

ПРИРОДА

№ 6, 2003 г.

Зеленый Л.М., Григоренко Е.Е.

Квартет "Cluster" исследует тайны магнитосферы

© "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

Квартет «Cluster» исследует тайны магнитосферы

Л.М.Зеленый, Е.Е.Григоренко

Четырехспутниковая миссия «Cluster» позволяет производить идентичные измерения сразу в четырех точках пространства (впервые в истории магнитосферных исследований!)*. Благодаря этому удастся исследовать трехмерную структуру объектов, определять плотность тока и, главное, разделять пространственный и временной эффекты в наблюдениях изучаемых явлений. Изменение дистанции между спутниками (от нескольких сотен до нескольких тысяч километров) дает возможность получать информацию как о мелкомасштабных структурах в околоземной плазменной среде, так и о крупномасштабной картине тех или иных процессов в магнитосфере Земли и в солнечном ветре, обтекающем ее.

Рябь на поверхности магнитопаузы

Магнитное поле Земли отделено от межпланетного магнитного поля и плазмы солнечного ветра тонким плазменным слоем, называемым магнитопаузой

* См.: Зеленый Л.М., Григоренко Е.Е. Миссия «Cluster», восставшая из огня подобно Фениксу // Природа. 2005. №5. С. 46—53.

© 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 им.М.В.Ломоносова 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».

(рис.1). Положение магнитопаузы определяется балансом внешнего и внутреннего давлений: давлений плазмы солнечного ветра и магнитного поля Земли. Солнечный ветер — среда очень динамичная, его давление постоянно меняется, причем после очередного изменения баланс давлений устанавливается не сразу, поэтому магнитопауза все время находится в движении. Четырехспутниковые измерения «Cluster-2» позволяют детально изучать движения магнитопаузы и исследовать ее трехмерную структуру.

ФИЗИКА

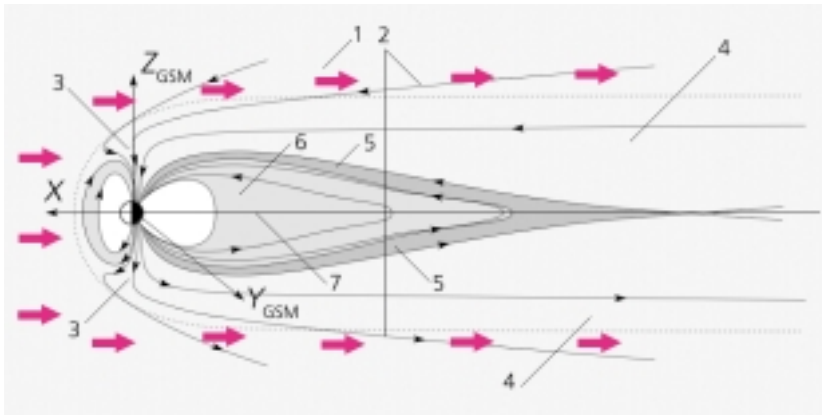


Рис. 1. Схематическое строение магнитосферы в плоскости XZ_{GSM} . 1 — солнечный ветер, 2 — магнитопауза, 3 — северный и южный касп, 4 — высокоширотные доли геомагнитного хвоста (северная и южная), 5 — пограничная область плазменного слоя, 6 — плазменный слой, 7 — нейтральная плоскость. Ось X направлена вдоль линии Земля—Солнце, ось Z — вдоль магнитного диполя Земли, а ось Y дополняет ортогональную систему координат.

Благодаря наблюдениям «Cluster-2» была подтверждена гипотеза о том, что внешняя поверхность земной магнитосферы не гладкая, а имеет «рифленый» вид из-за проходящей по ней непрерывной серии возмущений, напоминающих океанские волны. Первые экспериментальные доказательства существования на магнитопаузе плазменных волн обнаружили в начале 2001 г. при анализе данных измерений магнитного и электрического полей. Эти волны наблюдаются как последовательность «гребней» и «впадин», по которым маленькая флотилия спутников скользит подобно виндсерферу. Длина волны — расстояние между соседними горбами или впадинами — составляет ~ 2000 км (рис.2). Эти возмущения дви-

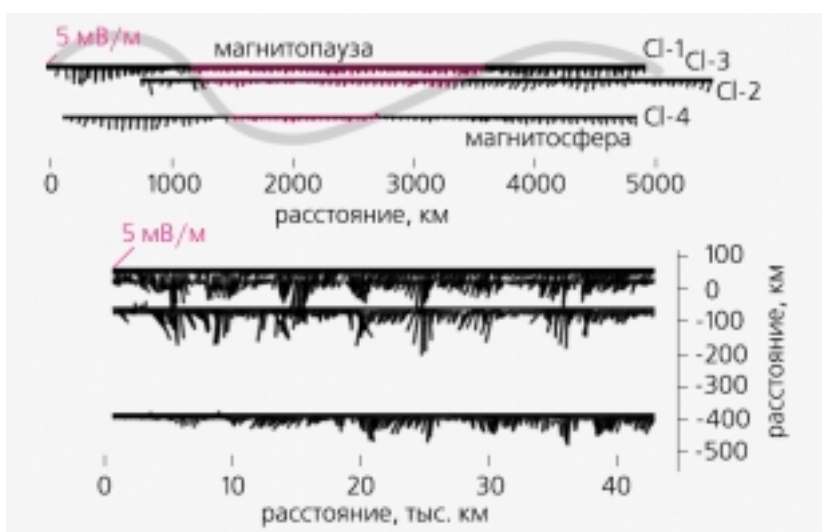


Рис.2. Измерения волн на поверхности магнитопаузы. Черточками показаны направления векторов напряженности электрического поля, измеренные на четырех спутниках «Cluster-2». Серая линия изображает форму волны.

жутся по магнитопаузе в направлении от Солнца со скоростью ~ 145 км/с [1]. Чтобы осознать величину такой скорости, нужно представить себе самолет, который бы мог за 2.5 с преодолеть расстояние от Лондона до Парижа. Год спустя подобные плазменные волны были также обнаружены в плазменном слое хвоста магнитосферы, их длина волны составляла уже $\sim 26\,000$ км, и двигались они в направлении с востока на запад (поперек хвоста) со скоростью 20 км/с.

Отметим, что первые указания на существование крупных «горбов», бегущих по поверхности магнитопаузы, были получены еще раньше в российском проекте «Интербол».

Двойной касп

Магнитное поле вблизи магнитопаузы практически всюду направлено по касательной к ее поверхности и образует тем самым естественный барьер, препятствующий проникновению частиц солнечного ветра внутрь магнитосферы. Однако существуют две области (их проекция попадает в окрестности магнитных полюсов Земли), в которых силовые линии магнитного поля почти перпендикулярны поверхности магнитопаузы. Эти области называются северным и южным каспами. Через них частицы солнечного ветра могут врываться внутрь магнитосферы (рис.1). Области каспов представляют особый интерес для исследования, так как служат каналами, через которые энергия и плазма солнечного ветра поступают во внутренние области магнитосферы.

Полярная орбита «Cluster-2» предусматривала пересечение области каспов на каждом своем витке. Полученные данные показали, что при пролете полярных областей на дневной стороне магнитосферы наблюдаются значительные изменения энергии и плотности протонов, движущихся в направлении от Солнца. На низких широтах, вне области каспа, ионные спектрометры спутников регистрировали большое количество протонов высоких энергий (более 30 кэВ). Однако по мере того, как спутники продвигались в область более высоких широт и входили в район каспа, энергии регистрируемых протонов снижались и составляли 0–5000 эВ, также уменьшалась и плотность протонов.

