



Сканировал и обработал Юрий Аболонко (Смоленск)

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

3/1985

Издается ежемесячно с 1971 г.

А. И. Акишин,
доктор технических наук

Л. С. Новиков,
кандидат физико-математических наук

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

в приложении этого номера:
НОВОСТИ ЗАРУБЕЖНОЙ КОСМОНАВТИКИ

Издательство «Знание» Москва 1985

ББК 39.62
А 39

СОДЕРЖАНИЕ

Старые проблемы новой техники	3
Было ли это неожиданным?	6
Положительно или отрицательно?	10
Заряды космических пылинок и планет-гигантов	12
Полет в ионосфере	19
Сквозь завесу полярных сияний	22
Будет ли работать ускоритель в космосе?	25
Краткое свидание с небесной странницей	30
Откуда приходит горячая плазма?	36
Спутник в математических сетях	41
Потенциал ИСЗ можно измерить	47
Электризация ИСЗ в лаборатории	50
Электронное разрушение диэлектриков	52
Как же бороться с электризацией	55
Заключение	59
Литература	61
НОВОСТИ ЗАРУБЕЖНОЙ КОСМОНАВТИКИ	62

Акишин А. И., Новиков Л. С.

Электризация космических аппаратов. – М.: Знание, 1985. – 64 с, ил. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 3).

11 к.

В брошюре рассматриваются физические и прикладные аспекты электризации космических аппаратов и космических тел естественного происхождения, анализируются причины, приводящие к электризации космических аппаратов, описываются методы исследования различных явлений, связанных с этой электризацией, и способы защиты космических аппаратов от воздействия статического электричества.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся современными проблемами космической техники.

3607000000

ББК

39.62

6Т6

© Издательство «Знание», 1985 г.

СТАРЫЕ ПРОБЛЕМЫ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Покинув поверхность Земли, космический аппарат (КА) начинает путешествие по безграничному океану Вселенной, в просторах которого космические бури обрушивают на него потоки плазмы, электромагнитных излучений с разными длинами волн и многое другое, что составляет космическую среду. Под действием этих факторов КА, в частности, приобретает некоторый электрический заряд и обусловленный им электрический потенциал относительно окружающей плазмы. Знак и величина электрического заряда и потенциала КА зависят как от свойств среды, в которой проходит полет, так и от свойств самого КА, в первую очередь от электрофизических характеристик материалов его внешней оболочки и от геометрических особенностей конструкции.

Разные участки поверхности КА могут заряжаться неодинаково: из-за различных условий воздействия внешних факторов на эти участки, из-за различий в электрофизических свойствах находящихся на них материалов. Типичным примером здесь является приобретение неодинаковых зарядов освещенным и неосвещенным участками поверхности КА в сильно разреженной космической плазме. Поскольку поверхность современных КА на 80 – 90% покрыта диэлектрическими материалами (терморегулирующими покрытиями, защитными стеклами солнечных батарей и т. п.), потенциалы различным образом заряженных ее участков не могут выровняться. Происходит так называемое *дифференциальное заряджение*, при котором между отдельными участками поверхности КА появляются электрические напряжения.

В некоторых случаях возникающие на КА потенциалы пренебрежимо малы (десятые доли вольта), в других случаях они измеряются киловольтами и могут существенно влиять на функционирование КА.

На запущенных в начале 70-х годов первых геостационарных искусственных спутниках Земли (ИСЗ) (орбита геостационарных ИСЗ лежит на высоте 36 000 км в экваториальной плоскости) было зафиксировано значительное количество различных неполадок в работе бортовой аппаратуры. Так, некоторые американские геостационарные ИСЗ, предназначенные для обеспечения радиосвязи и телевизионных передач, не смогли из-за этого нормально функционировать. Неполадки возникали в самых различных устройствах геостационарных ИСЗ. В электронных системах появлялись ложные команды на включение и выключение аппаратуры, нарушалась нормальная подача электроэнергии от солнечных батарей, самопроизвольно менялась ориентация антенн и т. д. Чаще всего через некоторое время нормальная работа аппаратуры восстанавливалась, но наблюдались и необратимые ее повреждения. Малоприятно, если во время телевизионной трансляции интереснейшего хоккейного или футбольного матча изображение вдруг исчезает с экрана. Но ведь через геостационарные ИСЗ передается большое количество самой разнообразной информации, потери которой во многих случаях могут оказаться невозможными!

Было высказано предположение, что наблюдаемые аномальные явления связаны с дифференциальным заряджением ИСЗ до высоких потенциалов, приводящим к электрическим разрядам на поверхности ИСЗ. Электромагнитные помехи, возникающие при разрядах, и могли явиться непосредственной причиной нарушений в работе бортовой аппаратуры.

Результаты измерений параметров окружающей плазмы, проведенных затем на геостационарных ИСЗ, прямо указали на заряджение ИСЗ в некоторых случаях до отрицательных потенциалов в несколько киловольт. Позднее на ИСЗ были установлены специальные приборы для регистрации электромагнитных помех и измерения потенциала поверхности, которые позволили убедиться в том, что возникающие неполадки действительно связаны с накоплением электрических зарядов на ИСЗ.

Статическое электричество создало человечеству немало барьеров в различных сферах его технической деятельности, в том числе и в нелегком деле покорения неба. Маленькая искра, возникшая из-за разряда статического электричества, явилась, возможно, той последней крупинкой, которая окончательно склонила чашу весов в пользу самолетов в их споре с дирижаблями за господство в воздухе в конце 30-х годов. Во всяком случае попытки использования дирижаблей в качестве пассажирского воздушного транспорта были прекращены после гибели гигантского дирижабля от пожара, вызванного электрическим разрядом.

Этот исполинский воздушный корабль длиной около 250 м появился в небе Нью-Йорка 6 мая 1937 г., совершив трехсуточный перелет через Атлантический океан из Германии в США. Довольно длительное время дирижабль кружил на небольшой высоте над Нью-Йорком и пошел на посадку лишь при явных признаках приближающейся грозы. Корабль уже завис над посадочной площадкой, когда в его кормовой части внезапно произошла вспышка, раздался взрыв, и через мгновение весь огромный корпус корабля, вмещивший почти 200 000 м³ водорода, был объят пламенем. Из более ста пассажиров и членов команды погибли почти все.

Катастрофа произошла из-за заряджения корпуса дирижабля атмосферным электричеством в предгрозовом небе. Случайно возникшая искра воспламенила смесь водорода с воздухом, что привело к взрыву и пожару.

Но и самолеты, ставшие властелинами воздушного океана, оказались подверженными воздействию статического электричества, возникающего на них в результате взаимодействия с жидкими и твердыми частицами облаков и осадков. Причем с увеличением скорости самолетов острота этой проблемы возрастала: выяснилось, что ток, заряжающий самолет при полете в облаках и осадках, растет с увеличением скорости значительно сильнее, чем разряжающий ток.

На самолетах наблюдались электрические разряды разных форм и связанные с этим явлениями электромагнитные помехи и повреждения элементов конструкции. При заряджении самолета статическим электричеством резко возрастает и опасность поражения его молнией. По имеющимся оценкам вероятность прямого поражения самолета молнией во время

полета в грозном облаке составляет 10^{-4} , т. е. из 10 000 пролетов через облако молния в одном случае почти всегда попадает в самолет.

Если же самолет электрически заряжен, эта вероятность возрастает на два порядка – один случай поражения молнией приходится уже на 100 пролетов через облако. По данным метеорологической службы США, половина случаев поражения молнией самолетов при наличии на них электрических зарядов происходит в облаках, где до появления самолета молний вообще не было. Заряженный самолет, таким образом, инициирует молнию, вызывая разряд атмосферного электричества на себя. Это не удивительно, если учесть, что потенциал самолета относительно окружающей среды может достигать полутора миллионов вольт!

Известно немало случаев гибели самолетов от поражения молнией. По этой причине, например, потерпел катастрофу пассажирский самолет «Боинг-707» 8 декабря 1963 г. при заходе на посадку в аэропорту Филадельфии. После попадания молнии самолет загорелся и взорвался.

Даже космическому кораблю пришлось испытать воздействие грозных разрядов. Молния дважды ударила в космический корабль «Аполлон-12» во время его запуска 14 ноября 1969 г. На этот раз обошлось без серьезных повреждений. При проверке после старта были обнаружены лишь незначительные нарушения в системе энергоснабжения космического корабля, и он смог продолжить полет к Луне. Правда, этот случай следует отнести скорее к числу курьезных.

Прошло, однако, совсем немного времени, и многочисленные аномалии, наблюдавшиеся в работе бортовых систем первых геостационарных ИСЗ, потребовали уже вполне серьезно взглянуть на проблему защиты КА от «молний», рождающихся на его борту – электрических разрядов, обусловленных дифференциальным зарядением поверхности.

Итак, при всех отличиях в условиях полета и конструкциях летательных аппаратов воздухоплаванию, авиации и, наконец, космонавтике пришлось столкнуться с общей проблемой – электризацией аппаратов в полете.

БЫЛО ЛИ ЭТО НЕОЖИДАНЫМ?

Нельзя сказать, что обнаруженное зарядение ИСЗ до высоких потенциалов явилось полной неожиданностью. Основные теоретические положения, описывающие процесс электризации космических тел при взаимодействии с окружающей плазмой и электромагнитными излучениями, были сформулированы более 40 лет назад. На рубеже 30-х и 40-х годов появились первые научные работы, в которых рассматривалось зарядение частиц космической пыли и влияние электрического заряда пылинок на их движение. Позднее обсуждался также и процесс зарядения лунной поверхности.

Начало второго этапа в изучении проблемы электризации космических объектов связано с подготовкой к проведению научных экспериментов с помощью ИСЗ. Видное место здесь занимают исследования советских ученых. В 1957 г. были опубликованы работы К. И. Грингауза, И. М. Имянитова, Б. А. Миртова и В. Г. Истомина, заложившие основы методики измерений параметров космической плазмы и электрических полей в плазме приборами, установленными на ИСЗ. В этих работах были даны оценки возможного влияния зарядения ИСЗ на результаты экспериментов. Глубокий теоретический анализ явлений, возникающих при движении ИСЗ в космической плазме, был осуществлен Я. Л. Альпертом, А. В. Гуревичем и Л. П. Питаевским. Под руководством И. М. Подгорного был выполнен большой цикл экспериментов по моделированию обтекания тел космической плазмой, давший много важной информации, в том числе для понимания процессов электризации ИСЗ.

Третий этап изучения проблемы электризации, начавшийся в 70-х годах, связан с исследованием механизмов высоковольтного дифференциального зарядения геостационарных ИСЗ и других КА и с выработкой методов борьбы с этим явлением.

Конечно, приведенное здесь разделение истории изучения проблемы электризации космических тел на этапы является в значительной степени условным, поскольку на всех этапах появлялись научные работы, затрагивающие разные стороны проблемы. Следует отметить, что еще в 1961 г. советские ученые В. Г. Курт и В. И. Мороз предсказали возможность отрицательного зарядения ИСЗ до потенциалов 15 – 20 кВ. Указанные величины были вычислены на основании некоторых предположений о возможных соотношениях частиц низких и высоких энергий в космической плазме, поскольку имевшиеся в то время весьма ограниченные экспериментальные данные еще не позволяли достаточно достоверно судить об истинных значениях этих параметров в различных областях космического пространства.

Результаты измерений, выполненных в 70-х годах на геостационарных ИСЗ, подтвердили справедливость сделанных оценок и предсказанную возможность воздействия на ИСЗ интенсивных потоков электронов с энергией 20 – 30 кэВ при низкой концентрации заряженных частиц малых энергий в окрестности ИСЗ.

К началу эксплуатации геостационарных ИСЗ уже был накоплен достаточно солидный объем теоретических и экспериментальных данных по электризации ИСЗ на низких околоземных орбитах. Здесь потенциалы ИСЗ обычно не превышали нескольких вольт и не представляли опасности для бортовых систем ИСЗ. Процессы же, происходящие при высоковольтном дифференциальном зарядении геостационарных ИСЗ, оказались настолько опасными и своеобразными, что потребовалось их специальное глубокое и всестороннее исследование.

Несмотря на значительные усилия, направленные на изучение причин электризации геостационарных ИСЗ и на поиски путей борьбы с этим явлением, проблема и сейчас остается достаточно острой. Даже на геостационарных ИСЗ нового поколения, проектировавшихся с учетом эффектов электризации, полностью исключить связанные с ней аномалии пока не удастся, и возможность их возникновения приходится учитывать. Не случайно именно воздействием интенсивного потока заряженных частиц, обусловленного солнечной вспышкой, были первоначально объяснены наблюдавшиеся в течение 14 ч сбои в работе геостационарного ИСЗ связи «ТДРСС-Эй» в октябре 1984 г. во время полета американского космического корабля «Челленджер».

Через этот ИСЗ с космического корабля на Землю передавалась информация, которая не могла быть записана на борту корабля. В результате возникших на ИСЗ неполадок объем передаваемой информации сократился до 20 – 30% от запланированного. Позднее, правда, появилось сообщение, что причиной сбоев на ИСЗ «ТДРСС-Эй» могли быть и ошибки операторов наземных служб.

Возможные эффекты электризации учитываются и при разработке перспективных космических систем. Так, проектируемые в настоящее время геостационарные спутниковые солнечные электростанции (ССЭ) при мощности 10 ГВт

должны иметь площадь солнечных батарей около 100 км^2 . Максимальные поперечные размеры ССЭ достигают 20 – 30 км, а масса всей конструкции – 100 тыс. т. Предполагается, что напряжения на токоведущих шинах различного оборудования таких ССЭ, в частности оборудования для передачи электроэнергии на Землю в СВЧ-диапазоне, будут достигать 20 – 40 кВ.

Наличие таких потенциалов на элементах оборудования ССЭ может, с одной стороны, оказывать влияние на взаимодействие ССЭ с окружающей плазмой, а с другой – создавать дополнительную опасность возникновения электрических разрядов на борту ССЭ. Разряды возможны между находящимися под высоким потенциалом электродами и заряженными участками поверхности ССЭ.

Дополнительный интерес к проблеме электризации КА возник в последние годы в связи с широким проведением так называемых активных экспериментов в космическом пространстве, во время которых с КА в окружающую среду с целью изучения ее физических свойств инжектируются пучки электронов или ионов¹. При этом наблюдается целый ряд интереснейших явлений: возникновение искусственных полярных сияний, возбуждение волн разных типов в космической плазме и т. д. Но за счет сброса зарядов одного знака с КА тот приобретает электрический потенциал противоположного знака, тормозящий пучок заряженных частиц и тем самым препятствующий нормальному проведению эксперимента. Естественно, возникающий потенциал должен каким-то образом компенсироваться.

¹ См.: Подгорный И. М. Активные эксперименты в космосе. М., Знание, 1974.

Опасность заряжения статическим электричеством существует и для межпланетных КА, предназначенных, например, для изучения Юпитера, кометы Галлея и др. Физические механизмы заряжения этих КА могут значительно отличаться от действующих в околоземном космическом пространстве.

Большое разнообразие и важность задач, связанных с электризацией космических объектов, обусловили значительный интерес к этой проблеме. Различные физические исследования в области электризации КА были развернуты в нашей стране по инициативе академика С. Н. Вернова в последние годы его жизни.

Далее в брошюре подробно рассматриваются физические и прикладные аспекты проблемы электризации КА и космических тел естественного происхождения, анализируются причины, приводящие к зарядению космических объектов, описываются методы исследования различных явлений, связанных с электризацией, и способы защиты КА от воздействия статического электричества.

ПОЛОЖИТЕЛЬНО ИЛИ ОТРИЦАТЕЛЬНО?

Какие же физические процессы приводят к зарядению тела в космическом пространстве, определяют знак и величину электрического заряда и потенциала тела?

Если незаряженное тело поместить в изотермическую плазму, т. е. в плазму, состоящую из электронов и положительных ионов с одинаковыми кинетическими энергиями, тело начнет заряжаться отрицательно. Это объясняется тем, что при равенстве кинетических энергий электроны имеют значительно более высокую скорость по сравнению с ионами из-за различия масс частиц.

