

ПРИРОДА

№ 5, 2005 г.

Л.М. Зеленый, Е.Е. Григоренко

Миссия «Cluster»

© “Природа”

Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 03-07-90415)

vivovoco.nns.ru
vivovoco.rsl.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco

Миссия «Cluster», восставшая из огня подобно Фениксу

Л.М.Зеленый, Е.Е.Григоренко

После первого неудачного запуска ракеты «Ariane-5», потерпевшей катастрофу практически на старте в июне 1996 г., четырехспутниковая система «Cluster» Европейского космического агентства была, наконец, запущена летом 2000 г. носителями «Союз—Фрегат» с космодрома Байконур. Цель миссии «Cluster» — исследовать земную магнитосферу и установить, какое влияние оказывает на нее солнечная активность. О преимуществах многоспутниковых измерений для решения проблем магнитосферной физики, о приборах, которые работают на спутниках, о том, что нового удалось узнать о магнитосфере благодаря этому проекту, и пойдет речь в наших статьях.

Немного истории

Уже с самого начала космической эры ученые сознавали, что все процессы, происходящие в ближнем космосе, связаны между собой. Так, активные процессы на Солнце могут вызвать целую цепочку явлений сначала в межпланетной среде (образование сгустков ускоренной плазмы, движущихся к Земле), а затем уже и в околоземном космическом пространстве

© Зеленый Л.М., Григоренко Е.Е.,
2005



Лев Матвеевич Зеленый, член-корреспондент РАН, лауреат премии Гумбольдта, директор Института космических исследований РАН, профессор Московского физико-технического института. Область научных интересов — теория токовых слоев и пересоединения в бесстолкновительной плазме, турбулентность и процессы переноса в космической среде. Член ряда международных научных организаций, включая Международную академию астронавтики.



Елена Евгеньевна Григоренко, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики им.Д.В.Скобельцына МГУ и Института космических исследований РАН. Занимается исследованием механизмов распространения солнечных космических лучей в межпланетной среде и ускорения плазмы в магнитосфере Земли. Входит в группу российских ученых, участвующих в анализе данных миссии «Cluster-2».

(сильную деформацию магнитного поля Земли, ускорение частиц, пополняющих радиационные пояса, магнитную бурю). Чтобы установить связи между различными процессами и изучить их динамику, необходимо вести синхронные измерения на нескольких спутниках, находящихся в разных точках космического пространства. Запуск многоспутниковой миссии — технически очень сложная и дорогостоящая задача. Вот почему первые подобные измерения были выполнены лишь спустя почти 20 лет после запуска первого

искусственного спутника Земли. «Первой ласточкой» в этом направлении исследований космоса был американский проект ISEE (International Sun-Earth Explorer — Международный солнечно-земной исследователь). Три его спутника были запущены 12 августа 1978 г.; два из них находились близко друг к другу (на расстоянии порядка нескольких сотен километров), а третий располагался далеко от этой пары, как правило, вне земной магнитосферы («ISEE-C», рис.1). Основной задачей этой миссии было исследование влияния Солнца на околоземное космическое пространство: изучались структура плазмы солнечного ветра вблизи Земли и ударной волны, возникающей при взаимодействии солнечного ветра с земной магнитосферой; процессы, происходящие в плазменных слоях магнитосферы; излучение, генерируемое солнечными вспышками. Измерения, выполненные спутниками «ISEE», впервые позволили разделить пространственный и временной эффекты в наблюдении физических процессов (подробнее об этом речь пойдет далее). Благодаря этому проекту были открыты такие важные явления, как движение границы плазменного слоя магнитосферы и движение внешних границ самой магнитосферы. Было обнаружено, что у плазменного слоя есть пограничная область — исключительно важный регион, через который идет перенос энергии и импульса плазмы из дальних областей магнитосферы к Земле. К сожалению, очень малые дистанции между спутниками не позволили исследовать структуру космических объектов в разных масштабах, а недостаточно высокое временное разрешение препятствовало изучению быстропротекающих процессов. Тем не менее, данный проект помог значительно продвинуться в понимании физики околоземного пространства и открыл перспективы для будущих многоспутниковых исследований.

Следующей многоспутниковой миссией, также предназначенной для исследования магнитосферы и межпланетной среды вблизи Земли, стал российский проект «Интербол», в реализации которого, помимо России, участвовало еще 17 стран и космических агентств. В состав «Интербола» входили две пары спутник-субспутник (рис.2). Первая пара — спутник «Интербол-1» («Хвостовой зонд») и субспутник «Магион-4» — стартовала 2 августа 1995 г. с космодрома Плисецк. Она двигалась по вытянутой эллиптической орбите с апогеем 190 тыс. км и наклоном 62.8° [1]. Орбита пересекала экваториальную область хвоста магнитосферы на расстояниях от Земли порядка нескольких десятков земных радиусов, что позволило исследовать процесс взаимодействия плазмы солнечного ветра с внешней оболочкой магнитосферы и следить за развитием магнитных суббурь. Дистанция между спутниками пары изменялась в процессе полета от нескольких сотен до ~10 тыс. км, благодаря чему удалось изучать как

