераторе плазмы могут быть также использованы так называемые геликонные волны — электромагнитные волны с круговой поляризацией, распространяющиеся вдоль магнитного поля.

Подобный двигатель может быть создан на базе уже имеющихся технологических возможностей. Для магнитной системы обязательным представляется использование высокотемпературных сверхпроводников, что обеспечит необходимую ком-

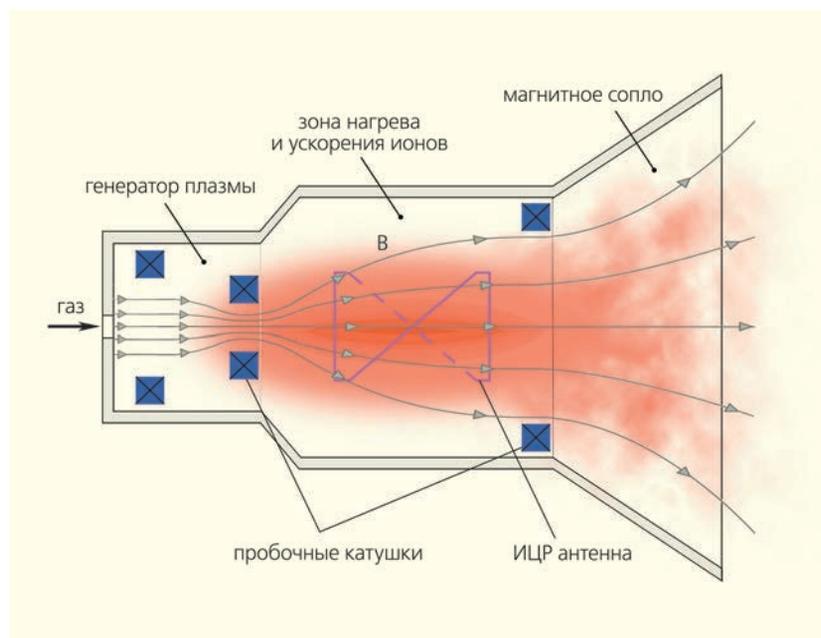


Рис.9. Принципиальная схема безэлектродного плазменного ракетного двигателя.

пактность летного варианта устройства. В НИЦ «Курчатовский институт» такие элементы, существенные для отработки принципов БПРД, реализованы в исследовательской установке ПС-1 (рис.10). Но для проведения полномасштабных экспериментальных работ и наземных испытаний вариантов двигателя нужны испытательные стенды, имитирующие космические условия, т.е. обладающие высокопроизводительными системами криогенной вакуумной откачки.

В настоящее время мощный БПРД разрабатывают в США в рамках проекта магнитоплазменного ракетного двигателя с изменяемым удельным импульсом (VASIMR) [10]: варьировать в широких пределах удельный импульс и тягу при заданной мощности, вводимой в плазму, можно, регулируя поток холодной плазмы из генератора в ускоритель (при увеличении потока растет тяга и уменьшается импульс, и наоборот). Небольшая экспериментальная программа, финансировавшаяся НАСА, стартовала в Центре термоядерной плазмы Массачусетского технологического института в начале 1980-х, а в начале 1990-х она была переведена в Джонсоновский космический центр НАСА. Уже первая стадия исследований показала эффективность плазменных процессов, обеспечивающих работу двигателя по схеме БПРД. Инициатором проекта стал Ф.Чанг-Диас, американский физик и астронавт НАСА (с 1986 по 2002 г. совершил семь космических полетов), который продолжил проект в 2005 г. (после ухода из НАСА) в основанной им «Ad Astra Rocket Company». Последовательно наращивая мощность лабораторных вариантов устройства, «Ad Astra» разрабатывает летный вариант двигателя, получивший название VF-200, наземные испытания которого были закончены в середине 2012 г.

К настоящему моменту сформулирована программа сертификации VF-200 для постановки его на Международную космическую станцию и другие КЛА; идут ресурсные испытания, в случае успеха которых предусматриваются летные испытания, затем — трехлетняя опытная эксплуатация на МКС или специальной КЛА для определения реальных рабочих характеристик двигателя и направлений его совершенствования. Ожидаемые параметры летного варианта VF-200 таковы: удельная масса 8 кг/кВт, ВЧ-мощность ~200 кВт (геликоновый разряд ~30 кВт, ионный циклотронный нагрев ~170 кВт), КПД двигателя при максимальной мощности 72%.



Рис.10. Установка ПС-1 в Курчатовском институте для исследования плазменных рабочих процессов в ПРД.

* * *

Какие выводы следуют из представленной картины состояния дел с ЭРД?