30 августа 2001 г. аппараты двигались друг за другом почти по одной и той же орбите. В такой конфигурации квартет влетел в область северного каспа. Первым в эту область вошел спутник Cl-1, затем, минутой спустя, спутник Cl-4. Ионные спектрометры и того, и другого зафиксировали ожидаемое уменьшение плотности протонов (рис.3). Аппарат Cl-3 в это время находился всего лишь в 600 км от этих спутников, однако спектрометр, установленный на нем, не регистрировал признаков входа в касп в течение следующих 45 мин!

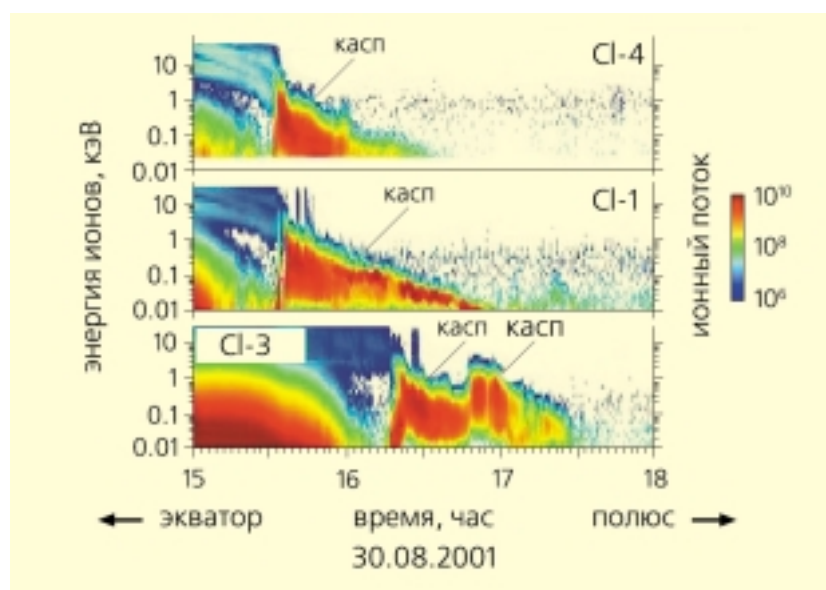


Рис.3. Ионные спектрограммы, измеренные на спутниках CI-4, CI-1 и CI-3. Цветом показана величина потока ионов (согласно цветовой шкале в правой части рисунка). На спектрограмме, измеренной аппаратом CI-3, видны повторные уменьшения энергии и плотности ионов — явление двойного каспа.

Лишь через три четверти часа на аппарате CI-3 было засечено снижение плотности протонов (вход в касп), однако спустя 28 мин произошло скачкообразное возрастание плотности и энергии протонов (выход из каспа). Затем в течение короткого времени эти характеристики не изменялись, после чего плотность и энергии протонов вновь стали падать. Явление повторных уменьшений плотности и энергии протонов было названо двойным каспом. Объясняется оно тем, что область каспа быстро сдвигается по направлению к северному полюсу в ответ на изменение направления межпланетного магнитного поля с южного на северное.

Секреты авроры

Всем, кому приходилось бывать за полярным кругом, хорошо знакомо полярное сияние, или аврора, которая «вывешивает» вспыхивающие зеленые и красные занавеси на ночном полярном небе. Но гораздо менее известно таинственное явление, называемое «черной авророй» — странный электрический феномен, создающий черные области внутри обычного полярного сияния. Он наблюдается как в районе северного, так и вблизи южного полюсов.

Чтобы разгадать загадку «черной авроры», шведские и английские ученые использовали измерения спутников «Cluster-2», которые как раз производились в области ее генерации. «Черная аврора» принимает различные формы: она может наблюдаться в виде черных колец, петель, пузырей на фоне сияния, создаваемого обычной авро-

рой. Новые данные показали, что «черная аврора» появляется в тех местах, где есть «дыры» в ионосфере (верхнем ионизованном слое атмосферы, в котором генерируется полярное сияние). Обычное полярное сияние образуется следующим образом. Электроны, двигаясь вдоль силовых линий магнитного поля, попадают в ионосферу либо из солнечного ветра, проникая через касп, либо из хвоста магнитосферы. Эти электроны взаимодействуют с нейтральными атомами или молекулами ионосферы, в результате чего атомы переходят в возбужденное состояние, время жизни которого обычно мало (вплоть до 10^{-8} с). Возбужденный атом быстро переходит в основное состояние (или в состояние с меньшей энергией), испуская излучение в видимом диапазоне длин волн, которое и дает ионосферное свечение (полярное сияние). «Черная аврора» создается обратным механизмом: заряженные частицы (вызывающие свечение) вытягиваются из ионосферы в космическое пространство, и в результате в ионосфере образуются «дыры» в виде несветящихся областей, или «черная аврора» (рис.4). Измерения «Cluster-2» позволили понять, насколько масштабны вертикальные структуры, образующие «черную аврору», как долго они могут существовать и как они изменяются с высотой [2].

Благодаря измерениям «Cluster-2» удалось понять происхождение протонной авроры, еще одного загадочного типа дневной авроры, которая наблюдается в виде ярких пятен в атмосфере на дневной ее стороне. Оказывается, этот эффект возникает в результате образования «разрывов» в магнитном поле, через которые протоны солнечного ветра впрыскиваются во внутреннюю магнитосферу и, попадая в атмосферу, вызывают в ее верхних слоях свечение — яркие пятна.

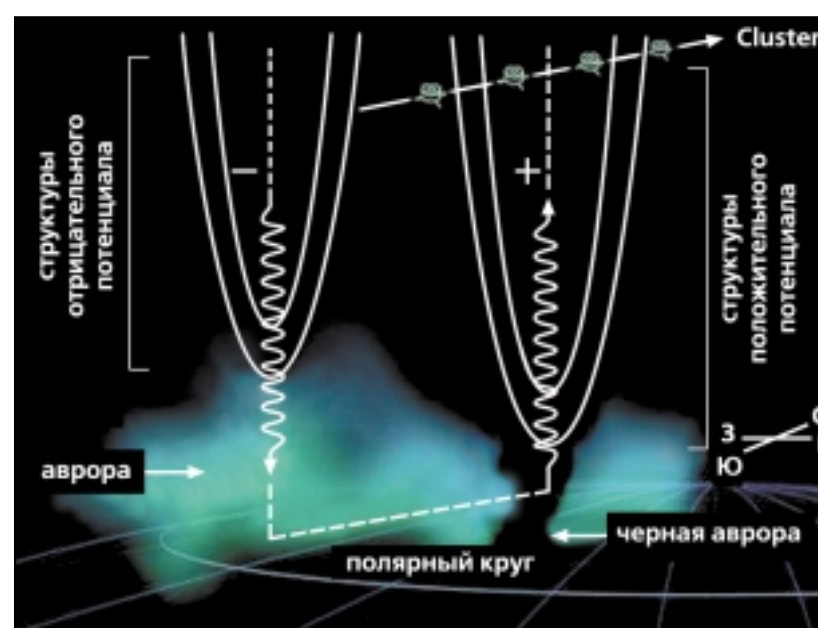


Рис.4. Сценарий образования «черной авроры». Измерения «Cluster-2» позволили установить, что «черная аврора» является «анти-авророй», т.е. образуется механизмом, противоположным механизму образования обычной авроры.