Напомним, что при заданной температуре плазмы значения скоростей частиц распределены около некоторой наиболее вероятной величины (распределение Максвелла). Средняя кинетическая энергия частиц пропорциональна температуре плазмы и не зависит от их массы, а средняя скорость тем меньше, чем больше масса частицы. Поэтому даже для наиболее легких положительных ионов – протонов (ядер атомов водорода) средняя скорость теплового движения в изотермической плазме в 43 раза ниже скорости электронов.

В таком же соотношении находятся потоки частиц, поступающие из плазмы на поверхность незаряженного тела, если концентрации электронов и протонов в плазме равны. По этой причине в начальный момент на тело поступают преимущественно электроны, несущие отрицательный заряд. В дальнейшем потоки электронов и положительных ионов постепенно выравниваются за счет действия на частицы электрического поля, создаваемого отрицательно заряженным телом. Для электронов это поле будет тормозящим, и те из них, которые имеют наименьшие энергии, не смогут достичь поверхности тела. Протоны, напротив, притягиваются отрицательно заряженной поверхностью, и их поток может возрастать.

Отрицательный равновесный потенциал устанавливается при равенстве электронного и ионного потоков, поступающих на поверхность тела. Понятно, что в этом случае абсолютная величина равновесного потенциала пропорциональна средней энергии электронов плазмы, т. е. температуре плазмы, поскольку с увеличением средней энергии электронов растет отрицательный потенциал, необходимый для уменьшения их потока. При энергиях частиц плазмы выше нескольких десятков электронвольт существенную роль в балансе токов на поверхности тела начинают играть так называемые *вторично-эмиссионные токи*, создаваемые вторичными электронами, которые выбиваются с поверхности падающими на нее электронами и ионами плазмы (первичными частицами).

С освещенных Солнцем участков поверхности тела электроны вырываются также фотонами солнечного ультрафиолетового и рентгеновского излучений – возникает *фотоэлектронный ток*, который, как и вторично-эмиссионные токи, уносит с тела отрицательный заряд. Делают вклад в баланс токов на поверхности тела и другие физические процессы. Некоторые из них будут рассмотрены дальше.

Во всех случаях равновесный потенциал определяется условием равенства нулю суммарного тока, текущего через поверхность тела. Однако отдельные составляющие тока, направленные к поверхности или от нее, при этом не равны нулю, т. е. происходит непрерывный обмен зарядами между поверхностью тела и окружающей плазмой. Изменение по какой-либо причине любой составляющей тока повлечет за собой смещение состояния равновесия – суммарный ток станет равным нулю уже при другом значении потенциала поверхности тела относительно окружающей плазмы.

Обычно определяющую роль в балансе токов на поверхности тела играет соотношение *электронного тока* плазмы, заряжающего тело отрицательно, и фотоэлектронного тока, компенсирующего отрицательный заряд. Если фотоэлектронный ток отсутствует (на неосвещенных участках поверхности) или меньше электронного тока плазмы, тело

чаще всего заряжается отрицательно. Правда, при определенных условиях отрицательный заряд может достаточно полно компенсироваться и вторично-эмиссионными токами, о чем подробнее будет рассказано дальше.

Если же фотоэлектронный ток превышает электронный ток плазмы, что выполняется, например, в межпланетной среде, тело заряжается положительно. При отрицательном зарядении в космическом пространстве, как уже отмечалось, потенциал тела пропорционален средней энергии электронов плазмы и может достигать минус 15 – 20 кВ. При положительном зарядении потенциал тела, как правило, не превышает 10 – 15 В. Его величина определяется энергиями покидающих поверхность тела фотоэлектронов и вторичных электронов.

ЗАРЯДЫ КОСМИЧЕСКИХ ПЫЛИНОК И ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ

Первые теоретические оценки величин электрических зарядов и потенциалов космических тел были сделаны в начале 40-х годов нашего столетия применительно к межзвездным пылинкам, имеющим поперечные размеры от долей до единиц микрометров. Полученные величины потенциалов лежали в пределах от минус 1 – 2 В до плюс 3 – 5 В. Проведенные оценки носили в значительной степени гипотетический характер из-за неопределенности многих параметров космической среды.

В дальнейшем аналогичные расчеты были проведены для пылинок и метеороидов, находящихся в Солнечной системе. По мере углубления знаний о свойствах межпланетной среды расчеты неоднократно пересматривались и уточнялись. Согласно оценкам положительный потенциал пылинок в Солнечной системе достигает 10 – 12 В.

Заряжение тел в межпланетном и околоземном космическом пространстве, как и многие другие явления, определяется в конечном счете солнечной деятельностью. Из внешней нагретой до 1 млн. К и полностью ионизованной газовой оболочки Солнца в межпланетное пространство непрерывно вытекает поток плазмы, носящий название солнечного ветра. Плазма солнечного ветра состоит в основном из электронов и протонов с небольшим содержанием альфа-частиц (ядер атомов гелия) и более тяжелых положительных ионов. Концентрации электронов и протонов в солнечном ветре одинаковы и равны в среднем 7 см^{-3} .

Средняя скорость солнечного ветра в окрестности Земли составляет около 400 км/с. Отсюда можно найти плотность потока частиц плазмы солнечного ветра: она составляет около $10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Помимо общего направленного движения с указанной скоростью, частицы плазмы солнечного ветра совершают хаотическое тепловое движение, скорость которого, как указывалось ранее, определяется температурой плазмы и массой частиц. Данные измерений показали, что температура плазмы солнечного ветра близка к 10^5 К . При такой температуре средняя скорость теплового движения протонов равна приблизительно 45 км/с, а электронов – 2000 км/с. Поступление протонов на поверхность тел (например, межпланетных пылинок), «обдуваемых» солнечным ветром, обеспечивается главным образом за счет скорости направленного движения потока плазмы, а поступление электронов – в большей степени за счет их теплового движения.

Пылинки же при этих оценках можно считать покоящимися, поскольку их собственная скорость, измеряемая десятками километров в секунду, намного меньше скорости потока плазмы и тепловой скорости электронов.

В балансе токов на поверхности пылинок нужно учесть также вторичные электроны, выбиваемые с поверхности протонами и электронами солнечного ветра. В солнечном ветре энергия протонов, обусловленная направленной скоростью потока плазмы, равна приблизительно 800 эВ, а средняя кинетическая энергия при тепловом движении электронов – около 15 эВ. В обоих случаях значение коэффициента вторичной эмиссии для большинства материалов не превышает 0,2 – 0,25.

И наконец, должна быть учтена фотоэлектронная эмиссия с поверхности под действием ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца. Измерения, проведенные с помощью ракет и ИСЗ, показали, что за пределами земной атмосферы, т. е. там, где солнечное излучение не ослаблено поглощением, плотность потока фотоэлектронов с поверхности для разных материалов лежит в пределах от $5 \cdot 10^9$ до $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ что приблизительно соответствует плотностям фотоэлектронного тока $(1 - 5) \cdot 10^{-9} \text{ А/см}^2$.

В солнечном ветре неосвещенная поверхность тела может приобретать отрицательный потенциал в несколько вольт, поскольку поступающий на поверхность поток электронов солнечного ветра превышает поток протонов, а освещенная поверхность должна заряжаться положительно из-за преобладания фотоэлектронного тока над электронным током плазмы солнечного ветра.

По мере увеличения положительного потенциала тела поток уходящих с его поверхности фотоэлектронов будет уменьшаться за счет возвращения части их на поверхность тормозящим электрическим полем, а поток электронов плазмы будет несколько увеличиваться за счет более эффективного их собирания. Эти зависимости показаны на рис. 1. Точка пересечения кривых соответствует равносному потенциалу поверхности.

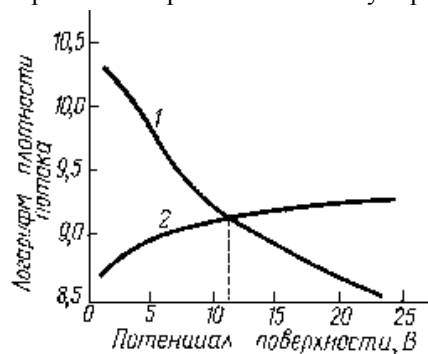


Рис. 1. Зависимость электронных потоков (в логарифмическом масштабе) от потенциала поверхности пылинки: 1 – фотоэлектроны,

Наличие заряда на космических пылинках проявляется двойко. Во-первых, заряд влияет на движение пылинки за счет действия на них кулоновских сил со стороны заряженных частиц окружающей плазмы и сил, возникающих при движении в магнитных полях. Во-вторых, заряд пылинок может ускорять их рост из-за увеличения вероятности прилипания других пылинок к заряженной поверхности. Этому механизму отводится важная роль в некоторых гипотезах относительно происхождения Солнечной системы.

Возможно и обратное явление – разрушение мелких частиц кулоновскими силами. Разрушение произойдет, если силы взаимного отталкивания, действующие между одноименно заряженными частями тела, превысят предел механической прочности его материала. Известно также, что при напряженности электрического поля, большей 10^9 В/м , с отрицательно заряженной поверхности под действием кулоновских сил начинают вырываться электроны – происходит *автоэлектронная эмиссия*. Этот процесс является одним из физических механизмов, ограничивающих потенциалы тел в космическом пространстве. Для тела

покидающие поверхность; 2 – электроны солнечного ветра, собираемые пылинкой

сферической формы напряженность электрического поля у поверхности равна отношению потенциала тела к его радиусу.

Чтобы произошло электрическое разрушение частицы, напряженность электрического поля, соответствующая порогу разрушения, не должна превышать это указанное значение напряженности, при котором возникает автоэлектронная эмиссия. Для каменных и железных метеороидов, например, такое условие не выполняется. Следовательно, они не могут быть разрушены электрическими силами. Но для неплотных пылевых образований, имеющих низкий предел механической прочности, пороговая напряженность электрического поля значительно меньше 10^9 В/м, и они могут разрушаться при зарядении. Пылевые шарики диаметром 20 мкм будут разрушаться при потенциале поверхности около 100 В.

Х. Фехтиг и другие использовали этот механизм для объяснения регистрировавшихся аппаратурой ИСЗ «ГЕОС-2» «вспышек» микрометеороидов (к последним относят обычно метеороиды размером менее 0,1 мм) в околоземном космическом пространстве. Предполагалось, что исходные неплотные частицы, разрушавшиеся электрическими силами, выбрасывались с поверхности Луны при падении на нее метеороидов.

Закономерности зарядения самой Луны сходны с рассмотренными закономерностями зарядения мелких пылинок. Освещенная сторона Луны заряжается током фотоэлектронной эмиссии положительно до потенциала 5 – 15 В. Такие значения потенциала были предсказаны теоретически, а в начале 70-х годов подтверждены прямыми измерениями энергетических спектров ионов вблизи лунной поверхности. Выполнены расчеты зависимости потенциала освещенной стороны Луны от угла падения солнечных лучей. Эта зависимость показана на рис. 2. При нормальном падении лучей, т. е. в подсолнечной точке поверхности, потенциал максимален и уменьшается по мере удаления от нее.

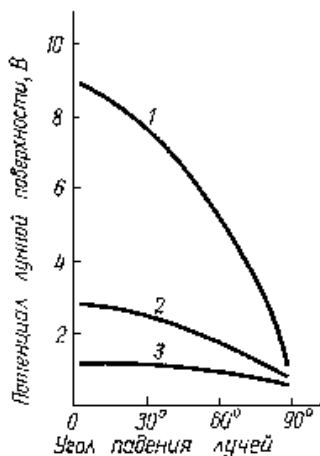


Рис. 2. Уменьшение электрического потенциала лунной поверхности, освещенной Солнцем, с увеличением угла падения солнечных лучей. Кривые рассчитаны для разных значений среднего выхода электронов на один квант (1 – 10^{-1} ; 2 – 10^{-2} ; 3 – 10^{-3})

На неосвещенной стороне Луны возникает отрицательный потенциал, который по имеющимся оценкам может быть минус 50 – 100 В и ниже. В некоторых теоретических моделях при расчете потенциала лунной поверхности учитываются и токи частиц весьма разреженной газовой ионной оболочки Луны, концентрация заряженных частиц в которой не превышает $10^2 - 10^3$ см⁻³.

Зарядение поверхности Луны оказывает существенное влияние на процессы переноса лунной пыли. С помощью приборов космических аппаратов, доставленных на лунную поверхность, зарегистрированы пылевые потоки, движущиеся над поверхностью при восходе и заходе Солнца перпендикулярно границе свет-тьень. Возникновение потоков было объяснено действием электрических сил на пылинки. О существовании пылевых потоков над лунной поверхностью свидетельствуют и данные некоторых оптических наблюдений. Так, экипажем космического корабля «Аполлон-17» наблюдалось свечение на высотах до 100 км от поверхности Луны при восходе Солнца. А фотографии, сделанные с помощью КА «Сервейер», указывают на возникновение аналогичного свечения вблизи лунной поверхности.

Оба явления были объяснены рассеянием солнечного света на частицах лунной пыли, удерживаемых над поверхностью кулоновскими силами. Процессы электрического переноса пыли и электростатического разрушения мелких частиц, возможно, могут давать вклад и в явление эрозии лунной поверхности.

Наша планета также заряжена. Земной шар несет отрицательный электрический заряд величиной около $6 \cdot 10^5$ Кл. Заряд этот не очень велик. Например, через обычную 60-ваттную электрическую лампочку, включенную в сеть, такой заряд протекает за 25 сут. Тем не менее присутствие на земной поверхности распределенного заряда создает около нее электрическое поле с напряженностью около 130 В/м, существенно влияющее на протекание различных атмосферных явлений.

Процессы, приводящие к зарядению земной поверхности, значительно сложнее рассмотренных выше. Дело в том, что Земля защищена от непосредственного воздействия солнечного ветра и солнечного ультрафиолетового излучения геомагнитным полем и атмосферой. Поток плазмы солнечного ветра, отклоняясь геомагнитным полем на расстоянии более $10 R_3$ ($R_3 = 6370$ км – радиус Земли), вызывает сжатие поля и асимметричное вытягивание геомагнитных силовых линий в антисолнечном направлении. Солнечный ветер является главным фактором, определяющим конфигурацию и многие свойства магнитосферы Земли – области, занятой геомагнитным полем, внутри которой движутся заряженные частицы разных масс и энергий¹.

¹ Подробнее об этом см., например: Дубинин Э. М., Подгорный И. М. Магнитные поля небесных тел. М., Знание, 1980.

Ультрафиолетовое излучение Солнца в значительной степени поглощается верхними слоями земной атмосферы, что вызывает процесс ионизации атмосферных газов, играющий основную роль в формировании ионизованной области верхней атмосферы Земли – ионосферы. Ионосфера занимает интервал высот от 60 до 1000 км. Верхняя ее граница обычно указывается условно, поскольку ионосфера плавно переходит в следующую плазменную оболочку Земли – плазмосферу, простирающуюся до высот около 4 – 6 R_3 .

Отрицательный заряд Земли формируется и поддерживается приблизительно постоянным в результате взаимодействия земной поверхности с приземными слоями атмосферы. Считается, что сток отрицательного заряда с поверхности Земли в атмосферу происходит в основном за счет проводимости приземного слоя воздуха, а в возвращении заряда на поверхность большую роль играют молнии. Их ежесекундно над Землей вспыхивает около сотни, причем каждая молния несет заряд 10 – 50 Кл.

Многочисленными наблюдениями убедительно доказано, что изменения параметров солнечного ветра и коротковолнового солнечного электромагнитного излучения сказываются на протекании многих процессов в нижней атмосфере и на поверхности Земли, в том числе на обмене зарядами между земной поверхностью и атмосферой. Такое воздействие происходит через ряд промежуточных процессов, протекающих в атмосфере и ионосфере. За последние годы

достигнут значительный прогресс в понимании магнитосферно-ионосферных связей и связей верхних слоев атмосферы с нижними. Но многие детали общей схемы процессов пока остаются неясными.