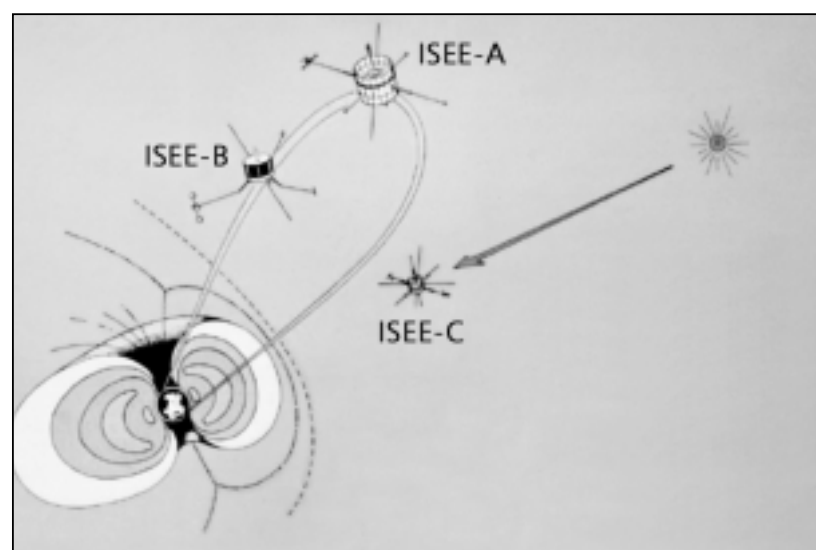


Рис.1. Расположение орбит спутников проекта ISEE.

волны и плазменные структуры небольшой протяженности, так и крупномасштабные явления. Пара «Интербол-1»—«Магион-4» выполняла систематические измерения параметров плазмы, магнитного поля и волн в магнитосферном хвосте и над авроральной областью до октября 2000 г.

Вторая пара спутников проекта «Интербол», состоящая из спутника «Интербол-2» («Авроральный зонд») и субспутника «Магион-5» была запущена 29 августа 1996 г. на эллиптическую орбиту с апогеем 20 тыс. км и наклоном 62.8° . Она была предназначена для исследования авроральной области и полярных каспов, исключительно важных участков магнитосферы, через которые частицы солнечного ветра проникают внутрь магнитосферы. К сожалению, к осени 1999 г. «Интербол-2» потерял ориентацию, однако данные от этой пары поступали еще до января 2000 г. За годы своей работы «Интербол-2» дал много ценной информации по физике авроральных явлений.

Миссия «Интербол» по праву может быть названа первой реальной попыткой исследования мелкомасштабных структур в околоземном кос-

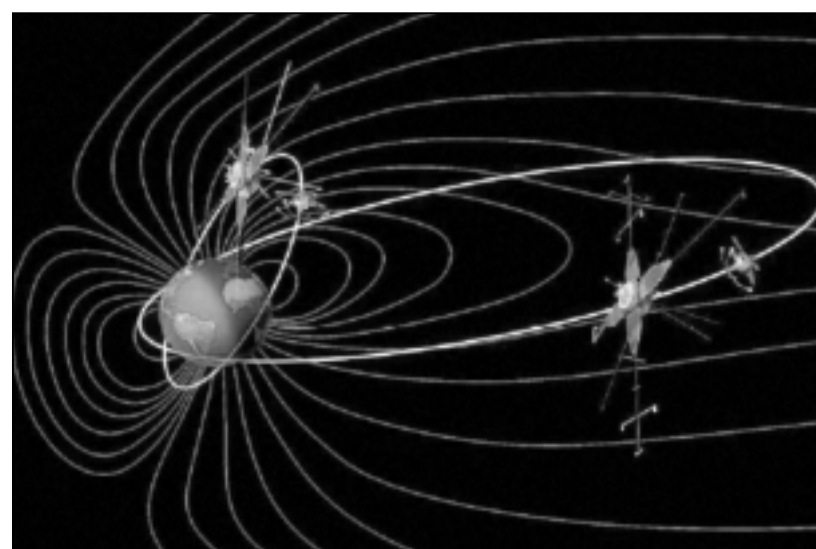


Рис.2. Спутники проекта «Интербол»: Авроральный и Хвостовой зонды.

ФИЗИКА

мическом пространстве многоспутниковым методом. На основе измерений, полученных в рамках проекта, уже опубликовано более 500 научных статей и защищены десятки диссертаций, но черту подводить пока рано, так как работа с данными «Интербола» продолжается. Этот проект не только расширил наши знания о магнитосфере и об обтекающем ее солнечном ветре, но и выявил «слабые места» миссии и тем самым стимулировал дальнейшую разработку многоспутниковых методов. Так, например, с помощью «Интербола» было невозможно следить за развитием космических процессов в трехмерном пространстве. Из-за того, что измерения производились только в двух точках пространства, представление о структуре объекта и его движении можно было получить лишь для одного направления. Этот недостаток планировалось устранить в готовящейся Европейским космическим агентством (European Space Agency, ESA) миссии «Cluster», которая должна была производить измерения уже в четырех точках пространства четырьмя идентичными спутниками, образующими в пространстве правильный тетраэдр.

Перипетии запуска

Проект «Cluster» был задуман ESA как часть амбициозной Солнечно-Земной научной программы (Solar Terrestrial Science Programme, STSP), предназначенной для изучения влияния на околоземную среду активных процессов, которые происходят на Солнце. Другой частью этой программы стал проект SOHO (Solar Heliospheric Observatory — Солнечная-гелиосферная обсерватория), который успешно стартовал в 1995 г. Совместная работа спутников «Cluster» и SOHO должна была обеспечить мониторинг всей цепочки процессов, начинающейся непосредственно в солнечной атмосфере и далее, через межпланетную среду, заканчивающейся в атмосфере Земли. Четыре спутника «Cluster» должны были быть одновременно выведены на промежуточную геостационарную орбиту европейской ракетой-носителем «Ariane-5». Запуск состоялся 4 июня 1996 г. с космодрома Куру (Франция). К несчастью, ракета взорвалась через 37 с после старта, и обломки спутников упали в болота, окружающие стартовую площадку. Казалось, что это — безнадежный конец десятилетним усилиям по подготовке миссии. Однако уже в июле того же года ESA предложило воссоздать этот уникальный научный проект по крайней мере на одном спутнике. Ему дали соответствующее его судьбе название «Феникс», в честь мифической птицы, которая умирает в огне и возрождается из пепла. Проект «Феникс» включал один спутник, на котором должны были быть те же приборы, что стояли на погибших спутниках «Cluster». Так как все приборы, входя-