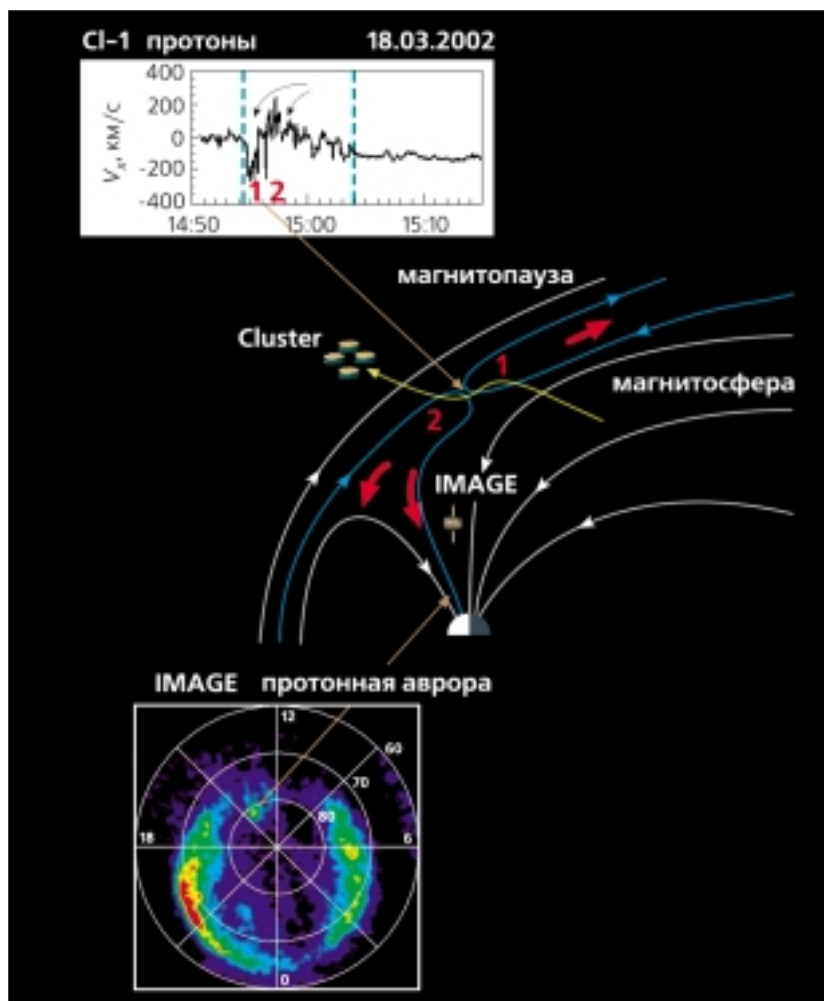


Рис.5. Механизм образования протонной авроры. В верхней части рисунка показаны скорости протонов, измеренные спутником CI-1. В нижней части рисунка приведены данные измерения потока ультрафиолетового излучения спутником IMAGE.

Наблюдения «Cluster-2» впервые позволили точно и однозначно установить связь между появлением разрыва в магнитном поле и образованием протонной авроры. 18 марта 2003 г. в результате столкновения потока энергичных солнечных протонов с земной атмосферой наблюдалось яркое пятно, зарегистрированное спутником НАСА IMAGE (Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration, Обсерватория по формированию изображений для глобального исследования авроральной области и магнитопаузы) (рис.5). В это же время флотилия «Cluster-2» как раз проходила через область, которую пересекал поток протонов. Детальный анализ данных показал, что в этой области происходило так называемое магнитное пересоединение, нередко развивающееся в виде кратковременных вспышек, в ходе которых соединяются два полупространства, часто имеющие разные топологии магнитного поля и плазменные характеристики. При этом нарушается целостность и непроницаемость магнитопаузы за счет того, что магнитные силовые линии земного поля перезамыкаются с силовыми линиями магнитного поля солнечного ветра. В результате солнечные протоны втекают внутрь магнитосферы, вызывая свечение атмосферы, т.е. протонную аврору.

Электрические токи в земной магнитосфере

Первый результат измерения плотности тока четырьмя спутниками «Cluster-2» был получен вблизи магнитопаузы. Плотность тока измерялась в локализованной магнитной трубке, заполненной плазмой. Такие трубки формируются в результате магнитного пересоединения — они соединяют внешнюю область, заполненную плазмой солнечного ветра, с внутренней областью магнитосферы, расположенной под магнитопаузой, и становятся «каналами», по которым плазма перетекает из одного полупространства в другое (рис.6). Магнитные трубки могут существовать в течение длительного времени, по ним плазма из солнечного ветра может поступать внутрь магнитосферы.

Было обнаружено, что распределение плотности тока внутри такой трубки неоднородно и имеет два максимума, в которых величина плотности тока достигает 25 и 55 нА/м² (для сравнения: средняя плотность тока в обычной стоваттной лампочке составляет $\sim 30 \cdot 10^4$ А/м² — в 10^{13} раз больше). Ток внутри трубки направлен почти в точности вдоль вектора магнитного поля; он обеспечивает равновесие плазмы в трубке. Полученный результат чрезвычайно важен для создания моделей силовых трубок и понимания того, как поток энергии поступает от солнечного ветра в магнитосферу.

Для физики магнитосферы важное значение имеют измерения плотности тока не только в области магнитопаузы, но и в хвосте магнитосферы.

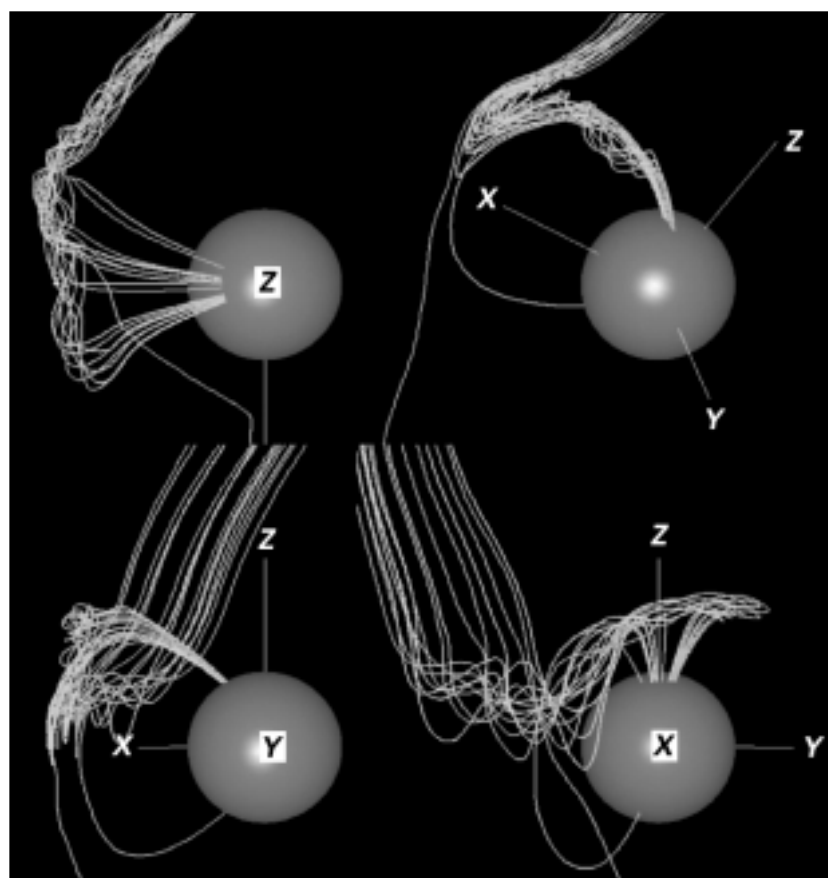


Рис.6. Модель конфигурации магнитного поля в локализованной магнитной трубке с плазмой: вид с разных направлений.