Во многом загадочны пока и электрические свойства космической среды в окрестностях удаленных от нас планет-гигантов. КА «Вояджер-1» и «Вояджер-2» зарегистрировали тонкое пылевое кольцо около Юпитера, формирование которого может быть объяснено действием электрических сил на заряженные пылинки. Сам «Вояджер-1», кстати, заряжался до потенциалов в пределах от -40 до $+50$ В при удалениях от Юпитера в $10 - 25$ его радиусов. При этом КА освещался Солнцем. Но в отсутствие солнечного освещения КА в этой области мог зарядиться до -10 кВ. Об этом свидетельствуют расчеты, сделанные на основании имеющихся данных о магнитосфере Юпитера. Именно зарядением до высоких потенциалов были объяснены некоторые неполадки, наблюдавшиеся в работе КА «Пионер-10» и «Пионер-11» вблизи Юпитера.

Интересна гипотеза, объясняющая модуляцию декаметрового радиоизлучения Юпитера существованием мощной токовой системы между магнитосферой планеты и спутником Юпитера Ио. Согласно гипотезе носителями тока являются фотоэлектроны, испускаемые освещенной поверхностью Ио, и частицы магнитосферной плазмы, причем при движении в магнитном поле Юпитера на Ио индуцируется электрическое напряжение около 10^6 В.

КА «Вояджер-1» дал также интригующую информацию о структуре колец Сатурна. В них были обнаружены волнистые образования, классифицированные как «плети» и «спицы». Предполагается, что и они возникают в результате действия электромагнитных сил на пылинки микрометровых размеров, заряжающиеся в неосвещенной части магнитосферы Сатурна.

Таким образом, электрические заряды играют весьма важную роль в «судьбах» как ничтожных космических пылинок, так и огромных планет. Велико их влияние, как мы уже видели, и на функционирование искусственных космических объектов, разных типов КА, о чем наш дальнейший рассказ.

ПОЛЕТ В ИОНОСФЕРЕ

Первые оценки возможного заряжения ИСЗ, выполненные в конце 50-х годов в преддверье космической эры, относились, естественно, к условиям полета в ионосфере. Во-первых, запуск первых ИСЗ планировался на сравнительно низкие околоземные орбиты, а во-вторых, о свойствах космической плазмы на больших удалениях от Земли в то время попросту почти ничего не было известно. Ведь еще не были открыты радиационные пояса Земли, неизвестна была структура магнитосферы, да и самого термина «магнитосфера» в теперешнем его понимании не существовало.

Данные же о заряженных частицах в ионосфере уже-были получены путем ее радиолокационного зондирования и в результате немногочисленных тогда еще пусков исследовательских ракет, которые поднимали приборы до высот в несколько сот километров. Но и эти данные были весьма приближенными, в особенности для высот более $250 - 300$ км, не доступных для радиолокационных исследований с поверхности Земли. Дело в том, что на указанных высотах концентрация свободных электронов и ионов в ионосфере достигает максимального значения, порядка 10^6 см $^{-3}$, а далее с увеличением высоты медленно уменьшается.

Поэтому на Землю могут возвращаться радиоволны, отраженные от области с максимальной концентрацией электронов (главного ионосферного максимума) и от областей, расположенных ниже. Если же длина посылаемых с Земли радиоволн станет меньше некоторой критической величины, они уйдут в космическое пространство, не отразившись от ионосферы. Измерение параметров ионосферы Земли на больших высотах и являлось одной из основных задач, которые планировалось решить с помощью ИСЗ.

Температура ионосферной плазмы близка к 1000 К, а соответствующая ей кинетическая энергия частиц – к $0,1$ эВ. Можно вычислить, что скорость электронов при этом составляет около 200 км/с, а скорость положительных ионов – лишь около 1 км/с. Последняя цифра относится к ионам атомного кислорода, которые являются преобладающей ионной составляющей в ионосфере на высотах более 300 км. ИСЗ же движется в ионосферной плазме со скоростью 8 км/с. Мы вновь сталкиваемся с ситуацией, отчасти сходной со случаем заряжения в солнечном ветре: величина потока электронов определяется их тепловыми скоростями, в то время как поток ионов на тело обусловлен скоростью направленного переноса. Но в отличие от этого случая здесь ионы можно считать покоящимися, а движущийся ИСЗ как бы наталкивается на них обращенной вперед поверхностью.

В ионосфере плотность изотропного потока электронов на поверхность незаряженного ИСЗ и плотность направленного потока положительных ионов значительно больше максимальной плотности потока фотоэлектронов с освещенной поверхности ИСЗ. Следовательно, фотоэлектронный ток не должен играть важной роли при зарядении ИСЗ в ионосфере. Хотя в ряде случаев – например, при анализе условий работы некоторых приборов, установленных на ИСЗ, и характеристик плазмы вблизи его поверхности – фотоэлектронный ток необходимо учитывать.

Из-за малой энергии частиц ионосферной плазмы в данном случае практически отсутствуют и вторично-эмиссионные токи с поверхности. За счет движения ИСЗ энергия столкновения ионов с поверхностью возрастает до нескольких электронвольт, но и при такой энергии ионы не могут вызвать заметной вторичной эмиссии с поверхности. Ионы, правда, могут выбивать вторичные электроны еще за счет так называемого потенциального механизма вторичной эмиссии. В основе его действия лежит нейтрализация иона вблизи поверхности тела, сопровождающаяся передачей его электронам энергии, которая была затрачена на образование иона, т. е. на ионизацию нейтрального атома. Но для большинства ионосферных составляющих в реальных условиях вторичная эмиссия, обеспечиваемая этим механизмом, слишком мала.

Таким образом, в ионосфере потенциал поверхности ИСЗ определяется соотношением электронного и ионного токов в окружающей плазме. Из предыдущего рассмотрения понятно, что ИСЗ должен приобретать незначительный отрицательный потенциал, приблизительно соответствующий тепловой энергии электронов.

Следует, однако, указать еще один важный эффект, влияющий на зарядение ИСЗ в ионосфере. Ионы, как следует из соотношения скоростей, поступают главным образом на переднюю поверхность движущегося ИСЗ, а позади него возникает область с пониженной концентрацией ионов – *ионная тень*. Концентрация электронов за движущимся спутником снижается в значительна меньшей степени из-за их высоких тепловых скоростей. Поэтому на обращенную в

сторону ионной тени поверхность ИСЗ попадают преимущественно электроны, что способствует увеличению отрицательного потенциала на этой поверхности и дифференциальному заряджению ИСЗ.

Эффект образования ионной тени сглаживается влиянием на движение частиц в окрестности ИСЗ со стороны электрического поля, создаваемого заряженными поверхностями, и магнитного поля Земли. Тем не менее за счет действия этого эффекта потенциал задней поверхности ИСЗ может возрасти в несколько раз по отношению к величине, определенной без учета ионной тени. Надо сказать, что анализ обтекания ИСЗ плазменным потоком весьма труден и, как правило, требует применения сложных вычислительных методов.

Разности потенциалов между отдельными частями ИСЗ могут индуцироваться и за счет его движения в геомагнитном поле. Оценки показывают, что при перемещении проводника длиной 1 м перпендикулярно геомагнитным силовым линиям на высотах ионосферы со скоростью 8 км/с возникает между его концами напряжение порядка 0,4 В. Индуцируемые таким образом электрические напряжения чаще всего приходится рассматривать как искажающие факторы для различного рода измерений. Например, при измерениях электрических полей в ионосфере и магнитосфере.

Отрицательные потенциалы поверхности ИСЗ, реально наблюдаемые в ионосфере, достигают 3 – 5 В. Такие потенциалы обычно не представляют опасности для бортовых систем ИСЗ, но, как уже отмечалось, могут вносить искажения в работу различного рода зондов, ионных ловушек и других приборов, предназначенных для изучения ионосферной плазмы. В случае дифференциального заряджения даже при столь низких потенциалах возможно возникновение электрических разрядов на поверхности ИСЗ и между отдельными элементами его конструкции. (Вспомните электрические искры, появляющиеся при замыкании контактов батарейки для карманного фонаря!)

Создаваемые при этом электромагнитные помехи воспринимаются научными приборами как посторонние шумы. В связи с использованием на ИСЗ в последние годы высокочувствительных зондов, действие которых основано на регистрации различных плазменных резонансов в радиодиапазоне, с этим видом помех приходится бороться.

Заряджение ИСЗ сказывается и на параметрах его орбиты. Проведенные вычисления показывают, что действие на заряженный ИСЗ кулоновских сил со стороны окружающей плазмы вызывает его дополнительное торможение наряду с торможением, обусловленным столкновениями ИСЗ с нейтральными частицами верхней атмосферы. Некоторый вклад в торможение ИСЗ дают и эффекты, связанные с индукцией (в его металлических частях) вихревых токов при движении в геомагнитном поле. Эти явления учитываются при расчетах орбит ИСЗ на ионосферных высотах и при определении плотности верхней атмосферы по торможению ИСЗ.

Рассматривая заряджение спутника на низких околоземных орбитах (высотой 200 – 1000 км), мы пока предполагали, что он окружен лишь сравнительно холодной ионосферной плазмой. Однако при полете над полярными областями земного шара ИСЗ может подвергаться еще и воздействию интенсивных потоков электронов с энергиями от 0,1 до 50 кэВ, вторгающихся в верхнюю атмосферу из магнитосферы и вызывающих полярные сияния.

СКВОЗЬ ЗАВЕСУ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Феерические картины свечения неба, наблюдаемые в полярных областях, издавна привлекали внимание человека. Упоминания об этих грандиозных явлениях содержатся в трудах многих древних летописцев и философов. Многочисленны и попытки объяснения природы полярных сияний. Предположение о связи их с электрическими процессами в верхней атмосфере Земли было высказано еще М. В. Ломоносовым, который писал: «Весьма вероятно, что северные сияния рождаются от происшедшей на воздухе электрической силы».

В конце XIX в. уже было ясно, что сияния обусловлены испусканием света возбуждаемыми атомами и молекулами газов в верхней атмосфере. К началу 50-х годов нашего столетия оптические спектры полярных сияний были достаточно хорошо изучены путем наземных наблюдений. Но лишь сравнительно недавно, после получения обширной информации с помощью ИСЗ и ракет о структуре магнитосферы и характеристиках корпускулярных потоков, вторгающихся в верхнюю атмосферу, удалось построить достаточно полную и энергетически обоснованную физическую модель возникновения полярных сияний.

В основе этой модели лежат представления о проникновении частиц солнечного ветра вовнутрь магнитосферы, об ускорении их в магнитосфере и последующем высыпании в верхнюю атмосферу. Полярные сияния наиболее часто наблюдаются над двумя овальными областями, расположенными асимметрично вокруг магнитных полюсов Земли. На ночной стороне овал полярных сияний, или *авроральный овал* (в честь богини утренней зари Авроры), находится приблизительно на 70-й геомагнитной параллели, а на дневной стороне – на 80-й. Во время сильных геомагнитных возмущений авроральный овал смещается далеко к югу, в результате чего сияния могут наблюдаться, например, в Москве и на более низких широтах.

Асимметричная форма аврорального овала и его перемещение обусловлены строением магнитосферы, из которой в верхнюю атмосферу Земли вдоль геомагнитных силовых линий вторгаются электроны с энергиями порядка 0,1 – 50 кэВ при плотности потока до $10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Свечение атмосферы, вызываемое возбуждением ее атомов и молекул электронами, наблюдается на высотах от 100 до 800 – 1000 км. Чрезвычайно изменчивые формы полярных сияний отражают пространственное и временное распределение потоков вторгающихся электронов. Ширина ярких дуг и лучей сияний обычно не превышает нескольких километров.

Полярные сияния вызываются и вторжением в верхнюю атмосферу протонов с энергиями порядка 1 – 100 кэВ, но плотность потоков высыпающихся протонов приблизительно на 3 порядка ниже плотности потоков авроральных электронов.

Итак, если орбита ИСЗ, летящего на высотах 200 – 1000 км, проходит через зону полярных сияний, на него наряду с ионосферной плазмой могут воздействовать потоки авроральных электронов. Плотность потока авроральных электронов может превышать плотность набегающего потока положительных ионов. В результате ИСЗ будет заряжаться авроральными электронами. Поскольку их энергия (0,1 – 50 кэВ), определяющая величину отрицательного потенциала ИСЗ, значительно выше энергии электронов ионосферной плазмы (0,1 эВ), последние очень быстро перестают попадать на ИСЗ и участвовать в его заряджении.

Возникает, однако, вопрос: не вызывает ли высокий отрицательный потенциал ИСЗ интенсивное собирание положительных ионосферных ионов его поверхностью, в результате чего ИСЗ разрядится?

Расчеты и экспериментальные исследования показывают, что в ионосфере электрическое поле, создаваемое отрицательно заряженным ИСЗ, проникает в окружающую плазму лишь на расстояние около 1 см от поверхности, так как ИСЗ экранируется слоем положительных ионов. Поэтому при увеличении отрицательного потенциала ИСЗ поток положительных ионов на его поверхность растет очень медленно, причем этот рост тем меньше, чем больше отношение размера ИСЗ к расстоянию, на котором экранируется электрическое поле, так называемой длине Дебая. В результате равновесное состояние достигается только при достаточно высоком отрицательном потенциале поверхности.

На рис. 3 приведены результаты вычисления равновесного потенциала для неосвещенного Солнцем сферического ИСЗ, на который в ионосферной плазме с концентрацией заряженных частиц 10^5 см^{-3} воздействует поток авроральных электронов со средней энергией 7,5 кэВ. Видно, что с увеличением плотности потока авроральных электронов отрицательный потенциал ИСЗ вначале растет очень быстро, а затем этот рост замедляется. Крутизна нарастания потенциала и его равновесное значение выше для ИСЗ с большим радиусом R_0 .

Приведенные результаты получены без учета возмущений ионосферной плазмы движущимся ИСЗ и без учета влияния геомагнитного поля на траектории заряженных частиц. При более строгих оценках должны учитываться и эти факторы, которые могут существенно повлиять на процесс заряжения.

Поскольку время пересечения ИСЗ дуги или луча полярных сияний может быть мало (при ширине дуги 1 км оно составляет около 0,1 с), при оценке равновесного потенциала следует принимать во внимание и скорость его нарастания во времени. Скорость заряжения ИСЗ определяется величиной заряжающего тока и электрической емкостью ИСЗ относительно окружающей плазмы, а при дифференциальном заряжении и локальными емкостями, образованными различными элементами конструкции на поверхности ИСЗ. Мы еще вернемся к этому вопросу. А здесь лишь отметим, что интенсивность потока авроральных электронов достаточна для заряжения ИСЗ до высокого потенциала за время 0,01 – 0,1 с.

Явления, сходные с рассмотренными здесь, могут возникать и при обратной ситуации, когда заряженные частицы энергиями в десятки или сотни килоэлектронвольт не поступают на поверхность КА, а сбрасываются с КА в окружающую плазму с помощью какого-либо устройства.

БУДЕТ ЛИ РАБОТАТЬ УСКОРИТЕЛЬ В КОСМОСЕ?

Эксперименты с инжекцией в окружающую космическую плазму пучков заряженных частиц с борта ИСЗ или ракет, уже упоминавшиеся ранее, широко проводятся в последнее десятилетие. Подобная постановка научных экспериментов, безусловно, явилась значительным шагом вперед в исследованиях космической среды.

Действительно, от пассивной регистрации различных процессов в космическом пространстве удалось перейти к направленному и контролируемому их инициированию с исследованием возникающих явлений бортовой и наземной аппаратурой. Космические эксперименты, таким образом, приблизились по своей постановке к экспериментам, проводимым в лабораторных условиях, оставаясь свободными от ограничений, накладываемых лабораторными установками (несоблюдение пространственных и временных масштабов, влияние процессов на стенках вакуумных камер, неточность воспроизведения характеристик космической среды и т. д.).

Различные физические проявления взаимодействия инжектируемого пучка частиц с плазмой возникают и наблюдаются более отчетливо при достаточно высокой ее плотности. Поэтому эксперименты с инжекцией часто проводят на ионосферных высотах, используя для подъема ускорителей заряженных частиц метеорологические ракеты. Взаимодействие пучка с ионосферной плазмой может происходить как в области инжекции, так и в противоположном полушарии при переносе инжектированных заряженных частиц вдоль геомагнитных силовых линий.