щие в состав первой миссии, были изготовлены в двух экземплярах, на подготовку повторного проекта потребовалось уже значительно меньше времени и денег. К середине 1997 г. все приборы прошли испытания и новый спутник «Феникс» был готов к запуску. Но в ESA сознавали, что один спутник никогда не даст той научной информации, которую можно было получить с помощью четырех аппаратов, и научные задачи, которые были поставлены перед миссией «Cluster», не будут решены. Фактически проект «Феникс» позволил бы всего лишь повторить многочисленные односпутниковые измерения, которые проводились в околоземном пространстве в течение последних десятилетий. И тогда, несмотря на ограниченность бюджета, ESA приняло решение о воссоздании миссии «Cluster» в полном объеме, т.е. в составе четырех спутников. Новый проект был назван «Cluster-2»; запуск запланировали на 2000 г. — год ожидаемого пика солнечной активности. На этот раз решили не рисковать и доверили запуск и выведение спутников на орбиту российской ракете «Союз» (одной из самых надежных ракет в мире, с помощью которой на околоземную орбиту было выведено свыше 1500 пилотируемых и непилотируемых аппаратов). В качестве разгонного блока (четвертая ступень) использовался российский модуль «Фрегат». Было решено, что четыре аппарата «Cluster-2» будут запущены парами с космодрома Байконур. Первая пара спутников была благополучно выведена на орбиту 16 июля 2000 г., а 9 августа того же года так же успешно стартовала и вторая пара.

Полет комплекса «Союз—Фрегат» проходил в четыре стадии (рис.3). Вначале ракета поднималась вертикально вверх в течение 8 с (необходимое время для удаления от стартовой площадки на безопасное расстояние). Затем «Союз» отклонился к востоку и полетел над Сибирью. Все это время полет контролировался российскими станциями слежения. Спустя 1 мин 58 с после старта отделилась первая ступень (в ясный день отделение и падение ступени можно видеть со стартовой площадки Байконура); началась вторая стадия полета, которая продолжалась 1 мин 40 с и завершилась отделением второй ступени на высоте 170 км. Практически сразу после этого включились двигатели третьей ступени, которые работали в течение следующих 4 мин. К концу третьей фазы полета комплекс «Союз—Фрегат» вышел на баллистическую траекторию и достиг высоты 220 км. Через 5 с после отделения третьей ступени от носового модуля, содержащего четвертую ступень («Фрегат») и пару спутников «Cluster», были включены основные двигатели «Фрегата», и он вывел блок со спутниками на эллиптическую орбиту с апогеем 18 038 км, перигеем 251 км и наклоном 64,9°, затем «Фрегат» начал вращаться, чтобы стабилизировать спутники «Cluster-2» перед их отделением (рис.4).

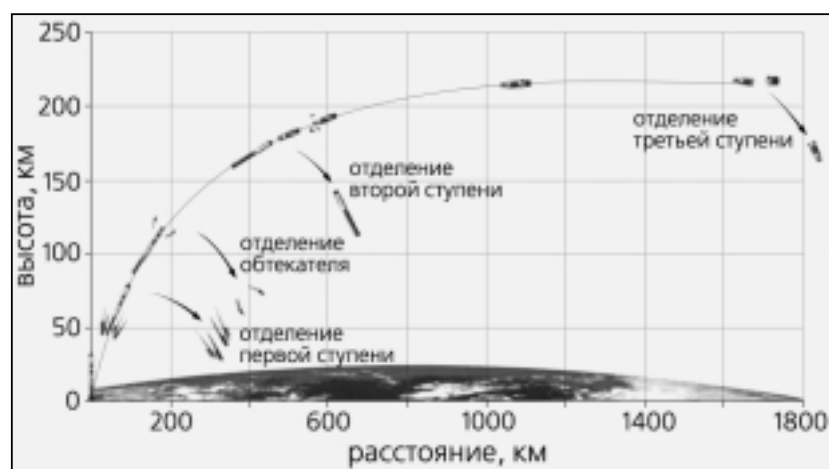


Рис.3. Стадии полета модуля «Союз—Фрегат».