Напомним, что геомагнитный хвост образуется на ночной стороне Земли за счет вытягивания силовых линий земного магнитного поля потоком солнечного ветра, обтекающим магнитосферу. Магнитное поле в геомагнитном хвосте имеет сложную топологию: в высокоширотных областях хвоста оно вытянуто практически вдоль линии Земля—Солнце (вдоль оси X), а по мере приближения к экваториальной плоскости модуль магнитного поля уменьшается практически до нуля, и в плоскости, называемой нейтральной, происходит поворот силовых линий (рис.1). Таким образом, нейтральная плоскость делит хвост на две доли, северную и южную, с противоположными направлениями магнитного поля. В результате такой геометрии поля по нейтральной плоскости протекает ток, направленный поперек хвоста (в направлении с утра на вечер). Он течет в слое конечной толщины, который называется токовым слоем. В хвосте накапливается энергия, поступающая в магнитосферу Земли из солнечного ветра. Процессы высвобождения этой энергии также происходят в хвосте, точнее в его токовом слое, и могут либо иметь взрывной характер и вызывать магнитосферные возмущения определенной силы (суббури), либо развиваться в почти стационарном режиме. Во втором случае энергия магнитного поля преобразуется в кинетическую энергию ускоренных частиц и тепловую энергию ионосферы, которую подогревают токи, текущие из магнитосферы вдоль силовых линий магнитного поля.

До сих пор считалось, что структура токового слоя геомагнитного хвоста хорошо описывается моделью Харриса: магнитное поле монотонно уменьшается по мере приближения к нейтральной плоскости; соответственно, распределение плотности тока в слое имеет один максимум (как раз в нейтральной плоскости), спадая к краям слоя (рис.7,а).

Одновременные измерения на трех спутниках «Cluster-2» позволили проверить правильность этой модели. Оказалось, что в спокойные периоды структура токового слоя неплохо описывается моделью Харриса. Однако в интервалы, когда в хвосте происходят мощные процессы высвобождения энергии, которые сопровождаются ускорением частиц и формированием высокоскоростных потоков плазмы, движущихся внутри токового слоя, структура слоя претерпевает сильные изменения. Так, если толщина токового слоя до момента наблюдения в нем потока ускоренных ионов была ~ 5000 км, то в момент прохождения потока она уменьшается в 10 раз и становится сравнимой с радиусом орбиты иона, вращающегося вокруг силовой линии магнитного поля (ионным гирорадиусом) [3]. При этом плотность тока в слое увеличивается в четыре-пять раз. И что еще интереснее, в периоды возмущений в токовом слое могут образовываться дополнительные максимумы плотности тока (рис.7,б и 8), расположенные вне ней-

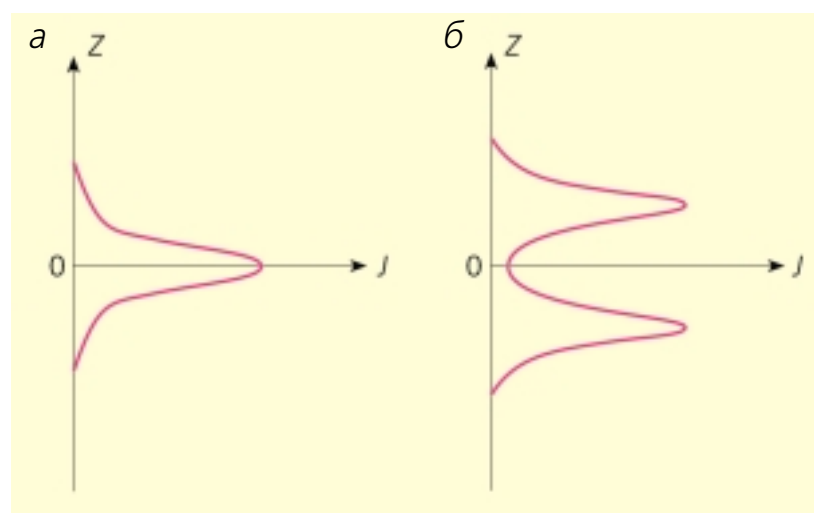


Рис.7. Распределение плотности электрического тока J в зависимости от расстояния от нейтральной плоскости, Z , в токовом слое геомагнитного хвоста. $Z = 0$ соответствует положению нейтральной плоскости: согласно модели Харриса (а), при наличии бифуркации (б).

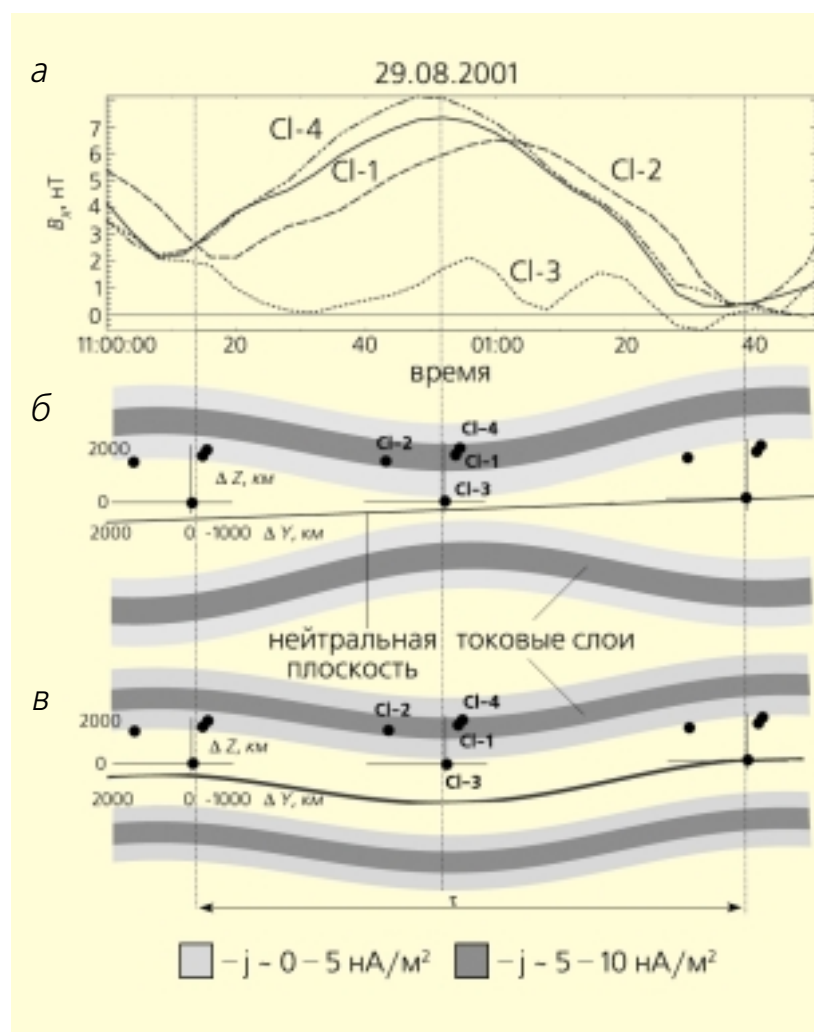


Рис.8. Измерения компоненты B_x магнитного поля в токовом слое геомагнитного хвоста четырьмя спутниками «Cluster» [4] (а).

