

НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

10 1974

СЕРИЯ
КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

И.М. Подгорный
АКТИВНЫЕ
ЭКСПЕРИМЕНТЫ
В КОСМОСЕ



И. М. Подгорный,
доктор физико-математических наук

**АКТИВНЫЕ
ЭКСПЕРИМЕНТЫ
В КОСМОСЕ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1974

Подгорный И. М.

П44 Активные эксперименты в космосе. М., «Знание», 1974.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Космонавтика, астрономия», 10. Издается ежемесячно с 1971 г.)

Космическое пространство является уникальной лабораторией для изучения различных физических явлений. Используя потоки плазмы и пучки заряженных частиц, можно активно вмешиваться в жизнь магнитосферы, вызывая по команде с Земли различные геофизические явления. С другой стороны, активное вмешательство в происходящие в магнитосфере явления удобнее всего осуществить в лабораторном эксперименте с искусственной магнитосферой.

В данной брошюре популярно описаны различные активные эксперименты в магнитосфере, включая лабораторные исследования.

П 20605—171
073(02)—74 61—74

525

СОДЕРЖАНИЕ

Плазма в магнитном поле	4
Барьерные облака	10
Эксперименты со сгустками плазмы высокой концентрации	14
Потоки плазмы в магнитосфере	21
Зондирование магнитосферы пучками заряженных частиц	28
Вынужденное высыпание частиц из радиационных поясов	38
Эксперименты с искусственной магнитосферой	44
Заключение	61

Игорь Максимович Подгорный

АКТИВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В КОСМОСЕ

Редактор *Е. Ю. Ермаков*. Обложка *Н. И. Василевской*. Худож. редактор *В. Н. Конюхов*. Техн. редактор *И. Г. Федотова*. Корректор *И. Л. Казеко*.

А 11102. Индекс заказа 44210. Сдано в набор 17/VII 1974 г. Подписано к печати 12/IX 1974 г. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл.-печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,20. Тираж 56 380 экз. Издательство «Знание». 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 3/4. Заказ 1337. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Цена 10 коп.

© Издательство «Знание», 1974 г.

В течение долголетней истории развития науки о космосе информация об исследуемых объектах получалась исключительно путем наблюдений. Этим космическая наука отличалась от других наук, где главную роль, как правило, играет эксперимент, т. е. активное воздействие на протекание естественных физических процессов. Переход от наблюдений к эксперименту часто приводит к научным открытиям и изменению наших старых взглядов на то или иное явление. Так, например, все наши представления об атомном ядре основаны на экспериментах по взаимодействию быстрых частиц с ядрами, начало которым положил знаменитый опыт Э. Резерфорда. Никакие тщательные наблюдения радиоактивного распада или масс-спектроскопические измерения не позволили бы даже приближенно подойти к современным моделям атомного ядра.

До запуска первых искусственных спутников Земли ситуация в космической физике была аналогична ситуации в науке о строении вещества до опыта Э. Резерфорда. Положение коренным образом не изменилось и после первых полетов космических аппаратов. Приборы, установленные на спутниках и ракетах, позволили измерять характеристики пространства в данной точке, но методы оставались пассивными, т. е. эффекты, связанные с возмущением среды, по-существу, не изучались.

В настоящее время активные эксперименты развиваются в основном по пути создания в магнитосфере плазменных образований различных типов и изучения влияния этих образований на геомагнитное поле (высыпание частиц, вызывающее искусственные полярные сияния, и развитие других геофизических явлений). Ряд экспериментов в космосе уже выполнен, другие находятся в стадии подготовки или обсуждения. Прежде чем перейти к их рассмотрению, остановимся кратко на некоторых общезначимых вопросах, необходимых для понимания происходящих в магнитосфере процессов.

Плазма в магнитном поле

Магнитосфера Земли заполнена плазмой, и поэтому основными законами, управляющими процессами в околоземном космическом пространстве, являются законы физики плазмы. Плазму часто называют четвертым состоянием вещества, так как ее свойства отличаются от свойств газов, жидкостей и твердых тел. Более всего плазма похожа на газ, но ее нельзя отождествить с газом ионизованных частиц. В обычном газе взаимодействие между частицами происходит только кратковременно, когда они подлетают друг к другу на малое расстояние. Остальное время частица газа движется прямолинейно, не ощущая поля других частиц. В плазме каждая заряженная частица взаимодействует непрерывно сразу с полями многих окружающих ее частиц, и траектория частицы все время меняет свою кривизну. Такой характер движения обусловлен дальнодействием кулоновских сил (потенциал заряженной частицы убывает обратно пропорционально расстоянию от нее). Для того чтобы ионизованный газ приобрел свойства единого целого, связанного самосогласованными электрическими полями, необходимо, чтобы радиус сферы, занимаемый ионизованными частицами, превысил некоторое критическое значение, называемое дебаевским радиусом λ_D . Это значение зависит от концентрации заряженных частиц n и температуры T и определяет максимальное расстояние, на которое могут быть разнесены положительные (ионы) и отрицательные (электроны) частицы за счет теплового движения:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\kappa T}{4\pi n e^2}}$$

Если ввести в плазму посторонний заряд, то ее заряженные частицы перегруппируются таким образом, что электрическое поле введенного заряда будет полностью скомпенсировано на расстоянии, большем дебаевского радиуса.