Первые эксперименты с инжекцией электронов в магнитосферную плазму с ракет были проведены в 1969 – 1970 гг. Но теоретическая проработка таких экспериментов была начата приблизительно десятью годами раньше. Очевидно, что при испускании электронного пучка в идеальном вакууме ракета начнет заряжаться положительно, а когда ее потенциал станет равным ускоряющему потенциалу электронной пушки, создающей электронный пучок, уход электронов в окружающее пространство прекратится, так как положительным потенциалом они будут возвращаться на поверхность ракеты.

При проведении такого эксперимента в ионосфере может происходить нейтрализация положительного заряда ракеты за счет поступления на ее поверхность электронов окружающей плазмы.

Однако если инжектируемый ток превышает компенсирующий электронный ток, собираемый поверхностью КА из окружающей плазмы, сохраняется опасность положительного заряжения КА и прекращения инжекции электронов, т. е. опасность нарушения нормального протекания эксперимента. Причем заряжение КА может произойти очень быстро. Например, шар диаметром 3 м зарядится при токе инжекции 0,5 А и энергии инжектируемых электронов 10 кэВ до положительного потенциала в 10 кВ, соответствующего прекращению инжекции, всего лишь за время порядка 10^{-6} с.

Принимая во внимание предсказываемую подобными оценками возможность прекращения работы ускорителя электронов на борту КА, в первых экспериментах с инжекцией стремились создать большую проводящую поверхность для сбора ионосферных электронов. С этой целью проектировались различного рода раскрываемые коллекторы, «зонтики», тонкопленочные надувные конструкции с проводящим покрытием и т. п. Так, в самом первом эксперименте с инжекцией электронов, осуществленном в январе 1969 г. под руководством В. Хесса, с поднявшейся до высоты 270 км ракеты в ионосферу инжектировались импульсные электронные пучки длительностью до 1 с при максимальном токе 0,5 А

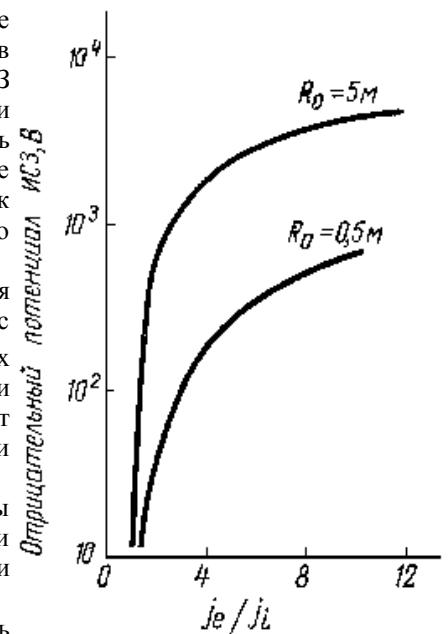


Рис. 3. Рост отрицательного потенциала ИСЗ с увеличением отношения плотности потока авроральных электронов j_e к плотности набегающего потока ионов j_i (R_0 – радиус сферического ИСЗ)

и энергии электронов 10 кэВ. А ионосферные электроны собирались коллектором из алюминиевой фольги площадью около 530 м², который был развернут после прохождения ракетой плотных слоев атмосферы.

Однако довольно скоро выяснилось, что и без применения таких собирающих коллекторов положительный потенциал КА при инжекции в ионосферу пучков электронов с энергией в десятки килоэлектронвольт редко превышает 100 – 200 В. Это было показано, например, экспериментом «Зарница-1», проведенным в нашей стране в мае 1973 г., и последующими экспериментами советских ученых.

В эксперименте «Зарница-1» в ионосферу на высотах 100 – 160 км с ракеты инжектировался электронный пучок с такими же приблизительно параметрами, что и в эксперименте В. Хесса, однако компенсирующий электронный ток собирался только корпусом ракеты. Ускоритель электронов функционировал нормально, а вблизи ракеты при его работе наблюдалось свечение, которое было интерпретировано как зажигание газового разряда в околоракетной области. Таким образом, необходимый компенсирующий ток может обеспечиваться не только за счет увеличения поверхности, собирающей электроны, но и за счет изменения параметров плазмы в окрестности ракеты.

Это изменение может носить разный характер в зависимости от процессов, протекающих в ионосфере. На высотах порядка 100 км, где концентрация нейтральных частиц в атмосфере еще достаточно высока (около 10¹³ см⁻³), а длина пробега инжектируемых электронов до столкновения с нейтральными частицами сопоставима с размерами КА, концентрация заряженных частиц вблизи ракеты будет заметно возрастать за счет ионизации нейтральной атмосферы инжектируемыми электронами.

Ионизация нейтральной атмосферы также обеспечивается электронами, собираемыми поверхностью ракеты. Образующиеся в результате этих двух процессов дополнительные электроны могут существенно увеличить ток, компенсирующий положительный заряд ракеты.

Для достижения стационарного состояния в явлении ионизации нейтральных частиц атмосферы на высотах около 100 км требуется приблизительно такое же время, как и для заряжения КА током инжекции. Поэтому положительный потенциал КА должен сразу же эффективно компенсироваться. Но с увеличением высоты время установления стационарного состояния в ионизации растет, достигая около 10⁻³ с на высоте 200 км. Следовательно, в интервале высот от 100 до 200 км возможны переходные процессы, характеризующиеся быстрым ростом положительного потенциала КА сразу же после включения пучка и более медленным его снижением по мере ионизации нейтральных частиц в околоракетной области.

Выше высоты 200 км, где концентрация нейтральных частиц становится меньше 10¹⁰ см⁻³, а концентрация заряженных частиц ионосферной плазмы составляет 10⁵ – 10⁶ см⁻³, инжектируемые электроны уходят на многие километры от КА, практически не сталкиваясь ни с нейтральными, ни с заряженными частицами. Взаимодействие инжектируемого электронного пучка с ионосферной плазмой в этом случае носит электромагнитный характер. Инжекция пучка возбуждает в окружающей плазме электромагнитные колебания, посредством которых энергия инжектируемых электронов передается частицам плазмы.

В такой ситуации возможно зажигание электрического разряда между электронным пучком и окружающей плазмой (пучково-плазменный разряд). Разряд развивается, если получившие дополнительную энергию электроны плазмы становятся способными ионизовать нейтральные частицы атмосферы. Образующиеся вторичные электроны, в свою очередь, будут ускоряться электромагнитными полями, возбуждаемыми в плазме, и производить ионизацию нейтральных частиц. В результате процесс будет развиваться лавинообразно, обеспечивая интенсивный компенсирующий ток на поверхность КА, с которого инжектируется электронный пучок.

Существует и другая физическая модель зажигания разряда вблизи КА на больших высотах, согласно которой электроны плазмы приобретают энергию, достаточную для ионизации нейтральных частиц, в результате ускорения их по направлению к КА поперек геомагнитных силовых линий. При этом электроны будут вращаться вокруг КА, производя ионизацию нейтральных атомов и молекул.

Для развития электрических разрядов, как мы видим, в окрестности КА должны присутствовать в достаточном количестве нейтральные газовые частицы. В ряде случаев даже на значительных высотах их концентрация может поддерживаться на уровне 10¹⁰ – 10¹² см⁻³ за счет собственного газовыделения КА. Таким образом, имеются достаточно эффективные физические механизмы, препятствующие сильному повышению потенциала КА при инжекции с него электронных пучков в ионосферу на высотах от 100 до 400 – 500 км, что и подтверждается экспериментами.

Следует, однако, отметить, что при инжекции пучков положительных ионов, которые удобны, например, для исследования структуры геомагнитного поля и измерения электрических полей в магнитосфере, на КА могут возникать высокие отрицательные потенциалы. Этот случай сходен с зарядением КА авроральными электронами в ионосфере.

Собираемый в данном случае из окружающей плазмы компенсирующий ионный ток меньше, чем электронный ток, собираемый при положительном зарядении. Кроме того, при инжекции ионных пучков не наблюдается зажигания разрядов в окрестности КА.

Отметим еще один важный с технической точки зрения момент. Ускоритель, испускающий электроны, соединен с металлическим корпусом КА, который и заряжается положительно при работе ускорителя. Внешняя же поверхность корпуса, как отмечалось, может быть покрыта непроводящими терморегулирующими красками, эмалями и т. д. В результате собираемые из плазмы электроны накапливаются на диэлектрической поверхности, образуя своеобразный конденсатор, одной обкладкой которого является металлический корпус КА, а другой – заряженная поверхность диэлектрика. Если диэлектрик тонкий, а энергия инжектируемых электронов достаточно высока, напряженность электрического поля в диэлектрике может превысить его электрическую прочность и начнутся электрические пробои между поверхностью диэлектрика и корпусом КА.

Такая опасность существует, например, на многоэтажном транспортном космическом корабле (МТКК), более 95% поверхности которого (1300 м²) покрыто непроводящими материалами. По имеющимся оценкам при инжекции на высоте около 400 км электронного пучка током 10 А разность потенциалов между непроводящей поверхностью и металлическим корпусом МТКК может в течение 0,1 с достигать десятков киловольт.

До сих пор мы рассматривали заряджение поверхности КА при попадании на нее заряженных частиц из окружающей среды. Но, как будет показано дальше, заряджение может происходить и при воздействии нейтральных атомов и молекул, а также пылевых частиц на поверхность КА.

КРАТКОЕ СВИДАНИЕ С НЕБЕСНОЙ СТРАНИЦЕЙ

В первой половине марта 1986 г. космические посланники землян – два КА «Вега» (СССР в сотрудничестве с рядом европейских стран), «Джотто» (Европейское космическое агентство) и «Планета-А» и «МС-Т5» (Япония) – встретятся с кометой Галлея, когда та будет пронеситься со скоростью около 50 км/с между орбитами Земли и Венеры.

Эта комета уже сыграла заметную роль в истории астрономии, ибо именно на ее примере была доказана принадлежность комет Солнечной системе. Обнаружив комету в конце августа 1682 г., 26-летний английский астроном Э. Галлей совместно с И. Ньютоном, сформулировавшим незадолго до этого закон всемирного тяготения, провел вычисление орбит ряда комет и показал, что они могут двигаться вокруг Солнца по сильно вытянутым эллипсам. До этого считалось, что кометы случайным образом попадают в Солнечную систему и затем покидают ее, двигаясь прямолинейно в межзвездном пространстве. Используя результаты вычислений и сведения из исторических хроник, Э. Галлей определил периодичность появления наблюдавшейся им кометы (около 76 лет) и предсказал время ее следующего появления.

И вот теперь у кометы Галлея новая «премьера» – ей первой из комет предстоит раскрыть свои тайны космическим аппаратам, встречающим ее на орбите. К сожалению, эта встреча будет мимолетной в буквальном смысле. Комета Галлея движется вокруг Солнца в направлении, обратном движению планет. Поэтому запущенные с Земли КА полетят навстречу комете со скоростью, близкой к орбитальной скорости Земли (30 км/с). В результате скорость движения КА относительно кометы при встрече составит около 80 км/с или несколько меньше, в зависимости от параметров орбиты КА.

При столь высокой относительной скорости аппараты пролетят сквозь газопылевую оболочку ядра кометы всего лишь за несколько минут, а мимо самого ядра (диаметром 3 – 4 км) за десятые доли секунды. И за это короткое время установленные на КА приборы должны провести множество измерений, связанных с изучением кометного ядра, исследованием химического состава газовых и пылевых частиц в атмосфере кометы, степени ионизации кометной атмосферы и т. д.

Пролет КА сквозь атмосферу кометы в какой-то мере аналогичен движению ИСЗ в земной ионосфере, но концентрация окружающих частиц и параметры, характеризующие взаимодействие набегающего потока с поверхностью КА, здесь существенно иные (табл. 1).

Таблица 1

Ожидаемые параметры атмосферы кометы Галлея

Основные параметры	Расстояние от ядра, км	
	10 000	500
Концентрация нейтральных частиц, см ⁻³	10 ⁵	10 ⁹
Концентрация заряженных частиц, см ⁻³	10	10 ⁴
Плотность набегающего потока нейтральных частиц, см ⁻² · с ⁻¹	10 ¹²	10 ¹⁶
Средняя скорость теплового движения ионов и нейтральных частиц, км/с	3	
Средняя скорость теплового движения электронов, км/с	600	
Средняя кинетическая энергия электронов, эВ	1	

При относительной скорости 69 км/с, с которой должен пройти сквозь атмосферу кометы КА «Джотто», на одну атомную единицу массы набегающих частиц приходится кинетическая энергия 24 эВ. Кинетическая энергия типичных для кометного газа молекул Н₂О и СО₂ составит при этом соответственно 432 и 1056 эВ. Обладая такой кинетической энергией, нейтральные молекулы способны выбивать с поверхности КА электроны, положительные и отрицательные ионы, а также нейтральные частицы. Наиболее эффективен последний процесс.

В случае покрытой золотом поверхности одна газовая частица набегающего потока может выбивать 1 – 2 нейтральных атома, т. е. будет происходить *распыление* материала поверхности. Явление распыления должна учитываться при выборе толщины различных защитных покрытий, но на заряджение КА оно может влиять лишь косвенно – через изменение состояния поверхности. Процессы же выбивания заряженных частиц с поверхности непосредственно приводят к заряджению КА. Эффективность выбивания вторичных электронов и вторичных ионов в указанных условиях значительно ниже.

В табл. 2 приведены значения плотности потоков заряженных частиц через поверхность КА при его полете на расстоянии около 10 000 км от ядра. Вторичные электроны и ионы выбиваются набегающим потоком нейтральных частиц. Поток электронов окружающей плазмы на поверхности КА определяется их тепловой скоростью, а ионный поток – скоростью нейтрального газа. Плотность потока фотоэлектронов принята такой же, как вблизи Земли. Вторичная эмиссия электронов под действием набегающего ионного потока не учитывается, поскольку этот поток мал. В последнем столбце таблицы указан знак заряда, создаваемого на поверхности КА каждым потоком частиц, но приведенные значения плотностей потоков относятся к начальному моменту, когда поверхность КА еще не заряжена.

Плотность потоков первичных и вторичных заряженных частиц через поверхность КА при полете в атмосфере кометы Галлея на расстоянии 10 000 км от ядра

Вид частиц	Плотность потока, см ⁻² с ⁻¹	Знак создаваемого на поверхности заряда
Вторичные электроны, выбиваемые нейтральными частицами набегающего газового потока	$(0,2 - 0,4) \cdot 10^{12}$	+
Вторичные ионы (положительные)	10^6	-
Электроны окружающей плазмы (изотропный поток)	$1,5 \cdot 10^8$	-
Ионы окружающей плазмы (набегающий поток)	$7 \cdot 10^7$	+
Фотоэлектроны	$3 \cdot 10^{10}$	+

Из табл. 2 видно, что на передней поверхности КА преобладающим компонентом является ток вторичных электронов, выбиваемых нейтральными частицами. Состояние равновесия на этой поверхности должно достигаться при ее положительном потенциале за счет ограничения тока вторичных электронов и собирания электронов окружающей плазмы. Средняя кинетическая энергия вторичных электронов составляет 10 – 20 эВ. Положительный потенциал передней поверхности КА и будет соответствовать этой энергии.

При встрече КА с кометой Солнце будет освещать его переднюю поверхность и одну из боковых сторон. На освещенной боковой стороне в отсутствие набегающего газового потока преобладающим становится ток фотоэлектронной эмиссии, который заряжает поверхность положительно до потенциала 3 – 5 В. Однако по мере приближения КА к ядру кометы электронный ток плазмы будет расти, и на расстоянии порядка 1000 км от ядра он превысит фотоэлектронный ток, в результате чего поверхность КА приобретает отрицательный потенциал.

Затененная боковая сторона КА сразу заряжается электронным током окружающей плазмы отрицательно до потенциала в несколько вольт, подобно тому как это происходит в ионосфере Земли. Аналогичным образом заряжается задняя сторона КА, но ее отрицательный потенциал может быть выше из-за образования ионной тени позади КА.

Таким образом, КА с непроводящей поверхностью при полете в атмосфере кометы может зарядиться дифференциально. Максимальная разность потенциалов возникает между передней и задней сторонами КА. Величина этой разности потенциалов на удалении около 10 000 км от ядра кометы согласно приведенным оценкам не должна превышать 30 – 40 В. Если же КА имеет проводящую поверхность, ее потенциал будет составлять плюс 10 – 20 В.