Распределение плотности тока (ее величина показана оттенками серого цвета) в токовом слое, полученное методом курлометра — на основе измерений пространственных градиентов магнитного поля (б, в). Схематично изображены два возможных типа возмущений токового слоя: «sausage»-like — неустойчивость типа «сосиска» (б), «kink»-like — неустойчивость типа «колена» (в).

ФИЗИКА

ральной плоскости — происходит так называемая бифуркация токового слоя.

Подобное расщепление токового слоя ранее удалось обнаружить на основе статистического анализа большого количества наблюдений в дальних областях хвоста (на расстояниях от Земли ~650 000 км), выполненных спутником «Geotail». Благодаря проекту «Cluster-2» впервые была детально исследована тонкая структура этого явления и было установлено, что в периоды бифуркации токовый слой не остается неподвижным. Как правило, наряду с ней наблюдаются вертикальные движения токового слоя со скоростью ~60 км/с. Одновременно были зафиксированы волны, движущиеся по поверхности токового слоя поперек хвоста (с утра на вечер) со скоростью ~200 км/с [4]. Причины бифуркации токового слоя, а также источник волн и вертикальных движений слоя пока неизвестны. Возможный кандидат на эту роль — пересоединение силовых линий магнитного поля, происходящее в хвосте магнитосферы.

Другая модель, развиваемая российскими учеными, предполагает накопление ионов, захватываемых в окрестности токового слоя, за счет хаотического рассеяния. При этом ток захваченных частиц направлен противоположно основному току в слое и может привести к его уменьшению в центре (т.е. к бифуркации) [5].

Как пересоединяются магнитные силовые линии

Пересоединение силовых линий магнитного поля в настоящее время считается основным процессом превращения энергии, происходящим во всех космических объектах, которые обладают магнитным полем (в солнечной короне, в магнитосферах планет, в астрофизических объектах). Благодаря пересоединению силовых линий энергия магнитного поля высвобождается и трансформируется в энергию плазмы, поэтому наблюдаемым результатом пересоединения оказывается нагрев и ускорение заряженных частиц. Выше мы говорили о пересоединении на дневной стороне земной магнитосферы, в результате чего плазма солнечного ветра проникает внутрь магнитосферы. Предполагается, что оно имеет место также и в токовом слое хвоста магнитосферы, по крайней мере в ближайших к Земле областях, и служит начальным этапом развития суббурь.

Теория предсказывает ряд признаков, по которым можно судить о наличии магнитного пересоединения. Пересекая линию, проходящую через его область (так называемую X-линию), наблюдатель должен видеть смену знака B_z -компоненты магнитного поля и изменение направления движения потока плазмы, ускоренного в результате пересоединения. Еще один безусловный признак магнитного пересоединения — специфическое

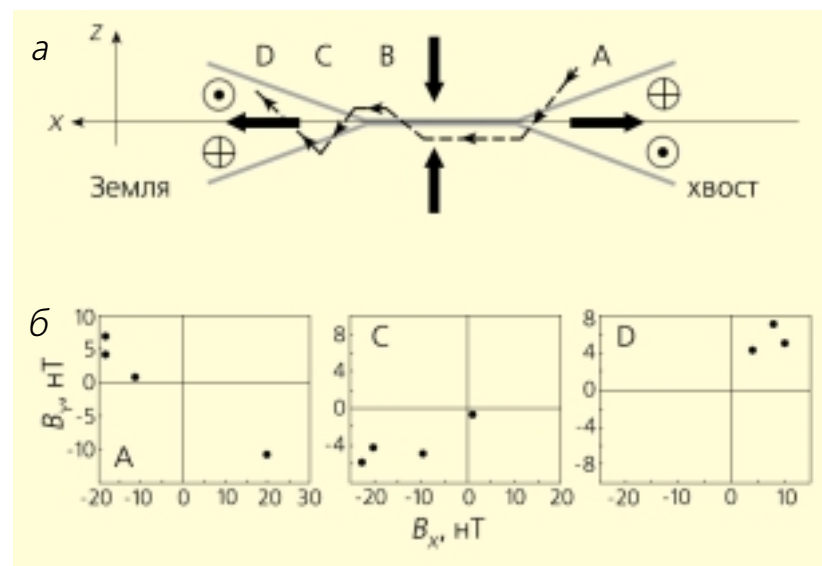


Рис.9. Схема пересоединения силовых линий магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли [6] (а). На схеме кружками (пустыми и с крестом) показано квадрупольное распределение V_y -компоненты магнитного поля (поле направлено на наблюдателя или от наблюдателя) в окрестности X-линии, сформированное в результате эффекта Холла. Штриховой линией показана траектория «Cluster». Измерения четырьмя спутниками «Cluster» компонент V_y и V_x магнитного поля в области пересоединения для трех (A, C, D) пересечений квартетом «Cluster» нейтральной плоскости (б). Видно, что при пересечении нейтральной плоскости ($V_x = 0$) знак V_y меняется на противоположный.

(квадрупольное) распределение знаков компоненты V_y магнитного поля вокруг X-линии (рис.9). Такое распределение обусловлено эффектом Холла, который состоит в следующем. При пересоединении радиус кривизны силовых линий уменьшается настолько, что становится сравнимым с гирорадиусом ионов. В этом случае ослабляется влияние магнитного поля на движение ионов: ионы «размагничиваются», т.е. перестают двигаться вдоль силовых линий поля, и их движение становится хаотичным. Зато электроны, чей гирорадиус в 40–50 раз меньше ионного, «размагничиваются» позднее и могут дрейфовать почти до центра токового слоя. В результате возникает пространственная область с размерами порядка ларморовского радиуса ионов, в которой движение ионов и электронов происходит в принципиально различных режимах. Образующееся при этом пространственное разделение зарядов создает электрическое поле, направленное к нейтральной плоскости, в котором электроны дрейфуют и образуют холловскую систему токов. Благодаря последней и формируется квадрупольное распределение V_y вокруг области пересоединения.

Очевидно, что магнитное пересоединение очень трудно наблюдать экспериментально, особенно если измерения производятся одним спут-

ником. Квартету «Cluster-2» впервые удалось обнаружить признаки пересоединения в ближнем токовом слое геомагнитного хвоста [6]. При последовательном пересечении нейтральной плоскости четырьмя спутниками была зарегистрирована смена направления движения потока ускоренной плазмы, который вначале двигался из хвоста к Земле, а затем стал двигаться от Земли в хвост. Изменение направления движения плазмы сопровождалось изменением радиуса кривизны силовых линий магнитного поля. Все эти признаки указывали на то, что квартет спутников оказался в области X-линии. Токовый слой в это время был очень тонким (толщина ~500 км), и в распределении плотности тока наблюдалась выраженная бифуркация. Изменения компоненты B_y , зафиксированные четырьмя спутниками, в точности соответствовали изменениям, характерным для эффекта Холла.