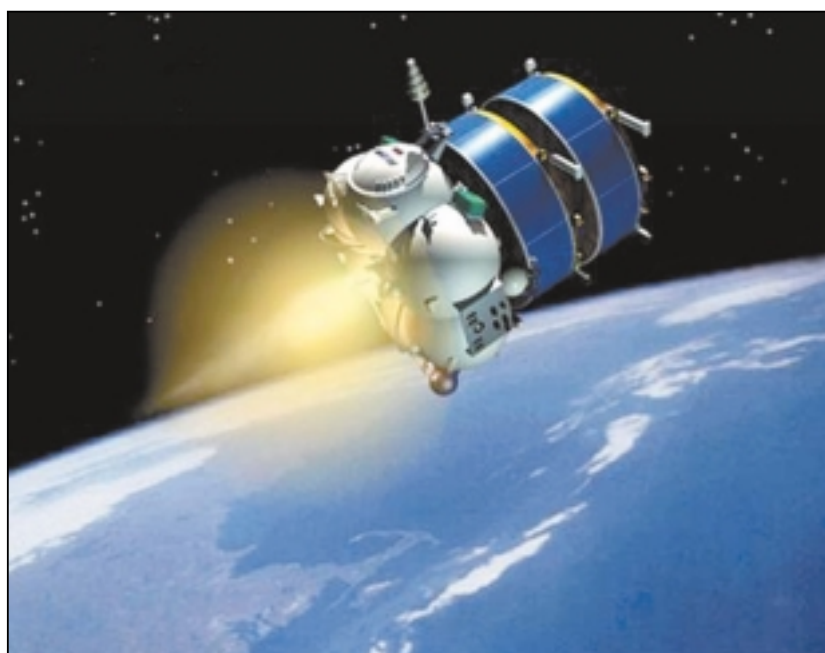


Рис.4. Заключительная стадия полета модуля Фрегат: выведение очередной пары спутников «Cluster» на рассчитанную орбиту.

На этом работа «Фрегата» была завершена; спустя 90 мин после старта с Байконура спутники «Cluster-2» окончательно отделились от четвертой ступени ракеты-носителя, и вскоре их индивидуальные сигналы зарегистрировала шведская станция слежения в Кируне. Теперь спутники были готовы приступить к маневрам, благодаря которым оказались на расчетных орбитах. Честно отслуживший «Фрегат» сошел с орбиты и через 6,5 ч после старта с Байконура упал в Атлантический океан к востоку от Южной Америки.

Так же штатно прошел и второй запуск, и все спутники заняли предназначенные им места.

Зачем нужны четыре спутника?

Итак, проект «Cluster-2» состоит из четырех одинаковых спутников, образующих в пространстве правильный тетраэдр (рис.5). Расстояния между спутниками всегда одинаковы, однако могут быть изменены в пределах от нескольких со-

тен до нескольких тысяч километров — размер тетраэдра делают большим или меньшим в зависимости от конкретных научных задач. Какие новые возможности для исследования космического пространства открываются благодаря такой конфигурации?

Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к современным проблемам космической физики и, в первую очередь, к проблемам физики земной магнитосферы. Магнитосфера Земли — это гигантская магнитная полость в плазме солнечного ветра, которая образуется за счет обтекания солнечным ветром магнитного диполя Земли. С дневной стороны Земли магнитосфера поджата из-за давления набегающего потока солнечного ветра. Во время сильных солнечных вспышек, когда к Земле с большой скоростью движутся потоки частиц, граница дневной магнитосферы может приблизиться к Земле вплоть до расстояния ~35 тыс. км. С ночной стороны Земли магнитосфера сильно вытянута и простирается более чем на миллион километров, образуя так называемый геомагнитный хвост. В земной магнитосфере существуют различные плазменные режимы и протекают сложные процессы накопления и высвобождения энергии. Магнитосфера защищает нас от непосредственного воздействия потоков высокоэнергетичных заряженных частиц, но в то же время в ней могут развиваться мощные магнитные бури, влияющие на живые организмы и технику. Земную магнитосферу можно рассматривать как гигантскую плазменную лабораторию, где происходят такие процессы, которые невозможно воссоздать в земных условиях, но можно изучать в космических экспериментах. Вот почему эта сложнейшая и загадочная область, окружающая Землю, представляет огромный интерес как для прикладных, так и для фундаментальных физических исследований. За время, прошедшее

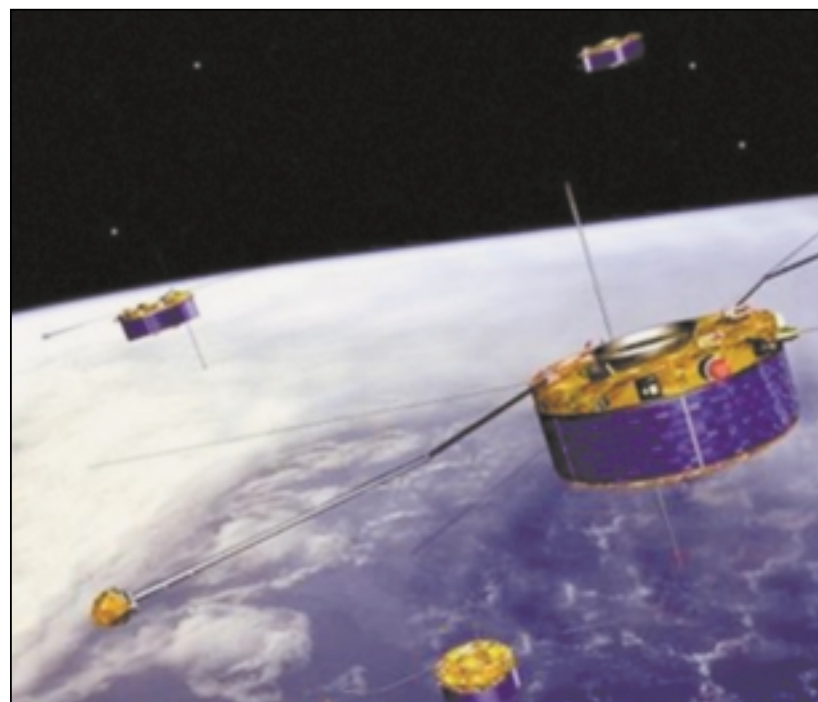


Рис.5. Квартет «Cluster-2».