Для КА «Джотто» с помощью ЭВМ было выполнено и более строгое моделирование процесса дифференциального заряжения, позволившее исследовать структуру электрического поля вокруг КА. Полученные результаты показали, что при значительном сближении с ядром кометы разность потенциалов между передней поверхностью КА и его корпусом, возможно, достигнет 200 – 500 В.

Наличие в окрестности КА его собственных электрических полей может искажать показания приборов, предназначенных для исследования кометной плазмы. Кроме того, характеристики самой плазмы изменяются вблизи КА в результате поступления в нее большого количества вторичных заряженных частиц, выбиваемых с поверхности КА. Наибольшие изменения, как это следует из табл. 2, претерпевает плазма впереди КА за счет потока вторичных электронов, выбиваемых нейтральными частицами.

Подобные явления уже наблюдались экспериментально во время полета КА «Пионер–Венера» в атмосфере Венеры. При движении КА со скоростью 10 км/с содержащиеся в атмосфере молекулы CO₂ (их концентрация составляла 10⁹ см⁻³) выбивали с передней поверхности КА электроны в таком количестве, что обусловленная этим эффектом электронная концентрация была равна 2 · 10⁴ см⁻³ на расстоянии 40 см от поверхности. Вторичные электроны с энергией 2 – 3 эВ удалось надежно выделить на фоне электронов естественной ионосферной плазмы, имевших энергию около 0,1 эВ.

Экстраполяция этого результата на условия полета КА «Джотто» в атмосфере кометы Галлея показывала наряду с расчетными оценками, что при полете в 10 000 км от ядра концентрация вторичных электронов перед носовой частью КА составит 10³ см⁻³, а это в 100 раз выше электронной концентрации в окружающей плазме. Этот эффект, безусловно, необходимо учитывать при проведении измерений и интерпретации получаемых данных.

Выполнены и лабораторные исследования заряжения поверхности КА при воздействии на нее высокоскоростного газового потока. Бомбардировка мишени нейтральными атомами аргона с энергией 1 кэВ приводила к заряджению мишени до положительных потенциалов 10 – 20 В, что согласуется с приведенными оценками.

Мы упоминали, что, помимо атомов и молекул различных газов, в атмосфере кометы содержатся пылевые частицы, которые также образуют поток, набегающий на поверхность КА. Правда, пока недостаточно ясно, каковы эти пылинки. Их изучение и является одной из основных задач, которые предстоит решить направляемым к комете КА. Однако пылинки поступают в атмосферу кометы за счет испарения ядра. И поэтому они должны состоять из льда с большим или меньшим содержанием минеральных примесей. Размеры пылинок, видимо, могут колебаться от долей микрометра до сотен микрометров и более. Форма же пылинок необязательно должна приближаться к сферической. В частности, эксперименты по исследованию поляризации солнечного света, рассеиваемого кометами, указывают на наличие в атмосферах комет большого количества пылинок вытянутой формы.

Концентрация пылевых частиц на малых расстояниях от кометного ядра (500 – 1000 км), возможно, лишь незначительно ниже концентрации нейтральных газовых частиц. При высокоскоростном соударении пылинки с поверхностью КА должно происходить плавление и испарение как самой пылинки, так и материала оболочки КА. За счет высокой температуры в зоне удара (десятки тысяч кельвинов) значительная часть испаряющихся атомов и молекул

ионизируется, т. е. при ударе вблизи поверхности образуется плазменный сгусток, который затем будет расширяться в окружающее пространство.

Отметим, что явление образования плазмы при высокоскоростном ударе будет использовано для изучения элементного состава кометной пыли. Необходимую информацию предполагается получить на основании анализа ионного состава плазмы.

По оценкам, сделанным для КА «Джотто», поток вторичных заряженных частиц, образуемых ударами пылинок о поверхность КА, может на расстоянии 500 км от ядра кометы превзойти поток электронов, выбиваемых нейтральными газовыми частицами, почти на порядок. Поскольку при термической ионизации паров электроны и положительные ионы образуются в равных количествах, бомбардировка поверхности КА пылевыми частицами, казалось бы, не должна приводить к его зарядению.

Вместе с тем в лабораторных экспериментах неоднократно наблюдался несколько больший выход электродов при ударах микрочастиц по сравнению с выходом положительных ионов. Пока окончательно не установлено, является ли это следствием регистрации некоторого электронного фона, создаваемого в вакуумной камере (например, за счет работы ускорителя пылинок или электронной эмиссии со стенок камеры), или увеличение электронного компонента обусловлено действием дополнительных физических механизмов электронной эмиссии. Если справедливо последнее предположение, набегающий пылевой поток может вызвать положительное зарядение КА.

Нарушение электрического равновесия возможно и за счет неодинаковых условий ухода от поверхности КА образующихся электронов и ионов, имеющих существенно различные массы и начальные скорости.

Уникальность готовящихся экспериментов по исследованию кометы Галлея заставляет особенно тщательно анализировать все явления, связанные с воздействием на КА окружающей среды, включая рассмотренные здесь процессы зарядения КА и модификации окружающей «го плазмы». На этом мы закончим наше воображаемое путешествие к комете и вновь вернемся в магнитосферу Земли, чтобы рассмотреть вопросы, связанные с зарядением до высоких потенциалов геостационарных ИСЗ.

ОТКУДА ПРИХОДИТ ГОРЯЧАЯ ПЛАЗМА?

Почему же все-таки именно геостационарные ИСЗ оказались подверженными зарядению до высоких отрицательных потенциалов?

Мы помним, что величина отрицательного потенциала ИСЗ пропорциональна температуре электронного компонента окружающей плазмы. Значит, при зарядении до высокого потенциала ИСЗ должен находиться в горячей плазме, причем необходимо, чтобы электронный ток плазмы, заряжающий ИСЗ отрицательно, превосходил по величине токи, которые могли бы снять с ИСЗ отрицательный заряд.

Оказалось, что такие условия могут возникать в магнитосфере Земли в области высот 30 – 50 тыс. км, где как раз и проходит геостационарная орбита (высота около 36 000 км). Во время геомагнитных возмущений, обусловленных повышением солнечной активности, на эти высоты со стороны хвоста магнитосферы, т. е. на ночной стороне, может приходиться плазма с энергией частиц 5 – 30 кэВ.

Очень упрощенно схему процесса инжекции горячей плазмы в область геостационарной орбиты во время геомагнитных возмущений (магнитосферных суббурь) можно представить следующим образом. При повышении солнечной активности и возникновении вспышек на Солнце происходит увеличение скорости частиц солнечного ветра и, как следствие этого, – усиление обжатия магнитосферы потоком плазмы солнечного ветра, текущим по ее периферии. Сжатие геомагнитного поля в хвосте магнитосферы, где расположен так называемый плазменный слой, содержащий плазму с энергией частиц 1 – 5 кэВ, и приводит к инжекции этой плазмы в глубь магнитосферы. Иногда для наглядного пояснения явления инжекции пользуются моделью «тюбика с пастой»: при сжатии геомагнитного поля плазма «выдавливается» из области хвоста магнитосферы подобно пасте из тюбика.

Двигаясь в глубь магнитосферы, частицы плазмы дополнительно ускоряются, в результате чего их средняя энергия на высотах геостационарной орбиты достигает 5 – 30 кэВ. Попадая в область достаточно сильного магнитного поля Земли вблизи геостационарной орбиты, частицы вторгающейся плазмы могут сепарироваться этим полем: несущие отрицательный заряд электроны дрейфуют преимущественно на восток, в рассветный сектор магнитосферы, а имеющие положительный заряд протоны – на запад.

Одновременно с приходом горячей плазмы на ночной стороне геостационарной орбиты происходит уменьшение плотности холодной плазмы, энергия частиц которой близка к 1 эВ. Плазмосфера во время геомагнитных возмущений несколько сжимается, и холодная плазма как бы вытесняется с больших высот ближе к поверхности Земли. Сжатие плазмосферы асимметрично по долготе: в наибольшей степени вытеснение холодной плазмы с больших высот происходит в районе полуночного меридиана и в рассветном секторе – от 0 до 6 ч местного времени.

В результате этих процессов на геостационарный ИСЗ во время магнитосферных суббурь в ночные и ранние утренние часы может воздействовать поток горячей плазмы, превышающий поток холодной плазмы, причем, в некоторых случаях температуры электронного и протонного компонентов горячей плазмы, а также концентрации электронов и протонов плазмы могут различаться. Такое воздействие и вызывает отрицательное зарядение ИСЗ до потенциалов, приблизительно соответствующих температуре горячей плазмы.

Хотя изложенная схема геофизических процессов, приводящих к зарядению геостационарных ИСЗ, является весьма неполной, она достаточно хорошо объясняет наблюдаемые экспериментально закономерности появления сбоев в работе аппаратуры геостационарных ИСЗ. На рис. 4 показано распределение сбоев во времени по данным ряда американских геостационарных ИСЗ. Видно, что сбои происходят преимущественно в ранние утренние часы. А рис. 5 иллюстрирует связь возникновения сбоев с появлением горячей плазмы в области геостационарной орбиты. Имеются также данные, свидетельствующие об увеличении частоты возникновения сбоев с повышением уровня геомагнитной активности.

Результаты измерений показывают, что максимальная плотность потока электронов горячей плазмы на незаряженный геостационарный ИСЗ может приближаться

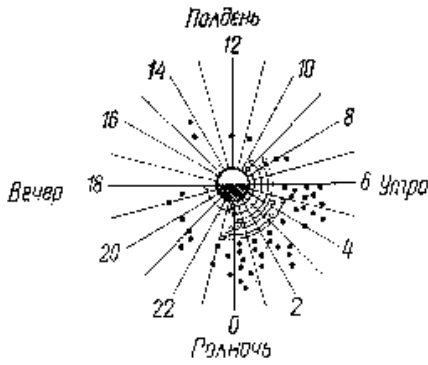


Рис. 4. Распределение во времени случаев аномального функционирования аппаратуры, наблюдавшихся на геостационарных ИСЗ. Белыми кружками, соединенными дугами, показаны случаи, когда момент возникновения сбоя не был точно установлен

к $10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Она, как правило, все же остается ниже плотности потока фотоэлектронов с поверхности ИСЗ. Поэтому на освещенной стороне геостационарного ИСЗ появляется небольшой положительный потенциал, тогда как неосвещенная сторона заряжается отрицательно. Это, как уже отмечалось, и приводит к дифференциальному зарядению поверхности ИСЗ.

Следует отметить, что даже на ночной стороне орбиты одна сторона геостационарного ИСЗ обычно бывает освещена Солнцем. Лишь в периоды весеннего (около 21 марта) и осеннего (около 23 сентября) равноденствий геостационарный ИСЗ, находящийся на большой высоте над экватором, может

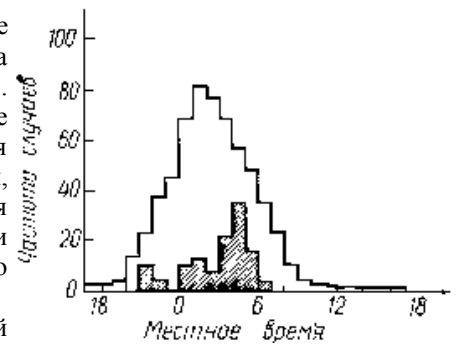


Рис. 5. Сопоставление частоты сбоев в работе аппаратуры геостационарного ИСЗ «Марекс-1» (верхняя граница заштрихованной области) с частотой появления электронов с энергией выше 1 кэВ при плотности потока больше $10^9 \text{ (см}^2 \cdot \text{с)}^{-1}$ в области геостационарной орбиты (верхняя кривая)

попадать в тень Земли, да и то на время порядка 1 ч. Причиной этого является наклон земной оси к плоскости эклиптики.

Рис. 6 показывает различие потенциальных рельефов на освещенном геостационарном ИСЗ для случаев, когда его поверхность является либо проводящей, либо непроводящей. В левой части рисунка представлена ситуация на ИСЗ с проводящей поверхностью, а в правой части – на ИСЗ с непроводящей поверхностью. Стрелками здесь изображены потоки заряженных частиц, причем для простоты вторично-эмиссионные токи в обоих случаях не показаны.

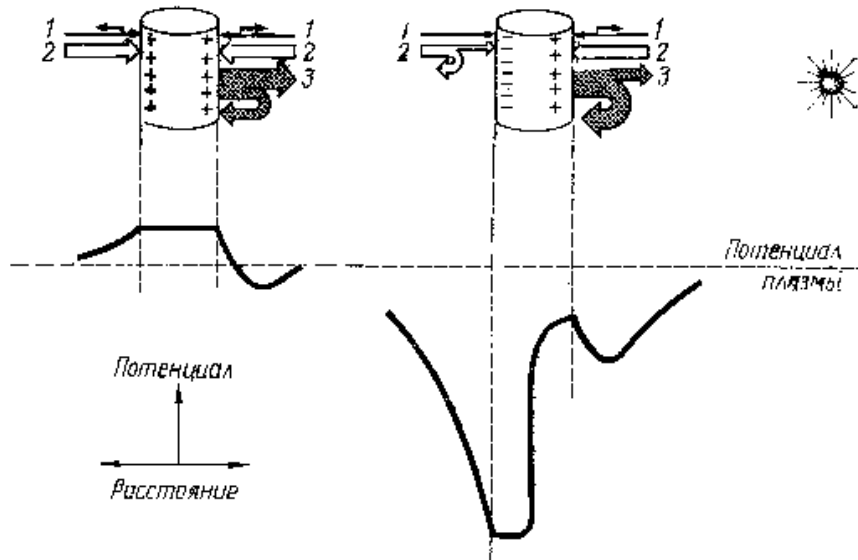


Рис. 6. Различие условий зарядения КА с проводящей и непроводящей поверхностью при освещении его Солнцем с одной стороны: 1 – поток положительных ионов (протонов) плазмы; 2 – поток электронов плазмы; 3 – поток фотоэлектронов

Если поверхность ИСЗ является проводящей, избыточные электроны с неосвещенной стороны ИСЗ могут свободно перемещаться на освещенную сторону, откуда они удаляется за счет тока фотоэлектронной эмиссии. В результате поверхность ИСЗ заряжается положительно. На неосвещенной стороне происходит монотонное убывание потенциала в пространстве около ИСЗ и постепенное приближение его к потенциалу плазмы. На освещенной стороне в распределении потенциала может наблюдаться локальный минимум, обусловленный пространственным электронным зарядом, причем потенциал в области минимума может стать даже отрицательным.

В случае непроводящей поверхности неосвещенная сторона ИСЗ заряжается отрицательно электронами плазмы. Если величина отрицательного потенциала на неосвещенной стороне значительна, потенциал освещенной стороны ИСЗ также может оказаться в отрицательной области, как это показано в правой части рис. 6, хотя он остается выше потенциала неосвещенной стороны. При этом в районе терминатора (граница свет-тьень) на поверхности ИСЗ возникает значительный перепад потенциала. Распределение потенциала в пространстве около ИСЗ на освещенной стороне в данном случае может иметь такую же особенность, как и в случае ИСЗ с проводящей поверхностью.

Однако возникновение минимума потенциала здесь может быть обусловлено не только пространственным зарядом, но и спецификой структуры электрического поля вблизи ИСЗ. Протекание процесса дифференциального зарядения, как отмечалось, зависит также от особенностей его конструкции и электрофизических свойств материалов, находящихся на поверхности ИСЗ.

Таким образом, качественный анализ зарядения геостационарных ИСЗ может быть выполнен на основании достаточно простых и наглядных физических соображений. Однако вычисление величин потенциалов на разных участках поверхности, в особенности для ИСЗ сложной конфигурации, требует подчас применения весьма громоздкого математического аппарата и выполняется обычно с помощью ЭВМ. В следующем разделе даны некоторые представления о таких расчетах.

СПУТНИК В МАТЕМАТИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Вычисление потенциала любого элемента поверхности КА, находящегося в космической плазме, сводится, фактически к решению уравнения баланса токов для этого элемента. Необходимо записать алгебраическую сумму всех токов, текущих через выбранный элемент поверхности КА или ИСЗ, и, приравняв ее к нулю (в этом и состоит условие установления равновесия), решить полученное уравнение относительно потенциала.