«Реки» и «ручейки» энергии на границе плазменного слоя

Как мы уже обсуждали выше, магнитосфера Земли способна «перерабатывать» энергию, переносимую от Солнца потоками солнечного ветра, перед этим накапливая ее в хвосте. Иначе говоря, хвост магнитосферы — своего рода гигантский магнитоплазменный резервуар, способный в течение некоторого времени удерживать эту энергию в магнитной форме. Рано или поздно избыток накопленной энергии высвобождается, переходя в тепловую и механическую энергию плазмы, т.е. вызывая ее нагрев и ускорение. Сначала считалось, что энергия, запасенная в хвосте, может высвободиться лишь взрывообразно, порождая магнитные суббури и бури. Однако многочисленные исследования прошедших десятилетий установили, что хвост всегда «живет бурной жизнью» и никогда не находится в спокойном состоянии. В нем все время, даже в абсолютно спокойные геомагнитные периоды, протекают динамические процессы, которые связаны с высвобождением небольших порций энергии. Этой энергии недостаточно, чтобы вызвать магнитосферную суббурю (глобальное изменение магнитной топологии хвоста и мощное ускорение плазмы), но вполне хватает, чтобы ускорить небольшие порции заряженных частиц до значительных скоростей. Так, ионы солнечного ветра, проникающие внутрь магнитосферы, ускоряются в токовом слое геомагнитного хвоста до скоростей, в десятки раз превышающих их начальные скорости. Загадка такого необычайно эффективного ускорения плазмы, происходящего без каких-либо заметных изменений в магнитной конфигурации хвоста, уже в течение нескольких десятилетий стимулирует многочисленные теоретические и экспериментальные исследования.

В конце 80-х годов стало ясно, что ускорение ионов в токовом слое хвоста должно происходить вблизи сепаратрисы, которая разделяет два полупространства с различной топологией магнитного поля — с замкнутыми и открытыми силовыми линиями. Замкнутые силовые линии магнитного поля пересекают токовый слой; они населены горячей плазмой, называемой плазменным слоем. Силовые линии высокоширотной части хвоста открыты: один их конец связан с ионосферой, а другой находится в солнечном ветре. На таких силовых линиях плазма не удерживается и, действительно, эксперименты показывают, что плазменные потоки в этих областях регистрируются достаточно редко. Однако узкая область, которая расположена вдоль границы, разделяющей высокоширотную часть хвоста и плазменный слой, наоборот, почти всегда заполнена движущейся плазмой. В эту область попадают ускоренные в токовом слое вблизи сепаратрисы ионы, которые затем быстро движутся к Земле. Эта переходная область, которая фактически разделяет два полупространства с различными плазменными режимами, была названа пограничной областью плазменного слоя (рис.1). Вначале ученые полагали, что появление потоков ускоренной плазмы на границе плазменного слоя связано с развитием суббурь, т.е. пограничная область формируется только во время активных периодов. Позднее, благодаря многочисленным наблюдениям космических аппаратов «ISEE-1, -2», стало ясно, что данная область существует постоянно, так как наблюдается и в течение длительных спокойных периодов. Движущиеся в ней потоки ускоренных ионов переносят энергию из дальних областей хвоста в околоземную часть магнитосферы (их можно представить себе в виде «рек энергии», текущих из хвоста к Земле). Изучение пространственной структуры и характеристик этих «посланцев» из удаленных от Земли областей магнитосферы позволяет понять, какие процессы происходят в местах их рождения, и насколько существен их вклад в глобальную динамику хвоста, в частности, в процесс развития магнитосферных суббурь. После открытия пограничной области плазменного слоя усилия теоретиков были направлены на поиск источников ускорения ионов в магнитосферном хвосте. Первым на роль такого источника было выбрано крупномасштабное магнитогидродинамическое пересоединение, так называемое пересоединение Петчека, и, соответственно, генерируемые им потоки ускоренной плазмы, которые затем коллимируются вблизи границы плазменного слоя, тоже считались крупномасштабными. В начале 90-х годов на основе крупномасштабной кинетической модели было выполнено численное моделирование ускорительных процессов в дальних областях хвоста. Из результатов следовало, что потоки ускоренных ионов, движущиеся в пограничной области плазменного слоя,

ФИЗИКА

не могут быть крупномасштабными структурами, а должны представлять собой совокупность множества разделенных в пространстве, узких ионных пучков («ручейков энергии»), скорость которых должна увеличиваться с ростом высоты их наблюдения над нейтральным слоем [7]. Эти ионные пучки были названы бимлетами (от англ. слова «beamlet» — набор пучков). По мере усовершенствования техники измерений (увеличивалось временное разрешение приборов) предсказанное теорией существование мелкомасштабных ионных пучков вблизи границы плазменного слоя получало все новые и новые подтверждения: их дали многочисленные наблюдения, выполненные на спутниках «Aureol-3», «Geotail», «Интербол-1, -2» в хвосте и в авроральной области, куда высыпаются движущиеся из хвоста ионы. Причем в ионных потоках, высыпающихся вблизи высокоширотной границы полярного овала (куда проектируется пограничная область плазменного слоя), наблюдалась дисперсия по энергиям в точном соответствии с теорией: более энергичные ионы регистрировались на более высоких широтах (т.е. на больших высотах над нейтральным слоем), чем менее энергичные ионы [8]. Позднее спутники «Cluster-2», производящие измерения с высоким временным разрешением, обнаружили существование еще более мелких субструктур внутри этих дисперсионных ионных потоков [9]. Движущиеся из хвоста потоки ионов достигают Земли и «высыпаются» на краю полярного овала, внося вклад в полярные сияния, ухудшая качество радиосвязи в полярных районах, затрудняя работу приборов на спутниках и атмосферных зондах и т.д. Итак, «безобидным» на первый взгляд ионным потокам и составляющим их более мелким пучкам (бимлетам) принадлежит одна из (возможно, значительных) ролей в совокупности явлений, называемых «космической погодой», которые, хоть и происходят в космическом пространстве, тем не менее, наряду с атмосферной погодой, существенно сказываются на нашей повседневной жизни.

Как формируются бимлеты

Крупномасштабное гидродинамическое пересоединение, скорее всего, не может быть источником бимлетов — мелкомасштабных локализованных структур. Какой же тогда процесс может ускорить ионы до больших скоростей и одновременно обеспечить мелкомасштабность пучков, наблюдаемых в пограничной области плазменного слоя? На эту роль может претендовать процесс неадиабатического ускорения ионов в токовом слое в дальних областях магнитосферного хвоста. Там из-за малости величины магнитного поля движение ионов, попадающих в токовый слой, уже не контролируется магнитным полем (т.е. становится неадиабатическим): ионы больше не дви-