ФИЗИКА

с момента первых запусков в космос научно-исследовательских аппаратов, удалось понять в целом общую структуру магнитосферы, выделить области с различными характеристиками плазмы и магнитного поля, создать модели, в среднем неплохо описывающие глобальную конфигурацию полей и свойства плазмы, по крайней мере для ближней к Земле части магнитосферы. Но несмотря на богатейший экспериментальный материал, который был накоплен за эти годы, загадок в магнитосферной физике стало не меньше, а, скорее, даже больше. Новые открытия ставили перед учеными новые вопросы, требующие более «тонких», детальных исследований.

Одна из самых больших трудностей в исследовании магнитосферных процессов заключается в необходимости надежно разделять пространственные и временные эффекты при наблюдении конкретного явления. Эта проблема возникает, когда измерения производятся в одной точке пространства, т.е. одним спутником, как это чаще всего случалось до сих пор. Если параметры среды, в которой находится спутник, изменяются, то невозможно понять, за счет чего это происходит: то ли среда сместилась в пространстве, и ее место заняла уже другая плазма, с другими характеристиками (пространственный эффект), то ли среда осталась прежней, но ее характеристики действительно изменились со временем (временной эффект). У односточных измерений есть и другой существенный недостаток — таким способом невозможно изучать пространственную структуру магнитосферных объектов, особенно таких важных участков, как границы, разделяющие области с разными характеристиками плазмы и магнитного поля. Благодаря возможности изменять расстояния между спутниками «Cluster-2» (их сведению и разведению), ученые смогли решать две разные задачи: во-первых, изучать мелкомасштабные структуры и изменения в околоземной среде и, во-вторых, получать информацию об общей картине того или иного процесса. И, наконец, с помощью одного аппарата очень трудно измерить плотность электрических токов в плазме — исключительно важную характеристику, которая несет информацию о свойствах и динамике границ, разделяющих области с различными плазменными режимами. Одновременные измерения магнитного поля в четырех точках пространства, осуществляемые спутниками «Cluster-2», впервые позволили определять плотность электрического тока.

Как измерить электрический ток в космосе?

Как известно, электрический ток есть упорядоченное движение заряженных частиц. В проводах бытовой электросети ток переносят электроны, в электролитических батарейках — ионы, а вот

в космической плазме вклад в электрический ток вносят как ионы, так и электроны. Таким образом, плотность электрического тока в космической плазме J может быть вычислена, если известны концентрация и скорость* ионов (n_i, v_i) и электронов (n_e, v_e):

$$J = e(n_i v_i - n_e v_e),$$

где e — заряд электрона.

С борта одного спутника, конечно, можно сосчитать, сколько ионов и электронов находится в кубике пространства, т.е. найти их концентрации. Можно также определить скорость ионов. А вот измерение направленной скорости электронов оказалось технически очень сложной, часто невыполнимой задачей из-за высокой тепловой скорости этих частиц, на фоне которой очень трудно выделить небольшую среднюю скорость их упорядоченного движения. Поэтому вычислить плотность тока в космической плазме через концентрации и скорости переносящих его заряженных частиц удается достаточно редко. Единственный метод, который здесь можно использовать — найти плотность тока J из закона Ампера, т.е. с помощью связи между силой тока и величиной изменения магнитного поля, которое производит протекающий в нем ток. Но чтобы измерить изменение магнитного поля и определить J , даже в самом простом «одномерном» случае необходимы два спутника «1» и «2»; J тогда вычисляется по формуле

$$\mu_0 J = \frac{B_1 - B_2}{r_1 - r_2},$$

где $r_1 - r_2$ — расстояние между спутниками «1» и «2»; B_1 и B_2 — индукции магнитного поля, измеренные этими спутниками; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума.

Однако все природные объекты трехмерны, и в реальном случае, чтобы найти плотность тока, необходимо знать, как изменяется магнитное поле в пространстве. Для таких измерений нужны уже четыре спутника: один спутник выбирается «центральным», и изменения магнитного поля измеряются между ним и каждым из трех соседних спутников, т.е. по трем направлениям в пространстве. Однако такой метод (он называется курлометром [2]) можно использовать лишь в том случае, если все четыре спутника находятся внутри токовой структуры и если плотность тока не меняется в пределах объема, заключенного внутри тетраэдра из них. Маленькие расстояния между спутниками «Cluster-2» (порядка нескольких сотен километров) позволяют определить плотность тока в большинстве магнитосферных объектов. В трехмерном случае выражение для ком-

* Имеется в виду средняя скорость упорядоченного движения частиц.

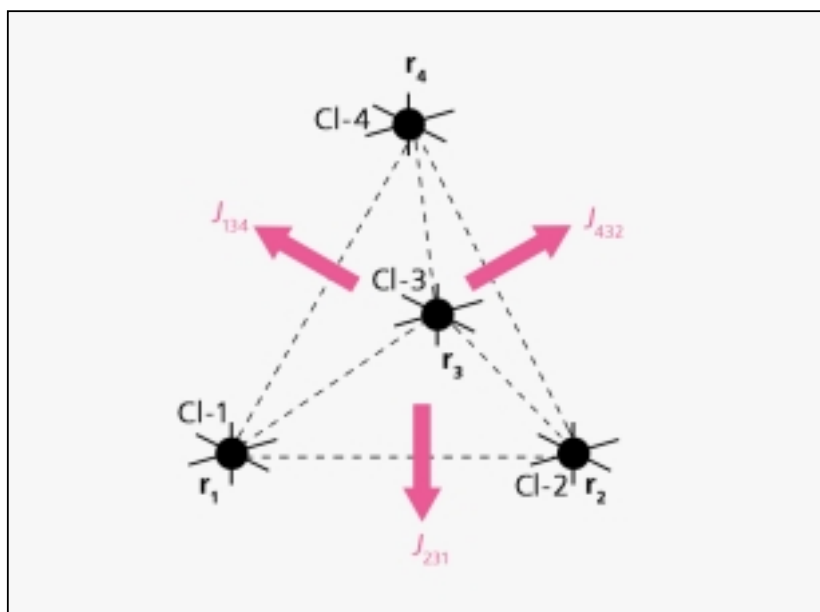


Рис.6. Схематическая иллюстрация измерения плотности электрического тока методом «курлометра».