Эта, выглядящая довольно простой, схема вычисления потенциала бывает, однако, практически весьма трудно реализуема. Трудности возникают уже при написании выражений для токов, текущих из плазмы на поверхность ИСЗ в процессе его заряжения. Эти токи зависят от потенциала поверхности ИСЗ, поскольку электроны плазмы отталкиваются от поверхности возникающим отрицательным потенциалом, а протоны – притягиваются к поверхности.

Сравнительно несложные выражения, описывающие зависимость плазменных токов от потенциала поверхности ИСЗ, могут быть записаны лишь для тел с геометрически простой поверхностью: сферической, цилиндрической или плоской. В этих случаях для описания плазменных токов применимы уравнения, полученные еще в 20-х годах нашего столетия американским физиком И. Ленгмюром применительно к процессу собирания электрических зарядов на поверхность маленького электрода, помещенного в плазму газового разряда. Такое устройство, часто называемое зондом Ленгмюра, до сих пор широко используется для исследования параметров плазмы.

Если к зонду не прикладывать электрического напряжения из внешней цепи, он зарядится до некоторого потенциала, определяемого температурой плазмы. Этот равновесный потенциал принято называть потенциалом свободного зонда, или плавающим потенциалом. Таким образом, процесс заряжения ИСЗ в какой-то степени аналогичен установлению плавающего потенциала на зонде. Но в отличие от случая, рассмотренного И. Ленгмюром, в заряжении геостационарного ИСЗ горячей космической плазмой значительную роль играют вторично-эмиссионные токи, текущие через поверхность. Аналитическое описание этих токов также бывает сопряжено с немалыми трудностями.

Например, вторичная электронная эмиссия, определяемая коэффициентом δ , сначала возрастает при увеличении энергии первичных электронов (E), достигая; некоторого максимального значения δ_{\max} при энергии около 500 эВ, а затем, при дальнейшем увеличении энергии, постепенно уменьшается. Такой характер зависимости δ от E связан с изменением глубины проникновения первичных электронов в материал и вероятности выхода вторичных электронов при увеличении энергии E .

Аналогичная зависимость наблюдается и в случае выбивания вторичных электронов протонами, но максимальный выход вторичных электронов достигается при существенно больших энергиях протонов. Учет лишь одних этих зависимостей для моноэнергетических потоков первичных частиц приводит к весьма сложным математическим выражениям.

Кроме того, коэффициент вторичной эмиссии зависит еще от рода материала, состояния поверхности ИСЗ, угла падения первичных частиц и даже от самого процесса заряжения ИСЗ, создающего электрическое поле в тонком приповерхностном слое диэлектрика. Даже приближенный учет влияния этих факторов чрезвычайно усложняет расчет. Вот почему и для геометрически простых тел достаточно строгий анализ заряжения их поверхности в космической плазме возможен только с помощью ЭВМ.

Удобным методом анализа, наглядно показывающим роль отдельных составляющих полного тока в заряжении ИСЗ, является построение вольт-амперных характеристик, представляющих собой зависимость первичных и вторичных токов от потенциала поверхности. На рис. 7 в качестве примера приведены такие характеристики, рассчитанные для покрытой золотом сферической поверхности ИСЗ применительно к плазме на геостационарной орбите. Здесь кривыми j_e и j_p показаны соответственно абсолютные значения электронного и протонного токов плазмы через поверхность сферического ИСЗ.

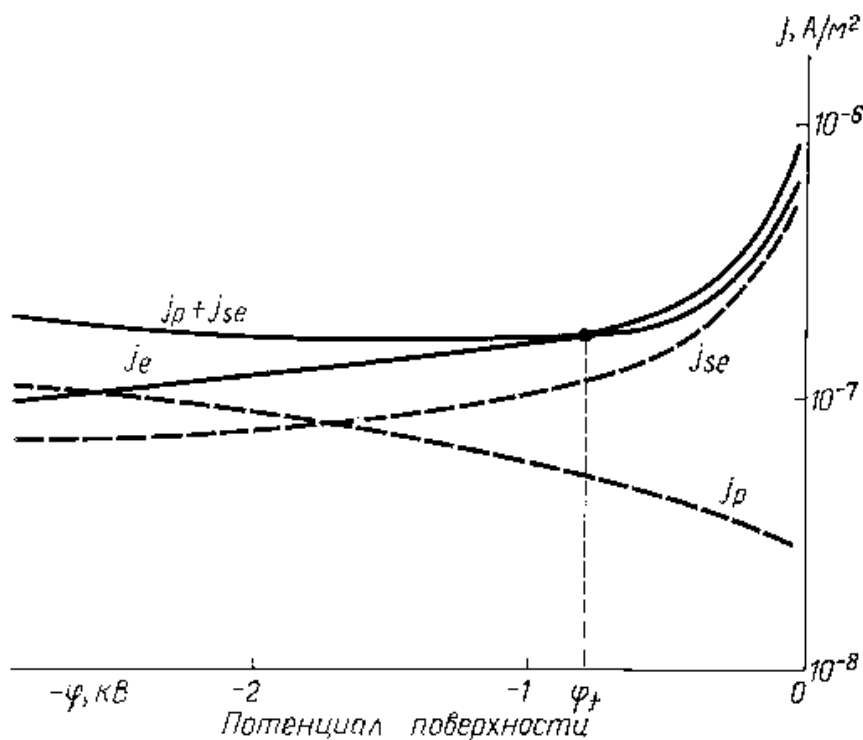


Рис. 7. Зависимость первичных и вторичных токов от потенциала поверхности ИСЗ

Электронный ток уменьшается с ростом отрицательного потенциала поверхности, а протонный ток увеличивается. Ток вторичной электронной эмиссии j_{se} уменьшается в соответствии с уменьшением первичного электронного тока J_e . Точка пересечения кривых j_e и $j_p + j_{se}$ определяет равновесный потенциал поверхности φ_f , который в данном случае равен $-0,8$ кВ. Из рис. 7 видно также, что в отсутствие вторичной электронной эмиссии равновесный потенциал был бы равен $-2,7$ кВ, что соответствует точке пересечения кривых j_e и j_p .

Такой анализ заряжения тел в космической плазме позволил получить целый ряд важных результатов. Например, было обнаружено, что для материалов с высокими коэффициентами вторичной эмиссии суммарный ток через поверхность может обращаться в нуль при трех различных потенциалах поверхности, один из которых (промежуточный) является неустойчивым, а два других – устойчивыми. Был обнаружен также так называемый пороговый эффект, заключающийся в том, что при температуре плазмы ниже некоторого порогового значения помещенное в плазму тело не заряжается отрицательно. Причем пороговая температура плазмы, при превышении которой возникают отрицательные потенциалы, неодинакова для разных материалов.

Оба этих явления связаны с компенсацией первичного электронного тока плазмы током вторичных электронов. Условия компенсации существенно зависят от исходной энергии первичных электронов, потенциала поверхности и ее вторично-эмиссионных характеристик. Практически указанные эффекты могут приводить к возникновению различного рода скачков потенциала на поверхности ИСЗ при сравнительно незначительных изменениях параметров окружающей плазмы или вторично-эмиссионных характеристик поверхности ИСЗ. Установление равновесия при этом будет зависеть от начального потенциала поверхности.

Зная величины токов, заряжающих и разряжающих поверхность ИСЗ, можно оценить характерные времена заряжения. Они сильно различаются для случая общего заряжения ИСЗ (т. е. заряжения его как единого целого) и случая дифференциального заряжения. В первом случае время заряжения определяется емкостью ИСЗ относительно окружающей плазмы, которая обычно не превышает $1000 - 2000$ пф, и равно около $0,3$ с. Во втором случае, при дифференциальном заряжении, происходит накопление и перераспределение зарядов на емкостях, образуемых заряженной поверхностью диэлектрических покрытий и корпусом ИСЗ.

При малых толщинах покрытий эти емкости оказываются значительными. Поэтому время, необходимое для дифференциального заряжения ИСЗ, может измеряться единицами и даже десятками минут. Если параметры окружающей плазмы меняются достаточно быстро, установившееся состояние при дифференциальном заряжении может и не достигаться.

Представление о потенциалах, до которых могут заряжаться различные материалы на поверхности геостационарного ИСЗ, дает табл. 3. Отметим, что приведенные потенциалы вычислены для условий умеренной геомагнитной активности, когда плотность потока плазмы и ее температура соответствуют некоторому среднему уровню. При высокой геомагнитной активности значения равновесных отрицательных потенциалов могут быть в $2 - 3$ раза выше.

Таблица 3

Параметры, характеризующие заряжение материалов в плазме геостационарной орбиты при умеренной геомагнитной активности

Материал	δ_{\max}	Плоскость, φ_f В	Сфера φ_f В	T_0 , эВ
Золото	1,45	-41	-40	2930
Алюминий	0,97	-5390	-1410	0,0
Окись алюминия	2,6	+1,9	+4,6	1270
		-420*	-630*	
		-4900	-750	
Кварц	2,5	+1,5	+3,9	1710
		-640*		
		-4120		
Аквадаг	0,75	-5890	-1560	0,0
Бериллиевая бронза	2,2	+1,9	+4,7	1350
		-560*		
		-3430		
Фторопласт	3,0	+2,3	+5,2	1430
		-490*		
		-4870		
Полиамид	2,1	+1,4	+3,9	470
		-170*	-170*	
		-6040	-1580	

* Звездочками отмечены неустойчивые потенциалы.

Равновесные потенциалы φ_f рассчитаны для плоскости и сферы. Видно, что величина равновесного потенциала существенно зависит от формы поверхности ИСЗ. При значениях $\delta_{\max} \approx 2 - 2,5$ может возникать отмеченный выше эффект неоднозначности равновесного потенциала. В последнем столбце здесь приведено значение пороговой температуры плазмы в энергетических единицах.

Еще труднее рассчитать потенциалы на разных участках тела сложной формы, каким является реальный ИСЗ. Электрическое поле вокруг ИСЗ создается всеми заряженными элементами конструкции: корпусом, панелями солнечных батарей, установленными на корпусе элементами различной аппаратуры и т. д. Поэтому пространственная структура поля в ближней окрестности ИСЗ, представляемая силовыми линиями и линиями равного потенциала, получается весьма сложной. Картина поля еще более усложняется из-за дифференциального заряжения ИСЗ.

В итоге для тел с развитой геометрией практически невозможно получить аналитические выражения, описывающие достаточно корректно поведение первичных и вторичных токов в процессе заряжения тел. В этом случае токи вычисляются путем многократного решения уравнения движения для отдельных частиц в электрическом поле около тела, т. е. на основании расчета траекторий отдельных частиц.

Распределение потенциала вокруг тела находится путем решения соответствующих уравнений в трехмерном пространстве. При этом пространство вокруг тела каким-либо образом разбивается на отдельные элементы с помощью построения трехмерных сеток. Такая дискретизация пространства дает возможность свести вычисления к решению системы сравнительно простых уравнений, записываемых для каждого элемента сетки. Число уравнений в системе соответствует числу пространственных элементов и может достигать 10 000. Выбор этой величины определяется на основании компромиссных соображений с учетом требований достаточно детальной проработки структуры электрического поля и ограничений, накладываемых техническими возможностями ЭВМ.

Поскольку характерные размеры ИСЗ составляют несколько метров, при анализе структуры электрического поля вблизи ИСЗ следует использовать сетку с размером не более 10 см. В то же время, чтобы при анализе заряжения геостационарного ИСЗ достаточно точно рассчитать траектории частиц плазмы, нужно знать структуру поля до расстояний 0,5 – 1 км от ИСЗ. При сохранении шага сетки неизменным объем вычислений получается чрезвычайно большим. Поэтому ИСЗ при расчете обычно окружается последовательностью таких своеобразных математических сетей, размер ячеек которых увеличивается по мере удаления от ИСЗ, как это показано на рис. 8.

Разработанные расчетные методы позволяют анализировать дифференциальное заряжение ИСЗ, проследить развитие процесса заряжения во времени, исследовать особенности структуры электрического поля вокруг ИСЗ и на его поверхности, предсказывать возможные места возникновения электрических разрядов. Подобное предварительное моделирование с помощью ЭВМ эффектов электризации в настоящее время вводится в практику конструирования ИСЗ.

Вместе с тем большое внимание уделяется, экспериментальному исследованию электризации ИСЗ как непосредственно в космосе, так и в лабораторных условиях, о чем будет рассказано в последующих разделах.

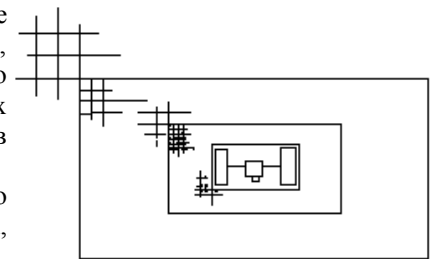


Рис. 8. Построение пространственной сетки с увеличивающимся шагом

ПОТЕНЦИАЛ ИСЗ МОЖНО ИЗМЕРИТЬ

То обстоятельство, что электрический потенциал ИСЗ влияет на показания бортовых приборов, измеряющих параметры космической плазмы (зондов Ленгмюра, ловушек заряженных частиц, электростатических анализаторов разных типов и т. п.), может быть использовано для определения знака и величины возникающего потенциала. Необходимая информация содержится в получаемых экспериментальных данных. Например, при отрицательном заряжении ИСЗ регистрируемый бортовыми приборами энергетический спектр электронов окружающей плазмы смещается в сторону меньших энергий, а энергетический спектр протонов – в сторону больших энергий.

Наблюдение протонного спектра является более удобным для подобных измерений. Величина смещения энергетических спектров равна $e\phi$, где ϕ – потенциал ИСЗ, а e – заряд электрона. Именно таким способом измерялись отрицательные потенциалы геостационарных ИСЗ «АТС-5» и «АТС-6», запущенных соответственно в 1969 и 1974 гг. и давших большой объем информации об электризации ИСЗ на геостационарной орбите. Вероятность заряжения ИСЗ до – 10 кВ в интервале от 0 ч до 6 ч местного времени составляла около 10%. А в отдельные моменты отрицательный потенциал ИСЗ «АТС-6» достигал 20 кВ.

Наблюдаемые многочисленные неполадки в работе бортовых систем геостационарных ИСЗ заставляли все шире использовать бортовые приборы для исследования эффектов электризации ИСЗ. Так, на западноевропейском метеорологическом ИСЗ «Метеосат-1», запущенном на геостационарную орбиту в ноябре 1977 г., за четыре года эксплуатации было зарегистрировано 150 существенных сбоев в работе бортовых систем. Эти неполадки не привели к гибели ИСЗ, но явились причиной значительной потери информации, передаваемой на Землю.

Предполагалось, что сбои вызывались заряжением ИСЗ. Однако прямые доказательства, подтверждавшие такую точку зрения, отсутствовали. Следующий ИСЗ той же серии, «Метеосат-2», был запущен в июне 1981 г. На его борту были установлены два специальных прибора, и полученные с их помощью данные позволили устранить всякие сомнения относительно причин многочисленных отказов на ИСЗ «Метеосат-1».

Бортовой спектрометр этого ИСЗ мог регистрировать заряженные частицы в энергетическом диапазоне 50 эВ – 20 кэВ. Другой прибор с помощью датчика, вынесенного на внешнюю поверхность ИСЗ, фиксировал электрические сигналы, возникающие в момент электрических пробоев на поверхности. С помощью этих приборов было однозначно показано, что при вторжении на геостационарную орбиту электронов с энергией около 20 кэВ происходит заряжение ИСЗ, а на его поверхности возникают электрические разряды, приводящие к сбоям.

Разработаны и также применяются специальные индукционные датчики разных типов, измеряющие локальные электрические поля у поверхности ИСЗ. С их помощью можно изучать процессы дифференциального заряжения ИСЗ.

Для измерения электрических потенциалов в пространстве на разных удалениях от ИСЗ датчики размещаются на выносных штангах или гибких фалах. Совокупность нескольких приборов, установленных в разных точках ИСЗ и ориентированных определенным образом, позволяет исследовать распределение потенциала в окрестности ИСЗ и структуру окружающей его плазменной оболочки. Возможности таких измерительных систем могут быть расширены за счет перемещения датчиков в пространстве.