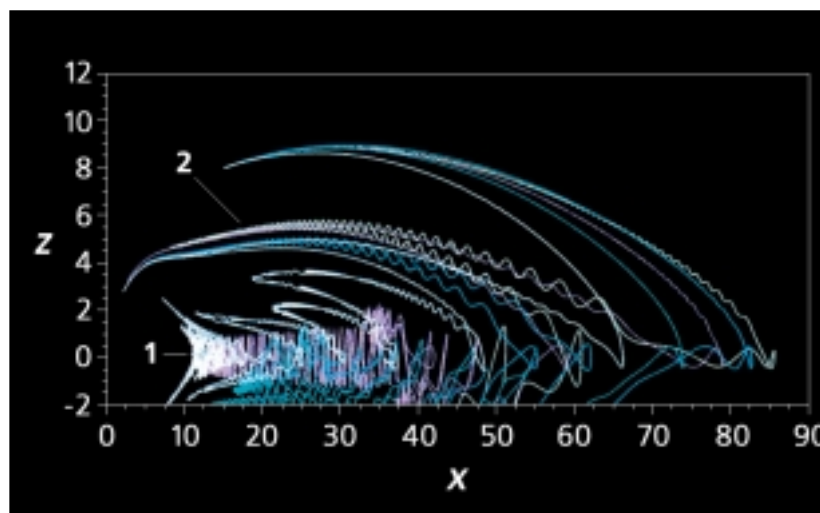


Рис.10. Траектории, рассчитанные в крупномасштабном кинетическом моделировании движения ионов в дальних областях хвоста магнитосферы [7]. После взаимодействия с токовым слоем ионы могут испытать сильное рассеяние и быть захвачены внутри токового слоя — такие ионы участвуют в формировании токового и плазменного слоев (1), или быть ускорены вдоль силовых линий магнитного поля, вылететь из токового слоя и, образуя пучки (бимлеты), быстро двигаться к Земле в пограничной области плазменного слоя (2). Показано сечение хвоста в плоскости XZ, единица измерения координат — радиус Земли.

жуются вдоль силовых линий магнитного поля, а могут существенно смещаться поперек них — вдоль крупномасштабного электрического поля, направленного поперек хвоста (с утра на вечер), приобретая при этом заметную величину энергии вплоть до нескольких десятков килоэлектронвольт. Причем в зависимости от локальных условий в области взаимодействия с токовым слоем ионы либо испытывают сильное рассеяние и остаются внутри слоя, либо приобретают кинетическую энергию направленного движения вдоль магнитного поля. Такие ионы вылетают из токового слоя в пограничную область плазменного слоя и формируют в ней быстро движущиеся к Земле бимлеты (рис.10) [7]. Логично предположить, что условия, необходимые для генерации бимлетов, в данный момент времени реализуются не всюду в токовом слое, а лишь в пространственно ограниченных областях, и выполняются только в течение какого-то ограниченного времени. Тем не менее, экспериментальных доказательств в пользу ограниченного размера областей ускорения бимлетов и оценок времени их генерации в токовом слое до сих пор не удавалось получить, хотя пучки ионов активно исследовались предыдущими миссиями, в частности, спутниками «Интербол-1, -2». О том, что бимлеты локализованы в пространстве, можно было судить лишь по длительности их наблюдения, которая была очень небольшой: 1–2 мин. Однако, так как все исследова-

ния, как правило, производились одним спутником, нельзя было ответить на вопрос, чем обусловлено короткое время наблюдения этих интереснейших явлений. Тем ли, что генерация бимлетов в хвосте происходит практически мгновенно (т.е. они являются временными структурами), либо тем, что бимлеты в первую очередь локализованы в пространстве, но из-за постоянных колебательных «размахиваний» границы плазменного слоя (так называемый флэппинг) спутник «видит» бимлет лишь в течение нескольких коротких интервалов времени (так как то входит, то выходит из пограничной области в «болтающемся» хвосте)? В пользу последнего предположения свидетельствует тот факт, что внутри бимлета не отмечена дисперсия частиц по времени прихода, или, как ее обычно называют, дисперсия по скоростям: ионы с разными энергиями регистрируются практически одновременно. Если бы генерация ионных пучков происходила мгновенно (т.е. природа явления была бы временной), такая дисперсия обязательно бы возникла: сначала детектора достигли бы более быстрые ионы, затем более медленные. Отсутствие дисперсии можно объяснить лишь тем, что источник генерации бимлетов работает, по крайней мере, в течение такого интервала времени, который достаточен для того, чтобы быстрые ионы, вышедшие из источника позднее, «догнали» самые медленные ионы, вышедшие из источника раньше.

Данные наблюдений спутниками «Cluster-2» добавили уверенности, что бимлеты представляют собой пространственные структуры. Как выяснилось (рис.11,а), на самом деле время наблюдения бимлета превышает 2 мин: на одном отдельно взятом аппарате бимлет действительно наблюдается 1–2 мин, но если аппаратов несколько, видно, что он поочередно регистрируется то одним, то другим спутником. Многоспутниковые измерения позволили изучить довольно сложную пространственную структуру бимлета и определить его характерные размеры. Ранее предполагалось, что бимлеты вытянуты вдоль почти прямолинейных силовых линий магнитного поля. Однако оказалось, что силовые линии магнитного поля, вдоль которых распространяется бимлет, искривлены в пространстве в горизонтальной плоскости (XY) и представляют собой «змейку» (рис.11,б), причем продольный размер бимлета (размер вдоль магнитного поля) в сотни раз превышает его поперечный размер. Искривление силовых линий, «содержащих» бимлет, вызвано развитием шланговой неустойчивости, которая возникает в плазменной структуре, если скорость потока вдоль магнитного поля намного превышает его скорость поперек поля. Сущность этого явления легко понять, если представить себе шланг с большим напором воды (отсюда и название неустойчивости). Такой шланг очень трудно удержать в руках, а если бросить его на газон, он начнет из-