понент средней плотности тока J_{ij} , протекающего через пространство, которое заключено внутри тетраэдра из спутников (рис.6), будет иметь вид

$$\mu_0 J_{ij}(r_{3i}r_{3j}) = \Delta B_{3i}r_{3j} - \Delta B_{3j}r_{3i}$$

где r_{3i} и ΔB_{3i} — соответственно расстояния и разность индукций магнитного поля между «центральной спутником» (в данном случае это спутник №3) и остальными тремя спутниками (индексы i, j соответствуют номерам этих спутников: №№1, 2, 4).

Итак, проект «Cluster-2» впервые позволил достаточно надежно измерить плотность тока в магнитосферных объектах (правда, при каждом таком вычислении в расчет должна быть заложена хотя бы грубая модель предполагаемого явления). Но этим параметром далеко не исчерпывается список характеристик космической плазмы, которые удалось установить благодаря ему.

Парад приборов

Что же за научная аппаратура установлена на спутниках «Cluster-2»? Каждый спутник имеет форму цилиндра с диаметром 2.9 м и высотой 1.3 м; вес его 1200 кг. Причем научная «начинка» весит всего лишь 71 кг, остальная часть общей массы приходится на двигатели и топливо, которые необходимы для корректировки орбиты в процессе полета, а также для изменения расстояний между спутниками. На всех спутниках установлен одинаковый комплект аппаратуры, состоящий из 11 научных приборов, которые производят измерения напряженности электрического и магнитного полей, потоков ионов и электронов, а также ионного состава окружающей плазмы. Рассмотрим вкратце, как работают некоторые из этих приборов.

Пространственно-временной анализатор флуктуаций поля (Spatio-Temporal Analysis of Field Fluctuations, STAFF) является одним из пяти приборов, предназначенных для измерения волн в плазме. Главная задача прибора STAFF — измерение спектральных характеристик волн и магнитной компоненты электромагнитных флуктуаций с частотой в диапазоне 40—4000 Гц внутри ударной волны [3]. Измерение магнитной компоненты электромагнитных волн осуществляется тремя ортогональными детекторами (рис.7), которые укреплены на жесткой стреле, вынесенной за борт. Детекторы (индукционные магнетометры), измеряющие B_y - и B_z -компоненты напряженности магнитного поля, ориентированы в плоскости вращения спутника, третий детектор (измеряющий B_x -компоненту) параллелен оси вращения. Каждый детектор содержит два соленоида. Принцип работы магнетометра прост: переменное магнитное поле, существующее в окружающем космическом пространстве, создает электрический ток в соленоиде, величина этого тока измеряется, и по ней на основе закона Био—Савара определяется магнитное поле. Главные технические трудности — это калибровка измерений на четырех спутниках и синхронизация их во времени. Тем не менее, разработчики прибора добились большой точности: ошибка определения магнитной индукции не превышает 0.1 нТ.

Феррозондовый магнетометр (FluxGate Magnetometer, FGM) измеряет квазипостоянную составляющую магнитного поля. Принцип измерения состоит в следующем: по одному из соленоидов течет переменный ток, магнитное поле которого вызывает перемагничивание сердечника по симметричному циклу и появление гармонического сигнала во втором, измерительном соленоиде. Но если на сердечник действует еще и внешнее магнитное поле, симметрия цикла нарушается и сигнал в измерительной цепи изменяется (появляются высшие гармоники). Такие магнетометры

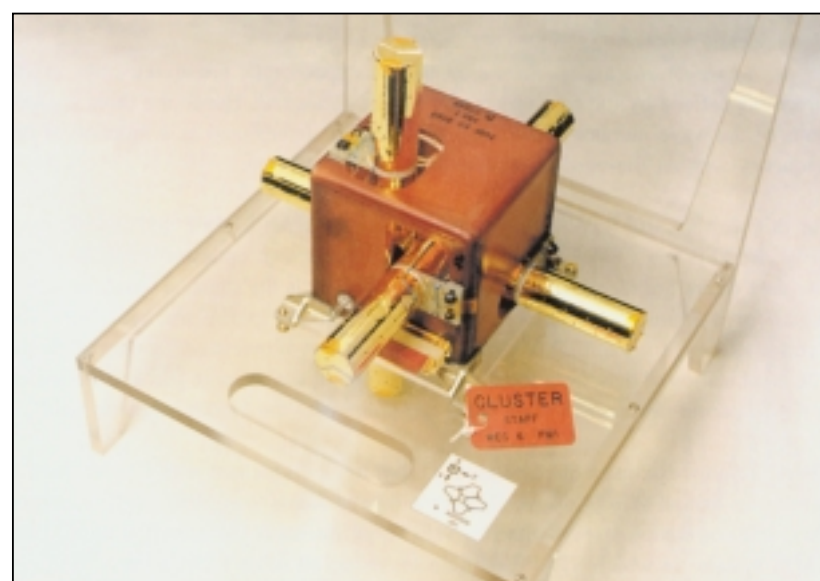


Рис.7. Пространственно-временной анализатор флуктуаций поля.