Интересны попытки применить электронные пучки для измерения электрических и магнитных полей в пространстве около ИСЗ, предпринятые, например, на ИСЗ серии «ГЕОС». При таких измерениях электроны испускаются с ИСЗ и

вновь возвращаются к его поверхности, перемещаясь по замкнутой траектории, обусловленной действием электрических и магнитных полей на движущиеся заряженные частицы. Однако пока этот метод измерений недостаточно разработан.

С целью более полного изучения электризации геостационарных ИСЗ в США в январе 1979 г. на орбиту, близкую к геостационарной (апогей 43 240 км, перигей 27 550 км, наклонение $7,9^\circ$), был запущен специальный ИСЗ «СКАТХА». Этот ИСЗ предназначен для изучения радиационной обстановки на орбите, эффектов заряжения ИСЗ и электризации различных материалов, расположенных на его внешней поверхности. Общий вид ИСЗ представлен на рис. 9 (его масса составляет 227 кг, диаметр – 1,3 м, длина – 1,5 м). ИСЗ имеет несколько выносных штанг для размещения датчиков аппаратуры.

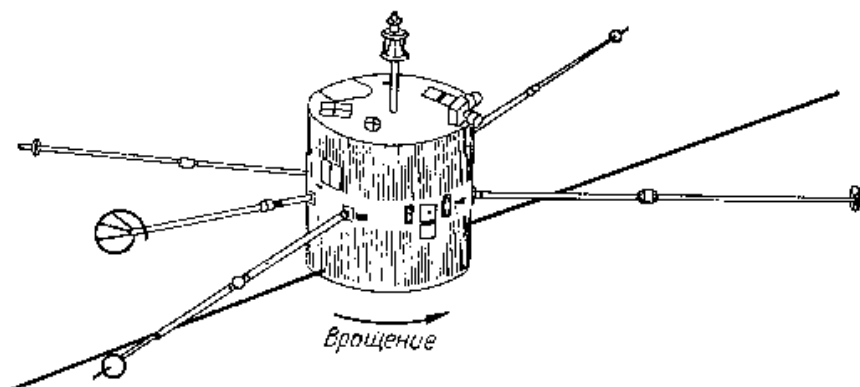


Рис. 9. Общий вид ИСЗ «СКАТХА»

В прикладных исследованиях с помощью этого ИСЗ решались следующие основные задачи: определение электрических потенциалов на поверхности различных материалов, широко применяемых в космическом аппаратостроении; измерение и анализ электромагнитных помех, возникающих при электрических разрядах на поверхности материалов; исследование деградации материалов внешней поверхности ИСЗ и оценка степени загрязнения поверхности продуктами собственной атмосферы аппарата.

Наличие на ИСЗ «СКАТХА» электронной пушки с максимальным ускоряющим напряжением 3 кВ и током 6 мА позволило вызывать зарядение ИСЗ относительно окружающей плазмы, аналогичное зарядению в активных экспериментах. При работе электронной пушки на ИСЗ регистрировались электрические разряды и даже наблюдались отказы двух приборов, совпадающие по времени с наиболее интенсивными разрядами. Это явилось прямым подтверждением возможности возникновения сбоев в работе аппаратуры за счет электрических разрядов на поверхности ИСЗ.

Первый год функционирования ИСЗ «СКАТХА» показал высокий уровень его электризации. Например, утром 24 апреля 1979 г. даже при солнечном освещении поверхность ИСЗ заряжалась до -340 В. А при кратковременном нахождении ИСЗ в тени Земли в те же сутки был зарегистрирован потенциал поверхности, равный -8 кВ. Предполагается, что, если бы на теневой части орбиты около ИСЗ сохранились окружающие условия, существовавшие при солнечном освещении, ИСЗ мог зарядиться до потенциала -15 кВ.

Данные, полученные на ИСЗ «СКАТХА», позволяют сравнить параметры заряжения, наблюдавшегося в натуральных условиях, с результатами математического моделирования процессов электризации и с результатами, получаемыми при испытаниях ИСЗ или их макетов в имитационных вакуумных камерах. О таких испытаниях и пойдет речь дальше.

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ИСЗ В ЛАБОРАТОРИИ

Исследования процессов заряжения ИСЗ и разрядных явлений на поверхности диэлектрических материалов можно эффективно проводить на макетах КА и на реальных объектах в больших имитационных камерах.

В камере, в частности, испытывался макет ИСЗ «СКАТХА» размером в $\frac{2}{3}$ натуральной величины. Испытания проводились с неподвижным макетом и при его вращении в процессе эксперимента. Макет ИСЗ облучался электронными пучками с энергией 8 кэВ при плотности тока около 10^{-9} А/см², которые создавались четырьмя электронными пушками. Для имитации освещения ИСЗ Солнцем в камере был установлен источник ультрафиолетового излучения. Вблизи поверхности макета перемещался датчик напряженности электрического поля, позволяющий исследовать распределение потенциала по поверхности ИСЗ.

Получено хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными. При облучении макета ИСЗ электронами наблюдалось также возникновение электрических разрядов на его поверхности. Разряды появлялись, когда отрицательный потенциал поверхности превышал 2,5 кВ. Частота разрядов возрастала с ростом энергии электронов и плотности тока пучка. Длительность разрядных импульсов была меньше 10^{-6} с.

Для реальных КА такие испытания могли бы дать много полезной информации, однако они очень дороги и, кроме того, есть серьезная опасность, что при испытаниях в сложные электронные системы будут внесены неконтролируемые нарушения, которые могут проявиться лишь при функционировании ИСЗ на орбите.

На практике чаще используются более доступные и простые методики. Так, испытания помехоустойчивости бортовой аппаратуры проводятся на реальном ИСЗ путем воздействия на него электрических дуговых разрядов, которые по своим основным параметрам имитируют электрические разряды, возникающие на поверхности диэлектрических покрытий ИСЗ в реальных условиях космоса.

Воздействие электрического дугового разряда проявляется двояко: в виде электромагнитного поля, создающего помеху в бортовой кабельной сети, и в виде токов, распространяющихся через контакты и соединения между узлами и блоками ИСЗ. При имитационном воздействии разрядов на ИСЗ анализируется реакция его наиболее ответственных узлов и в

случае необходимости в них вносятся соответствующие изменения, позволяющие устранить или снизить отрицательное влияние электризации.

Другая задача имитационных испытаний на макетах ИСЗ в вакуумных камерах связана с контролем математических моделей электризации КА. Такие эксперименты позволяют оценить, насколько математические модели правильно предсказывают характер электрических полей и распределение зарядов как на поверхности КА, так и в окружающем его пространстве.

Помимо исследования заряжения макетов КА, весьма точно воспроизводящих особенности конструкции, в имитационных камерах на образцах материалов проводятся многочисленные эксперименты по изучению различных физических явлений, возникающих при облучении диэлектриков пучками заряженных и нейтральных частиц, электромагнитными излучениями и искусственно созданными микрометеорными частицами.

О некоторых из таких экспериментов уже упоминалось раньше. Одним из важных направлений подобных исследований является изучение процессов необратимого повреждения диэлектриков при заряжении их электронными и ионными пучками.

ЭЛЕКТРОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ

При облучении диэлектрических материалов электронами с энергией 20 – 30 кэВ некоторая доля электронного потока захватывается приповерхностными слоями материалов на глубинах около 10 мкм, создавая избыточный заряд и высокую напряженность электрического поля внутри диэлектрика. За счет этого изменяются различные характеристики материалов (электропроводность, электрическая прочность, оптические и механические свойства). Если напряженность электрического поля в диэлектрике превышает 10^8 В/м, могут возникать электрические пробой из области внедренного заряда к поверхности диэлектрика или на окружающие металлические элементы конструкции. При пробое в диэлектрике образуется древовидный разветвленный разрядный канал – так называемая фигура Лихтенберга.

В результате образования разрядных каналов резко ухудшаются оптические и механические характеристики диэлектрических материалов и даже может происходить разрушение элементов КА, изготавливаемых из них.

Указанные явления усугубляются при облучении диэлектриков заряженными частицами с энергиями от около 1 до 10 МэВ, характерными для радиационных поясов Земли (РПЗ). Электроны РПЗ проникают в диэлектрические материалы на глубину нескольких миллиметров, создавая опасность более значительных разрушений материалов, чем при поверхностном заряжении. Аналогичные явления могут происходить при воздействии на ИСЗ со стороны протонов высоких энергий. В случае возникновения искусственных радиационных поясов Земли или при полете через магнитосферу Юпитера электризация диэлектрических материалов КА будет усиливаться, так как плотность потока электронов и их средняя энергия в таких образованиях могут значительно превышать потоки и энергии частиц в естественных РПЗ.

Величина и распределение заряда по глубине диэлектрика зависят как от энергии и потока частиц, так и от свойств материала – характера ловушек заряда в запрещенной зоне диэлектрика, его собственной и радиационной проводимости. Существенную роль играет также температура материала КА.

Коэффициент захвата заторможенных электронов в диэлектриках (например, в оптических стеклах) при комнатной температуре составляет несколько процентов. При охлаждении же диэлектрика до криогенных температур захватываются практически все падающие электроны. Соответственно снижается в десятки раз и интегральный поток электронов, попавший на единицу поверхности диэлектрика, при котором происходит пробой.

Характер роста напряженности электрического поля в объеме диэлектрика с увеличением интегрального потока электронов показан на рис. 11.

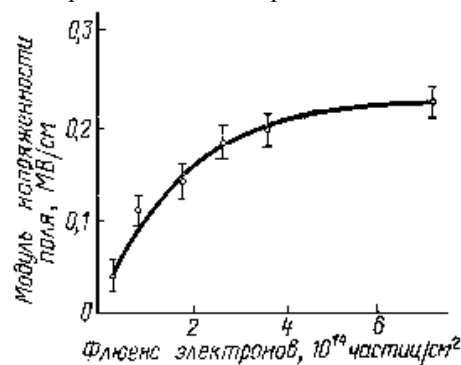


Рис. 11. Модуль напряженности электрического поля на расстоянии 1,5 мм от облученной грани образца щелочного боросиликатного стекла в зависимости от флюенса электронов

С течением времени внедренный электрический заряд релаксирует. Время релаксации внедренного заряда в различных материалах меняется в широких пределах – от долей секунды до нескольких лет. Этот процесс зависит как от типа энергетических ловушек в запрещенной зоне диэлектрика, так и от других электрофизических свойств материала.

Внутренние электрические поля участвуют в торможении входящего в диэлектрик пучка частиц и изменяют распределение поглощенной энергии по глубине. Потери энергии частиц в заряженном диэлектрике определяются не только тормозной способностью вещества, но и торможением со стороны внутреннего электрического поля. На этом эффекте основано измерение внутренних электрических полей в диэлектриках путем «просвечивания» их «быстрыми» электронами от радиоактивных препаратов.

В прозрачных диэлектриках электрические поля могут быть определены путем пропускания поляризованного света через материал с последующим наблюдением явлений, связанных с оптической анизотропией материала. Разработаны также методы зондирования внедренного заряда ударными волнами, создаваемыми

различными способами.

Помимо самопроизвольного пробоя, возникающего, когда напряженность электрического поля в диэлектрике достигает критической величины около 10^8 В/м, пробой в заряженных материалах могут вызываться и каким-либо внешним воздействием. В этом случае они происходят, когда исходная напряженность электрического поля в материале ниже критической.

Пробой в заряженном диэлектрике может быть инициирован, например, лазерным импульсом. Если лазерный луч фокусируется в объеме заряженного диэлектрика, в последнем возникает локальный оптический пробой в электромагнитном поле световой волны, который служит своеобразным «спусковым механизмом» для пробоя внедренного заряда. Инициирование пробоев может осуществляться и ударами микрометеороидов о поверхность заряженного диэлектрика. Такие явления неоднократно наблюдались в лабораторных экспериментах. Вблизи точки удара происходит

резкое увеличение проводимости материала за счет образования ударной волны и концентрации электрического поля, приводящее к пробое.

Следует ожидать, что в условиях космического пространства при полете ИСЗ в зоне РПЗ оптические системы, волоконная и интегральная оптика, криогенная техника, диэлектрические материалы микроэлектроники могут быть весьма чувствительны к явлениям радиационной электризации.

Иногда радиационная электризация диэлектриков в космосе может найти и полезное применение, в частности в радиационной защите КА за счет использования электростатического отталкивания потоков электронов заряженным диэлектрическим экраном. В целом же явление электризации, безусловно, отрицательно влияет на работу бортовых систем КА, вызывая, как мы видели, и обратимые, и необратимые их повреждения. Полностью предотвратить электризацию КА, видимо, невозможно, но, используя различные методы, можно ее заметно ослабить и ограничить наиболее вредные виды воздействий на КА. Об этом и пойдет речь в следующем разделе.

КАК ЖЕ БОРОТЬСЯ С ЭЛЕКТРИЗАЦИЕЙ?

Методы уменьшения электризации КА и защиты их бортовых систем от воздействия статического электричества можно разделить на пассивные и активные. В настоящее время на геостационарных ИСЗ и других КА в основном используются пассивные методы. К ним относятся специальные методы конструирования КА, заключающиеся в том, что все блоки и узлы должны иметь хороший электрический контакт с металлическим корпусом КА. Особое внимание уделяется обеспечению надежного электрического соединения экранирующих оплеток многочисленных электрических кабелей с корпусом и т. д. Конструкция КА должна иметь по возможности минимальное число отверстий, щелей, острых выступов, чтобы снизить вероятность появления резко неоднородных электрических полей.

Хорошую перспективу в повышении устойчивости электронных узлов КА к электромагнитным помехам имеет внедрение в космическое аппаратостроение устройств передачи информации внутри КА с помощью систем волоконно-оптической связи.

Для предотвращения дифференциального заряжения КА во всех случаях, где это возможно, должны применяться токопроводящие материалы или покрытия. Сейчас, например, создано терморегулирующее покрытие для ИСЗ на основе жидкого стекла с наполнителем – пигментом из ортотитаната цинка, имеющим высокую электропроводность. В этом покрытии практически не накапливался электростатический заряд при имитационных испытаниях. Покрытие обладает хорошими оптическими параметрами и высокой радиационной стойкостью.

Прозрачные проводящие пленки применяются для снятия электрического заряда с различных полимерных материалов (полиамида, фторопласта и т. д.), широко используемых на современных КА. Технология нанесения на поверхность диэлектриков проводящих прозрачных пленок с добавками из окиси индия (90%) и окиси олова (10%) основана на технике плазменного распыления в контролируемой кислородно-аргонной атмосфере. Эти пленки почти не изменяют термооптические свойства исходных материалов.

Электропроводность полимерных материалов повышается также путем модификации их структуры и нанесения на них тонких проводящих сеток из металлов и их окислов. Модификация полимеров осуществляется введением проводящих комплексов в их состав. А возможные методы нанесения проводящих сеток на поверхность базируются на технике фотолитографии и напыления тонких электродов. Пленки из полиамида с нанесенной проводящей сеткой значительно слабее удерживали электрический заряд на поверхности, чем аналогичные пленки без сетки, при облучении тех и других электронным пучком с энергией до 25 кэВ при плотности тока $3 \cdot 10^{-8}$ А/см² (рис. 12).

Термооптические характеристики такого полиамида ухудшаются незначительно, так как нанесенная металлическая сетка занимает лишь около 6% его поверхности. Было также установлено, что полиамид под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца постепенно увеличивает электропроводность. Этот эффект, по-видимому, можно будет использовать для уменьшения дифференциального заряжения КА.

Один из интересных методов снижения равновесного потенциала на поверхности диэлектрического материала (в частности, металлизированного с обратной стороны фторопласта), облучаемой электронами, основан на создании в нем многочисленных мелких сквозных отверстий. С этой целью образец материала обрабатывается лазерным лучом. Диаметр образующихся при обработке отверстий составляет около 100 мкм, а их количество достигает нескольких десятков на 1 см². Такая технология обработки материала позволяет снизить равновесный потенциал на нем в несколько раз. Механизм снижения потенциала поверхности диэлектрика обусловлен возникновением токов утечки с поверхности через отверстия к металлическому слою.