Дальнейшее совершенствование электростатических ЭРД — ионных и холловских — возможно, однако шаги по сколько-нибудь существенному повышению их мощности и удельного импульса не очевидны и требуют значительно более глубокого проникновения в физику протекающих процессов и новых конструктивных решений на их основе.

Сегодня в качестве мощных ЭРД рассматриваются только двигатели, обеспечивающие ускорение квазинейтрального потока плазмы. Магнитоплазодинамические ускорители вполне работоспособны, однако имеют весьма ограниченный ресурс, определяемый сроком службы электродов и постоянством магнито-токовой конфигурации.

В исследованиях по магнитному УТС известны методы генерации и поддержания униполярного электрического тока с помощью электромагнитных волн (нижнегибридных и циклотронных). Однако теоретически существующая возможность ускорения плазмы в ЭРД путем прямой передачи импульса от электромагнитных волн, инжектируемых в рабочий объем плазменного двигателя, до сих пор серьезно не обсуждалась и не имеет конструктивных проработок.

Использование же электромагнитных волн для нагрева замagnetической плазмы вполне реально и позволяет рассчитывать на значительное расширение диапазона рабочих параметров плазменных ракетных двигателей. В отсутствие принципиальных ограничений мощность БПРД фактически определяется мощностью доступного элек-

тропитания. Не следует сбрасывать со счетов и возможность появления дополнительного внутреннего источника энергии в таких системах в виде термоядерных реакций, особенно если не вести речь непременно о самоподдерживающихся реакциях. Без этого требования, необходимого для функционирования энергетического реакто-

ра, перспективы использования энергии термоядерного синтеза оказываются значительно менее отдаленными. Однако представляется, что и без такого источника развитие космической отрасли в текущем столетии в значительной степени будет определяться прогрессом в разработке плазменных ракетных двигателей. ■

Литература / Reference

1. Циолковский К.Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами. Научное обозрение. 1903; 5: 45–75. [Tsiolkovsky K.E. Research of the world spaces by reactive devices, Scientific Review. 1903; 5: 45–75. (In Russ.)]
2. Морозов А.И. Разработка идеологии стационарных плазменных двигателей. Физика плазмы. 2003; 29(3): 261–276. [Morozov A.I. The conceptual development of stationary plasma thrusters. Plasma Physics Reports. 2003; 29(3): 235–250.]
3. Morozov A.I., Savelyev V.V. Fundamentals of plasma thruster theory. Reviews of Plasma Physics. 2000; 21: 203–391.
4. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. М., 2006. [Morozov A.I. Introduction to Plasma Dynamics. CRC Press, 2012.]
5. Горшков О.А. Отечественные электроракетные двигатели сегодня. Новости космонавтики. 1999; 7: 56–58. [Gorshkov O. Domestic electric propulsion engines today. News of Cosmonautics. 1999; 7: 56–58. (In Russ.)]
6. Ильгисонис В.И. Классические задачи физики горячей плазмы. М., 2015. [Ilgisonis V.I. Classical Problems of Hot Plasma Physics. Moscow, 2015. (In Russ.)]
7. Raitses Y., Kaganovich I., Smolyakov A. Effects of the gas pressure on low frequency oscillations in ExB discharges. 34 IEPC. Kobe, Japan, 2015. IEPC-2015-307.
8. Арцимович Л.А., Андронов И.М., Есипчук Ю.В. и др. Разработка стационарного плазменного двигателя (СПД) и его испытание на ИСЗ «Метеор». Космические исследования. 1974; 12(3): 451–468. [Artsimovich L.A., Andronov I.M., Esipchuk Yu.V., et al. Development of stationary plasma thruster (SPT) and its test on the “Meteor” satellite. Space Researches, 1974; 12(3): 451–468.]
9. Gorshkov O.A., Shutov V.N., Kozubsky K.N. et al. Development of High Power Magnetoplasmadynamic Thrusters in the USSR. 30 IEPC. Florence, Italy, 2007. IEPC-2007-136.
10. Chang-Diaz F.R., Bengston R.D., Baity F.W. The physics and engineering of the VASIMR engine. Joint Propulsion Conference 17–19 July 2000. Huntsville, Alabama.

Plasma thrusters and the future of space exploration

M.V.Kovalchuk¹, V.I.Ilgisonis¹, V.M.Kulygin¹

¹National Research Centre “Kurchatov Institute” (Moscow, Russia)

The prospects of space exploration are directly related to the development of rocket propulsion systems. Expected progress in this area will be largely based on the existing experience of plasma thruster operation and on the results of multiyear thermonuclear fusion and plasma physics researches. New developments allow one to expect a substantial increase in the thrust force and power characteristics of such thrusters in comparison with traditional electric rocket engines.

Keywords: electric spacecraft propulsion, plasma thrusters, plasma flows, resonant heating.