ФИЗИКА

обладают очень хорошей чувствительностью. Прибор установлен на пятиметровой штанге [4]. Он производит измерения магнитного поля с высокой частотой: до 67 измерений в секунду.

Анализатор высокочастотных и звуковых волн (Waves of High frequency and Sounder for Probing of Electron density by Relaxation, WHISPER) имеет основной целью измерение плотности заряженных частиц (в частности электронов) в диапазоне 0.2–80 частиц/см³ [5]. Второстепенная задача прибора — измерение электрической компоненты плазменных волн в частотном диапазоне 4–80 кГц с разрешением в 300 Гц. Данные о плотности плазмы, полученные с четырех аппаратов, позволяют выделять различные плазменные области в магнитосфере, изучать их форму и устанавливать характер движения их границ. Для измерения плотности плазмы в приборе WHISPER реализован радарный метод: 50-метровыми проволочными антеннами испускаются короткие радиопульсы с разными частотами, последовательно принимающими все значения из частотного диапазона прибора. Если частота излучаемой волны совпадает с плазменной частотой колебаний заряженных частиц в окружающем пространстве, возникает резонанс, и амплитуда колебаний частиц плазмы резко возрастает по сравнению с естественным фоном, который имел место до испускания волны прибором. Такой сигнал детектируется приемной антенной, фиксируется частота излучения, на которой наступил резонанс, и по формуле, связывающей концентрацию с плазменной частотой колебаний ω_p , определяется концентрация электронов n_e : $n_e = \omega_p^2 m_e / 4\pi e^2$, где e — заряд электрона, m_e — масса электрона.

Измеритель потока электронов и электрического тока (Plasma Electron And Current Experiment, PEACE) регистрирует электроны в широком диапазоне энергий: от 0.7 до 30 000 эВ с высоким временным разрешением: весь энергетический диапазон для всевозможных направлений прихода частиц (в поле зрения 4π) сканируется за 2 с, что соответствует половине периода вращения спутника вокруг своей оси [6]. Эти измерения производятся двумя детекторами, установленными на противоположных сторонах каждого спутника. Один детектор, названный Анализатором низкоэнергичных электронов (Low-Energy Electron Analyser, LEEA), измеряет поток электронов в диапазоне энергий от 0.7 до 10 эВ. Второй детектор — Анализатор высокоэнергичных электронов (High-Energy Electron Analyser, HEEA) — поток электронов с энергиями до 30 тыс. эВ. В обоих детекторах используется одна и та же стандартная методика на базе полусферического электростатического анализатора. Такой анализатор представляет собой конденсатор, пластины которого имеют форму концентрических полусфер. К ним подается напряжение от блока питания (он имеется на каждом спутнике), и возника-

ющее электрическое поле изменяет траекторию влетающих в анализатор заряженных частиц, заворачивая их, причем отрицательно заряженные частицы (электроны) и положительно заряженные частицы (ионы) поворачивают в разные стороны. Так как анализатор имеет полусферическую форму, только частицы одного знака (в зависимости от знака напряжения) получают шанс пройти через анализатор. Кроме того, для заданной величины напряжения, подаваемого на полусферы, только частицы определенной энергии (точнее, в общем случае многозарядных частиц, с определенным отношением энергии E к заряду частицы Q) смогут пролететь через анализатор, не притянувшись к полусферам. Они попадут на микроканальную пластину — электронное устройство, способное регистрировать сигнал от каждой частицы, подсчитывать число частиц, попавших на единицу площади пластины в единицу времени, и определять, таким образом, поток частиц данной энергии. Кроме того, современные микроканальные пластины позволяют фиксировать направление прилета частицы, которое рассчитывается по координатам частицы, упавшей на пластину. Изменяя с некоторым шагом величину подаваемого напряжения, можно просканировать весь желаемый энергетический диапазон и найти величину потока частиц для всех выбранных энергий. Поле зрения каждого из детекторов, согласно их геометрии, составляет 180°, но благодаря вращению спутника вокруг своей оси удается покрыть весь диапазон углов (за время, равное половине периода вращения — 2 с).

Ионный спектрометр для «Cluster» (Cluster Ion Spectrometry, CIS) (рис.8) регистрирует трехмерное распределение ионов по скоростям (концентрацию ионов, движущихся с данной скоростью в данном направлении) с высоким временным разрешением (за 4 с) и массовый состав ионной компоненты окружающей плазмы [7]. Эти задачи невозможно решить с помощью одного детектора, поэтому прибор CIS состоит из двух различных детекторов: Анализатора горячих ионов (Hot Ion Analyser, HIA) и Времяпролетного анализатора состава и функции распределения ионов (time-of-flight ion Composition and Distribution Function analyser, CODIF). В состав обоих детекторов входят полусферические электростатические анализаторы, предназначенные для измерения потоков ионов в энергетическом диапазоне от 5 до 32 000 эВ. Для определения массового состава прибор CODIF выполняет времяпролетный анализ ионов, прошедших через электростатический анализатор. Ионы с заданным отношением энергии к заряду, E/Q ускоряются дополнительной разностью потенциалов $U = -25$ кВ и попадают на углеродную фольгу, расположенную на входе во времяпролетную секцию прибора. Проходя через фольгу, ускоренные ионы взаимодействуют с атомами фольги и вызывают испускание электронов, кото-