Применение токопроводящих материалов и покрытий в конструкции КА было успешно реализовано, например, при создании геостационарных ИСЗ «ГЕОС». Эксплуатация этих ИСЗ показала, что уровень их дифференциального заряжения удалось существенно снизить.

Недостаточно внимание к вопросу электризации на стадии конструирования КА может обернуться возникновением многих неполадок при его эксплуатации. Подобное произошло с упоминавшимся уже западноевропейским ИСЗ «МАРЕКС-1», запущенным 20 декабря 1981 г. для работы в международной спутниковой системе морской связи и, в частности, для ретрансляции сигналов бедствия, посылаемых аварийными радиобуями. Из-за высокого уровня электризации на этом ИСЗ возникали частые сбои. Запуск следующего ИСЗ этой серии был отложен специально для внесения изменений в конструкцию ИСЗ с целью снижения уровня электризации.

Активные методы регулирования электрического потенциала КА освоены пока значительно хуже. В основе этих методов лежит использование для сброса избыточного заряда с КА различных электронных и ионных пушек. По существу, здесь применяется та же техника, что и при проведении активных космических экспериментов, описанных

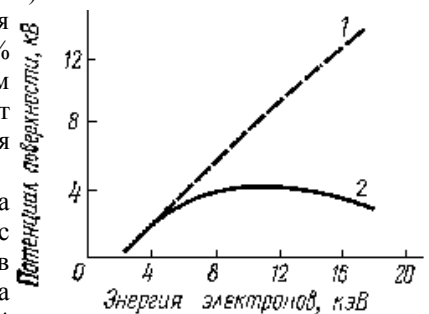


Рис. 12. Зависимость равновесного потенциала облучаемого материала от энергии пучка электронов: 1 – полиамид (каптон); 2 – полиамид с нанесенной на его поверхность металлической сеткой

ранее. Но если в активных экспериментах испускание пучка электронов или ионов с первоначально незаряженного КА приводило к нежелательному его зарядению, то в рассматриваемом здесь случае испускаемый пучок частиц может снять избыточный заряд КА.

Подобные технические средства были успешно испытаны на ИСЗ «АТС-5», «АТС-6», «СКАТХА» и др. Однако применение активных методов сброса избыточного заряда с КА сталкивается с рядом трудностей. Заряд может быть эффективно удален лишь с проводящих поверхностей и элементов КА; недостаточно хорошо устраняется дифференциальное зарядение КА, а в некоторых случаях оно может быть даже усугублено; для питания инжекторов требуется дополнительная электрическая энергия, а для управления их работой и контроля – специальная аппаратура. В связи с этим изучается и возможность использования пассивных эмиттеров электронов, действие которых основано на возникновении автоэлектронной эмиссии с многочисленных иглок.

Исследуется также влияние плотных потоков холодной плазмы, присутствующей в окрестности КА, на процессы его электризации (в частности, струй плазменных двигателей). Обнаружено, что создание подобных плазменных образований в окрестности КА может эффективно снижать уровень электризации. Такие явления исследовались, например, немецкими и японскими учеными в имитационных вакуумных камерах. Выполнено и математическое моделирование сходной ситуации с целью оценки энергетических потерь солнечными батареями.

Дальнейшее тщательное изучение методов компенсации заряда КА с помощью различных эмиттеров заряженных частиц и плазменных источников и разработка необходимых технических средств позволят, по-видимому, в ближайшем будущем значительно расширить применение активных методов борьбы с явлением электризации КА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершая рассмотрение наиболее важных физических и прикладных аспектов проблемы электризации КА, следует коснуться некоторых нерешенных вопросов, а также перспектив дальнейших исследований в этой области.

Несмотря на сравнительную простоту и ясность исходной физической формулировки задачи, анализ электризации реальных КА оказался чрезвычайно трудным из-за сложности их геометрии, применения на них множества диэлектрических материалов с различающимися электрофизическими характеристиками, неконтролируемого изменения этих характеристик в процессе эксплуатации КА, влияния возмущений, создаваемых движением КА, на траектории заряженных частиц в окрестности КА и т. д.

С начала 70-х годов до настоящего времени изучение проблемы электризации космических объектов сформировалось, по существу, в самостоятельное научное направление, использующее специально разработанные теоретические и экспериментальные методы исследований. Американский физик Г. Гарретт, активно работающий в этой области, так охарактеризовал сложившуюся ситуацию: «В целом многие десятки миллионов долларов и тысячи человеко-лет труда пришлось затратить на то, чтобы понять в деталях проблему, общее теоретическое описание которой было дано И. Ленгмюром еще в 1924 г.».

Тем не менее ряд важных сторон проблемы электризации требует дальнейшего тщательного изучения. Мы отмечали, что процесс зарядения материалов сильно зависит от их вторично-эмиссионных свойств и проводимости. Эти характеристики материалов претерпевают существенные изменения под действием факторов космической среды. Однако характер происходящих изменений еще очень мало изучен.

Недостаточно разработано пока теоретическое описание электризации ИСЗ на ионосферных высотах, в частности в авроральных зонах, с учетом влияния геомагнитного поля и возмущений плазмы движущимся ИСЗ. Существуют трудности и при описании процессов, происходящих при работе инжекторов заряженных частиц и источников плазмы на борту КА.

Требуют подробного изучения вопросы фокусировки и дефокусировки электронов и ионов электрическими полями, разработки конкретных рекомендаций по размещению на КА научных измерительных приборов и последующей интерпретации их показаний. Безусловно, необходимы дальнейшие усилия, направленные на исследование специфики электрических разрядов на поверхности и в объеме диэлектриков, а также на разработку способов снижения вредных последствий электризации материалов.

Можно ожидать, что по мере развития космической техники и технологии, освоения новых рабочих орбит и создания КА новых типов значимость проблемы электризации КА будет все возрастать. Будущие гигантские спутниковые солнечные электростанции должны функционировать в течение десятков лет без ремонта на геостационарных орбитах, т. е. в зоне повышенной электрической опасности. Надежной защитой от влияния электризации должны обладать и многие межпланетные КА.

Внедрение в космическое аппаратостроение конструкций, в которых используется высокие электрические напряжения, принципов электростатической защиты КА от радиации, волоконной и интегральной оптики, криоэлектроники – все это требует дальнейшего глубокого изучения проблемы электризации КА и совершенствования методов их защиты от воздействия статического электричества.

ЛИТЕРАТУРА

- Агаджанов П. А., Большой А. А., Галкин В. И. Спутники связи. М., Знание, 1981.
Акишин А. И., Новиков Л. С. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. М., Знание, 1983.
Альперт Я. Л. Волны и искусственные тела в приземной плазме. М., Наука, 1974.
Баранов А. М., Солонин С. В. Авиационная метеорология. Л., Гидрометеоздат, 1981.
Гальперин Ю. И. Полярные сияния в магнитосфере. М., Знание, 1975.
Громов В. В. Электрический заряд в облученных материалах. М., Энергоиздат, 1982.
Губкин А. Н. Электреты. М., Наука, 1978.
Дергобузов К. А., Евдокимов О. Б., Кононов Б. А. Радиационная диагностика электрических потенциалов. М., Атомиздат, 1978.

- Джоветт Ч. Е. Статическое электричество в электронике. М., Энергия, 1980.
 Дубинин Э. М., Подгорный И. М. Магнитные поля небесных тел. М., Знание, 1980.
 Имянитов И. М. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л., Гидрометеиздат, 1970.
 Казимировский Э. С. Мы живем в короне Солнца. М., Наука, 1983.
 Карцев В. П., Хазановский П. М. Стихиям не подвластен. М., Знание, 1980.
 Красовский В. И. Штили и штормы в верхней атмосфере. М., Наука, 1971.
 Левин Б. Ю., Симоненко А. Н. Комета Галлея. М., Знание, 1984.
 Мизун Ю. Г. Полярные сияния. М., Наука, 1983.
 Подгорный И. М. Активные эксперименты в космосе. М., Знание, 1974.
 Подгорный И. М. Плазма в космосе и лаборатории. М., Знание, 1972.
 Ратклифф Дж. Введение в физику ионосферы и магнитосферы. М., Мир, 1975.

НОВОСТИ ЗАРУБЕЖНОЙ КОСМОНАВТИКИ

ПРОЕКТЫ, РАЗРАБОТКИ, ИССЛЕДОВАНИЯ

В январе 1985 г. фирма «Локхид» начала общую проверку систем 2,4-метрового телескопа, который планируется вывести на орбиту с помощью МТКК летом 1986 г. Предполагается использовать этот «Космический телескоп» в течение по крайней мере 15 лет с периодическим его посещением американскими космонавтами с целью возможного ремонта, установления дополнительного оборудования и другого рода обслуживания. Первоначально стоимость «Космического телескопа» оценивалась в 250 млн. долл., однако возникшие сложности с его разработкой увеличили общую стоимость уже до 1,1 млрд. долл. Особые трудности проявились при изготовлении зеркала массой около 1 т. Шлифовка и полировка его заняли более чем на год, а после этого, во время хранения, оно покрылось тонкой пылью, которую, правда, удалось удалить в середине 1984 г. Для длительного слежения за слабыми объектами «Космический телескоп» снабжен точной системой гидирования с фокусным расстоянием около 13 м. Непосредственно за главным зеркалом монтируются пять отсеков с 5 взаимозаменяемыми приборами в зависимости от задач исследований. С помощью широкоугольной камеры возможно станет вести поиск планетных систем вокруг других звезд, изучать звездообразование и другие астрономические процессы. При этом рассчитывают, например, получать снимки планет Урана и Нептуна, по качеству не уступающие снимкам Сатурна и Юпитера, полученным наземными инструментами. Спектрограф, предназначенный для получения спектров слабых объектов, рассчитан для работы в видимом и ультрафиолетовом диапазонах. Имеется еще один спектрограф – для получения спектров с высоким разрешением. Фотометр с высоким временным разрешением можно будет использовать для изучения флуктуации блеска объектов, в том числе пульсаров. Помимо этих приборов американского производства, Европейское космическое агентство изготовило камеру для исследований слабых объектов.

United Press Information, 1984, 3 ноября

Ряд западноевропейских специалистов считают, что следующим шагом в усовершенствовании ракет-носителей серии «Ариан» должно стать создание ракеты, имеющей в своем составе крылатую первую ступень многократного пользования. Последняя после отделения на участке выведения может совершать планирующий полет с возвращением и посадкой в районе стартовой позиции, подобно тому, как приземляются орбитальные ступени американского МТКК. Проект такой ракеты-носителя рассматривался в ЕСА, но по заявлению представителей этой организации, стоимость разработки ракеты с многократной крылатой первой ступенью составит около 2,3 млрд. долл., тогда как создание ракеты-носителя «Ариан-5» оценивается в 1,8 млрд. долл. Однако в связи с тем, что стоимость запуска ракеты-носителя с многократной крылатой ступенью значительно меньше (примерно с 52 млн. долл. при использовании «Ариан-5» до 33 млн. долл.), то дополнительные расходы на ее разработку должны окупиться уже после 25-го запуска. Согласно предварительному проекту, возвращаемая крылатая ступень ракеты-носителя будет оснащена водородо-кислородным ЖРД, включающимся в момент старта и работающим до отделения от ракеты-носителя. В этой точке баллистической траектории, удаленной от места старта (космодрома Куру во Французской Гвиане) приблизительно на 400 км, скорость ступени будет составлять около 1,5 – 2 км/с. Спустя некоторое время в работу включатся установленные на ступени воздушнореактивные двигатели (ВРД), обеспечивающие активный полет на участке возвращения на космодром. Работа ВРД на этом участке ничем не будет отличаться от режима работы двигателей беспилотных самолетов. По мнению специалистов ЕСА, проектирование ступени с учетом высокой скорости входа ступени в атмосферу технически не является особо сложной проблемой, хотя западноевропейские аэрокосмические фирмы практически не имеют опыта разработки таких систем. Во всяком случае консорциум западноевропейских фирм подготовил доклад о возможностях ракеты-носителя с возвращаемой ступенью, эксплуатация которой могла бы начаться в конце 90-х годов.

Financial Times, 1984, № 29486.

Американскими специалистами сейчас интенсивно рассматривается проект постоянно действующей обитаемой станции на поверхности Луны, реализация которого может начаться к 2007 г. Но уже в период 1990 – 1992 гг. на орбиту вокруг Луны предполагается вывести специализированный спутник, в задачу которого войдут картирование поверхности Луны с относительно высоким разрешением и дистанционное зондирование для определения химического состава пород лунной поверхности в различных регионах (особенно в полярных районах). Для постройки обитаемой станции на Луне важное значение будут иметь и создание обитаемой орбитальной долговременной станции на околоземной орбите, и разработка многократных межорбитальных буксиров. На лунной станции будет находиться оборудование для изучения физиологических и психологических аспектов существования человека во взвешенных условиях, но основное внимание будет уделено разработке лунных природных ресурсов. В настоящее время считается возможным получение кислорода из пород лунного реголита. Практическое использование в будущем «лунного» кислорода обеспечит значительные преимущества при эксплуатации космической транспортной техники. Также считается возможным получение железа и

даже титана из обнаруженного на Луне ильменита, что является, однако, энергоемким процессом. Чтобы обеспечить постройку постоянно действующей обитаемой станции, необходимо разработать новые методы посадки на Луну и взлета с Луны. Для строительства станции на поверхность Луны придется доставить полезную нагрузку массой примерно 40 т. Ориентировочно масса станции составит 10 т. Возможно, потребуется разработка более совершенных ЖРД для межорбитальных буксиров. В начале эксплуатации жизнеобеспечение станции будет зависеть от поставок с Земли, но намечается постепенный переход на автономное снабжение. С этой целью предполагается наладить там производство продуктов питания. Постоянное присутствие человека на Луне потребует разработки мощных источников электроэнергии и совершенных средств передвижения, позволяющих удалиться от станции, например для создания крупногабаритных радиотелескопов на обратной стороне Луны, где нет электромагнитных помех. В дальнейшем предусматривается сооружение на окололунной орбите специальной станции для дозаправки и обслуживания буксиров и спускаемых аппаратов. Луна сможет стать базой для межпланетных полетов, поскольку небольшая гравитация, а также отсутствие атмосферы позволят в 20 – 30 раз по сравнению с земными сократить энергозатраты при запуске космических аппаратов. При этом полезная нагрузка межпланетных кораблей может составить до 50% их стартовой массы.

Aerospace America, 1984, т. 22, № 10

Темпы запуска спутников связи в США настолько интенсивны, что к концу текущего десятилетия выделенные для связи диапазоны частот 6/4 и 14/12 ГГц окажутся полностью занятыми, и в связи с этим начинается освоение диапазона частот 30/17 ГГц, в котором наряду с большим количеством каналов при использовании методов частотного и временного уплотнения обеспечивается получение узких диаграмм направленности антенн ретрансляционной аппаратуры. Так, фирма «Хьюз» предлагает проект спутниковой системы связи в диапазоне частот 30/17 ГГц с оценочной стоимостью 450 млн. долл., предусматривающий использование двух ИСЗ для обеспечения связи в 17 основных районах на континентальной части США. Вывод первого ИСЗ в точку «стояния» 93° з. д. запланирован на 1988 г., а второго ИСЗ в точку «стояния» 91° з. д. на 1989 г. Спутник, спроектированный на базе разрабатываемого сейчас ИСЗ «Интелсат-6», будет иметь по расчетам диаметр 3,6 м и длину 4,2 м, а его масса при расчетном сроке службе 10 лет составит 2550 кг.

High Technology, 1984, т. 4, № 11

Анатолий Иванович Акишин
Лев Симонович Новиков

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*. Редактор *Е. Ю. Ермаков*. Мл. редактор *Л. Л. Нестеренко*. Обложка художника *А. А. Астрецова*. Худож. редактор *М. А. Гусева*. Техн. редактор *Н. В. Лбова*. Корректор *Н. Д. Мелешкина*.

ИБ № 7262

Сдано в набор 24.12.84. Подписано к печати 13.02.85. Т 03811. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,55. Тираж 33 400 экз. Заказ 2589. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 854203.

Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.



4-я стр. обложки