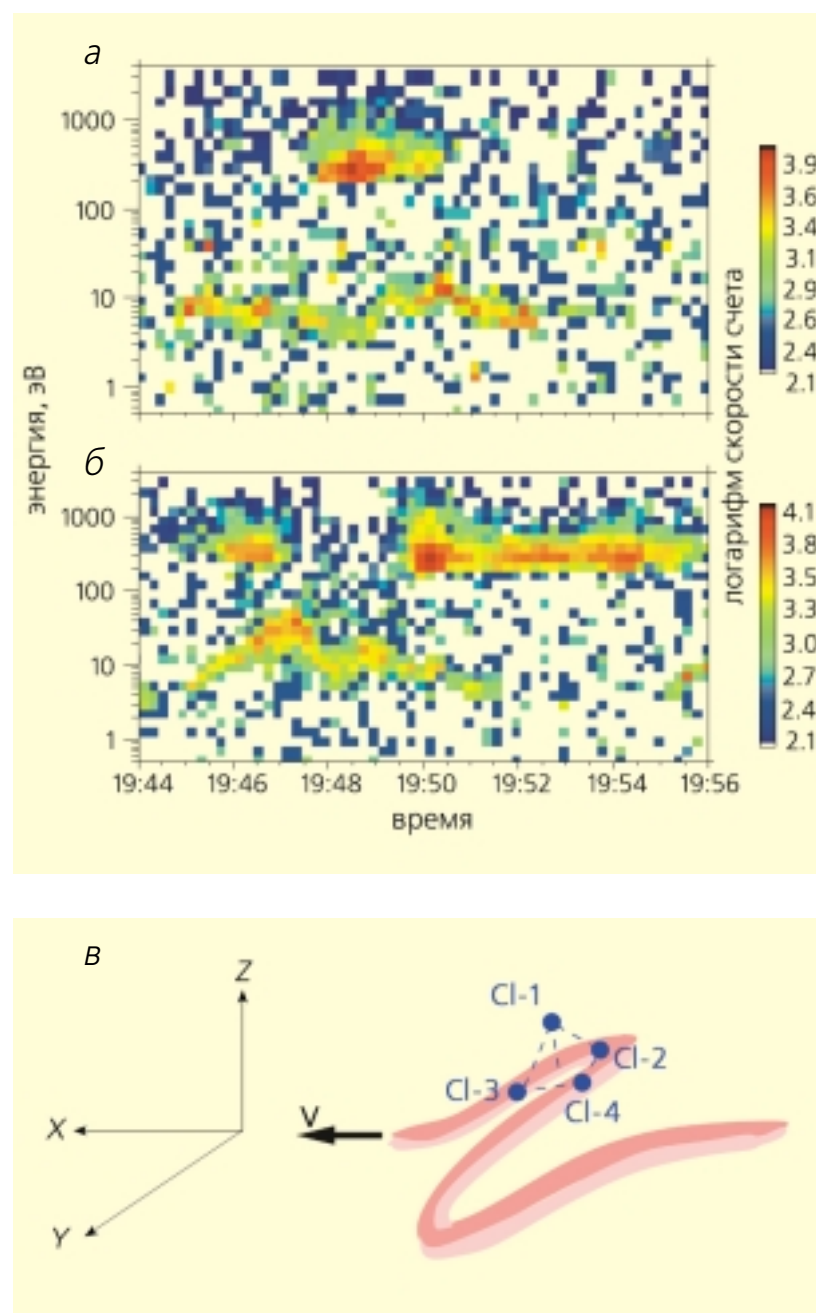


Рис.11. Спектрограммы ионов, движущихся к Земле из геомагнитного хвоста, измеренные спутниками CI-1 (а), CI-3 (б). Скорость счета в детекторах показана цветом согласно шкале, представленной в правой части рисунка. Бимлет наблюдался в виде всплеска высокоэнергичных ионов (с энергиями до 10^4 эВ) спутниками CI-4 (не показано на рисунке) и CI-3 в 19 ч 45 мин 30 с — 19 ч 47 мин, спутником CI-1 в 19 ч 47 мин 30 с — 19 ч 50 мин и вновь спутниками CI-4 и CI-3 в 19 ч 49 мин 30 с — 19 ч 56 мин. Иллюстрация пространственной геометрии бимлета, движущегося к Земле со скоростью V и пересекающего тетраэдр «Cluster»(в).

виваться. Именно так и выглядит бимлет, только вместо воды у нас есть быстро движущаяся плазма, а вместо газона — плазменный слой, по границе которого движется бимлет. Причем шланговая неустойчивость в бимлете возникает сразу же при выходе ионов из токового слоя в дальних областях хвоста, так как условия для ее возникновения предпочтительнее вдали от Земли, чем вблизи (где мы наблюдаем бимлет). Таким образом, вырисовывается следующая картина процесса ускоре-

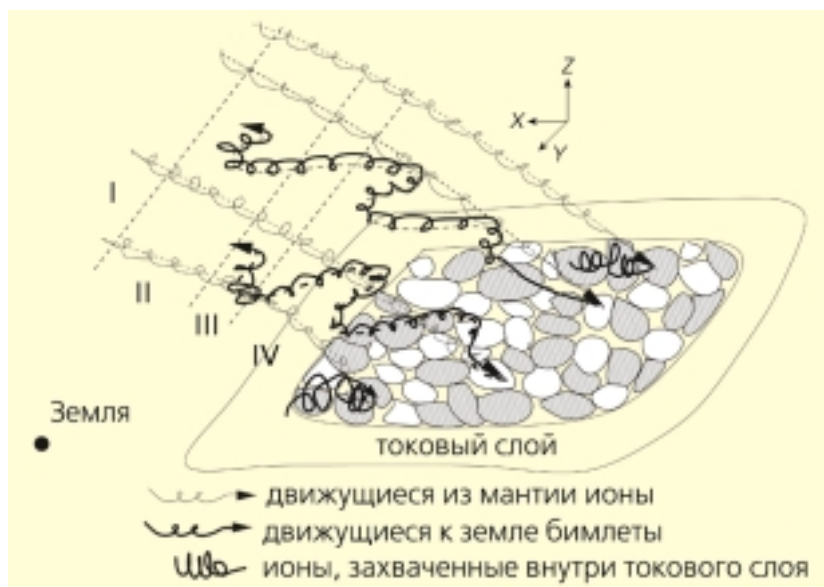


Рис. 12. Сценарий генерации бимлетов в токовом слое хвоста магнитосферы Земли. С точки зрения процессов превращения энергии, токовый слой не однороден, а состоит из перемежающихся областей повышенного рассеяния ионов (заштрихованные овалы) и областей импульсного ускорения плазмы (белые овалы). Причем деление на эти области не стационарно, картина все время меняется — то в одной, то в другой части токового слоя вспыхивают новые или распадаются старые области импульсного ускорения бимлетов. Римскими цифрами показаны области магнитосферы: I — мантия; II — высокоширотная часть хвоста; III — пограничная область плазменного слоя; IV — плазменный слой.

ния ионов в токовом слое геомагнитного хвоста. Ионы ускоряются в пространственно ограниченных областях, размер которых не превышает нескольких тысяч км (маленький поперечный размер бимлетов доказывает этот факт), процесс ус-

корения длится около 10 мин. В результате при выходе бимлета из токового слоя в высокоширотные доли хвоста в силовых трубках магнитного поля, заполненных «бимлетной» плазмой, возникает шланговая неустойчивость, которая делает их похожими на колеблющуюся струну. Образно бимлеты можно представить в виде змейки, вытянутой вдоль силовых линий магнитного поля (рис.12) [10].

* * *

Первоначально был установлен пятилетний срок работы спутников «Cluster-2». Окончание миссии запланировано на декабрь 2005 г., но есть большая вероятность, что проект будет продлен еще на несколько лет. С каждым годом российские ученые все активнее включаются в совместные с европейскими исследователями работы по анализу данных «Cluster-2». Кроме того, в Европе, Америке и Японии готовятся к старту новые спутниковые миссии: «Swarm» («Стая»), MMS (Magnetospheric MultiScale mission — Многомасштабная магнитосферная миссия), обсуждается подобный проект «Рой» и в России. Все эти проекты продолжают линию многозондовых исследований околоземного космического пространства, столь успешно развивающуюся в последние десятилетия благодаря спутникам «Интербол» и «Cluster». ■

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. Glassmeier K.-H., Motchmann U., Dunlop M. et al. // *Annales Geophysicae*. 2001. V.19. P.1439-1447.
2. Newell P.T. // *Nature*. 2003. V.424. P.734.
3. Nakamura R., Baumjohann W., Runov A., et al. // *Geophysical Research Letters*. 2002. V.29. №23. P.2140-2144.
4. Runov A., Nakamura R., Baumjohann W. et al. // *Geophysical Research Letters*. 2003. V.30. №2. P.1036-1040.
5. Зеленый Л.М., Малова Х.В., Попов В.Ю. // *Письма в ЖЭТФ*. 2003. Т.78. Вып.5. С.742.
6. Runov A., Nakamura R., Baumjohann W. et al. // *Geophysical Research Letters*. 2003. V.30. №11. P.1579-1583.
7. Ashour-Abdalla M., Berchem J.P., Buchner J., Zelenyi L.M. // *Journal Geophysical Research*. 1993. V.98. P.5651-5676.
8. Zelenyi L.M., Kovrazhkin R.A., Bosqued J.M. // *Journal Geophysical Research*. 1990. V.95. P.12119-12139.
9. Sauvaud J.-A., Kovrazhkin R.A. // *Journal Geophysical Research*. 2004. V.109. P.12213-12230.
10. Зеленый Л.М., Григоренко Е.Е., Федоров А.О. // *Письма в ЖЭТФ*. 2004. Т.80. Вып.10. С.771.