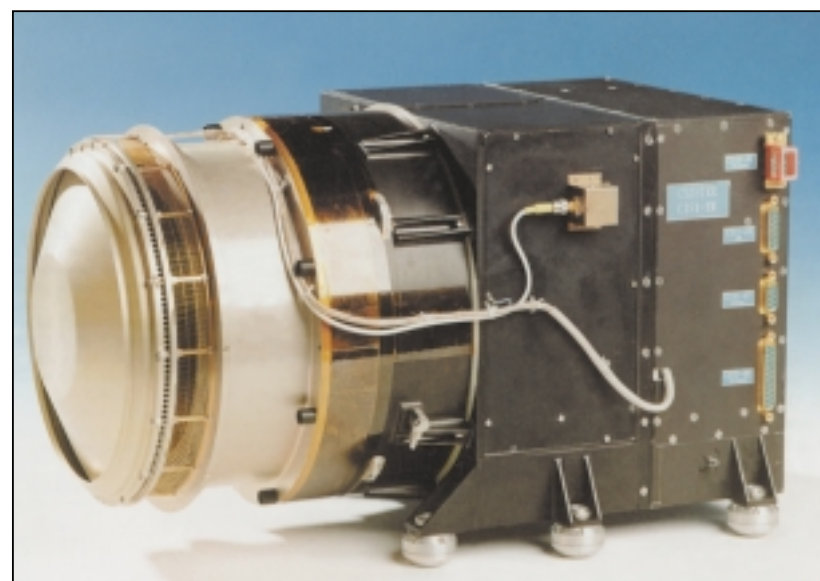
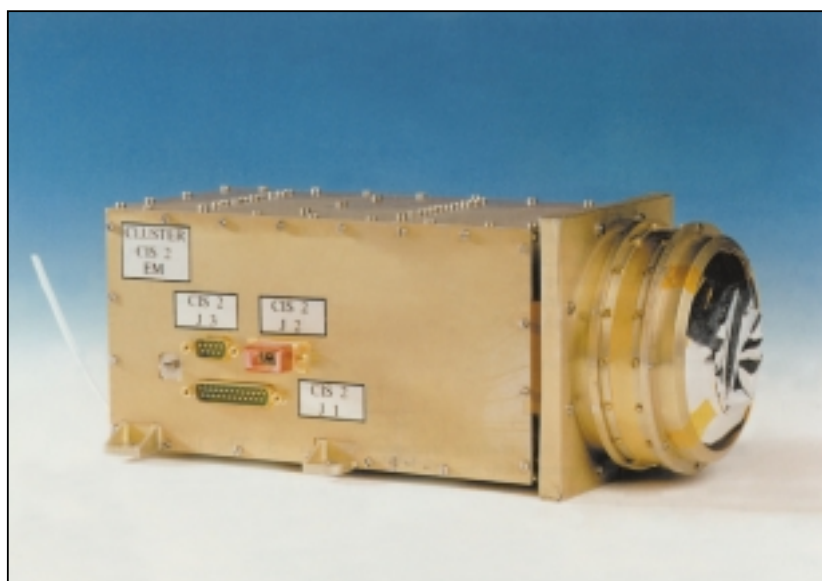


Рис.8. Детекторы НИА (слева) и CODIF.

рые благодаря малой массе движутся намного быстрее ионов. Пролетев времяпролетную секцию (длина которой составляет всего 3 см), электроны попадают на микроканальную пластину, которая фиксирует момент их прихода как «СТАРТ». Чуть позже сюда же приходят прошедшие через фольгу ионы, их приход служит сигналом «СТОП». Таким образом, зная длину времяпролетной секции (d), энергию ионов, которая была определена электростатическим анализом (E/Q) и величину интервала времени (t), прошедшего между сигналами «СТАРТ» и «СТОП», можно найти отношение массы ионов к их заряду, M/Q : $M/Q = 2(E/Q + eU)/(d/t)^2$. Детектор CODIF позволяет распознавать в набегающем потоке ионов основные составляющие околоземной космической плазмы: ионы H^+ , He^{++} , He^+ и O^+ . Оба прибора, НИА и CODIF, имеют поле зрения 4π и осуществляют измерения ионных функций распределения с высоким угловым разреше-

нием ($5.6^\circ \times 5.6^\circ$). В состав установки также входит сложная система обработки данных и контроля сбоев.

* * *

Первая научная информация начала поступать со спутников «Cluster-2» с февраля 2001 г. Что же нового удалось обнаружить спутникам в околоземном космическом пространстве? Об этом — в нашей следующей статье. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 04-02-1737); Министерства образования и науки РФ (проект НШ-17 39.2003.2); Фонда INTAS (гранты YS Fellowship № 03-55-1880; № 00-04-65; № 03-51-3738) и Фонда содействия отечественной науке (программа «Кандидаты наук РАН»).

Литература

1. Zelenyi L., Sauvaud J.-A. // *Annales Geophysicae*. 2002. V.20. P.289—291.
2. Dunlop M.W., Balogh A., Glassmeier K.-H., Robert P. // *Journal of Geophysical Research*. 2002. V.107. №A11. P.1384—1397.
3. Rezeau L., Sahraoui F., D'Hurnieres E. et al. // *Annales Geophysicae*. 2001. V.19. P.1463—1470.
4. Balogh A., Carr C.M., Acufia M.H. et al. // *Annales Geophysicae*. 2001. V.19. P.1207—1217.
5. Decreau P., Ferreau P., Krasnoselskikh V. et al. // *Annales Geophysicae*. 2001. V.19. P.1241—1258.
6. Owen C.J., Fazakerley A.N., Carter P.J. et al. // *Annales Geophysicae*. 2001. V.19. P.1509—1522.
7. Reme H., Aoustin C., Bosqued J.M. et al. // *Annales Geophysicae*. 2001. V.19. P.1303—1354.