Несмотря на то что частицы плазмы связаны между собой самосогласованным полем, иногда для анализа поведения плазмы достаточно проследить траекторию отдельной заряженной частицы во внешних электромагнитных полях. Такой метод изучения плазмы носит название одночастичного приближения. Одночастичное приближение справедливо тогда, когда движение ионов и электронов во внешних полях не приводит к накоплению частиц одного знака в определенных участках пространства. Или, как говорят, не создаются электрические поля поляризации.

Рассмотрим наиболее типичные случаи движения заряженных частиц в комбинированных электрическом E и магнитном B полях. На частицу, находящуюся в однородном магнитном поле, действует сила

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{v} \times B/c,$$

перпендикулярная скорости частицы и направлению магнитных силовых линий. Движение под действием силы $\mathbf{F}_m$ можно разделить на два независимых движения: поступательное движение с постоянной скоростью $v_{\parallel}$ вдоль силовой линии и вращательное движение по окружности радиуса $\varrho = mv_{\perp} c/eB$ («ларморовский» радиус). Здесь m и e — соответственно масса и заряд частиц, $v_{\perp}$ — составляющая скорости, перпендикулярная магнитным силовым линиям. Период T_m — обращение частицы вокруг силовой линии — зависит только от напряженности магнитного поля:

$$T_m = \frac{2\pi mc}{eB}.$$

Таким образом, в постоянном и однородном магнитном поле частица движется по спирали, ось которой совпадает с силовой линией, и перемещение частиц поперек силовых линий происходит только за счет столкновений.

Замечательной особенностью поведения частицы

В магнитном поле является сохранение величины $\mu = mv_{\perp}^2 / 2B$, т. е. отношения энергии вращательного движения к напряженности магнитного поля. С другой стороны: μ — магнитный момент кольцевого тока, возникающего при движении частицы по окружности в магнитном поле. Магнитный момент μ часто называют адиабатическим инвариантом. Адиабатический инвариант не сохраняется в случае очень быстрых изменений поля по сравнению с T_m или при наличии значительных неоднородностей поля на расстоянии порядка ларморовского радиуса.

Из сохранения адиабатического инварианта следует, что частицу в магнитном поле можно рассматривать как магнитный диполь, обладающий скоростью $v_{\parallel}$, направленной вдоль силовых линий. Как известно, на диполь в магнитном поле действует сила, пропорциональная скалярному произведению магнитного момента на градиент поля и выталкивающая его из области сильного поля. Попробуем представить себе, как ведет себя частица в магнитном поле Земли, если ее адиабатический инвариант сохраняется. На рис. 1 изображены

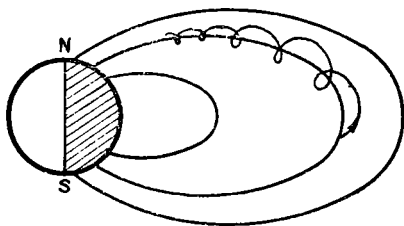


Рис. 1. Часть траектории заряженной частицы в магнитном поле Земли. По мере приближения частицы к полюсу она движется во все более и более сильном поле. Энергия ее вращательного движения возрастает, а поступательного — уменьшается. При определенном значении напряженности магнитного поля частица отражается и начинает двигаться обратно

магнитные силовые линии Земли на не очень больших от нее расстояниях, где поле еще заметно не искажено солнечным ветром. Там же показана траектория заряженной частицы, движущейся вдоль силовой линии от

плоскости экватора к полюсу. По мере приближения к полюсу частица движется во все более и более сильном поле (силовые линии сгущаются), и ее направленная скорость уменьшается благодаря непрерывно действующей выталкивающей силе.

При определенном значении напряженности магнитного поля, зависящем только от отношения $v_{\parallel}/v_{\perp}$, частица остановится, а затем начнет двигаться в противоположном направлении. Достигнув области сильного поля у другого полюса, частица вновь отразится. Двигаясь между областями сильного поля, частица оказывается запертой, как в ловушке. Именно таким образом удерживаются быстрые заряженные частицы в магнитосфере Земли, образуя известный радиационный пояс.

Рассмотрим теперь, к чему приведет неоднородность магнитного поля в направлении, перпендикулярном силовым линиям. Частица в этом случае движется по сложной траектории, дрейфуя в направлении, перпендикулярном как силовым линиям, так и градиенту магнитного поля. Характер дрейфового движения понятен из рис. 2. Силовые линии магнитного поля перпендикуляр-

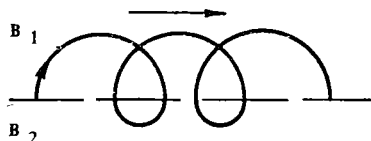


Рис. 2. Траектория движения частицы поперек неоднородного магнитного поля. Пунктиром показана граница слабого B_1 и сильного B_2 полей. Силовые линии направлены перпендикулярно плоскости чертежа

ны плоскости чертежа. Вместо плавного изменения поля на рисунке представлена идеализированная картина с резкой границей (пунктир) между слабым B_1 и сильным B_2 магнитными полями. В слабом магнитном поле заряженная частица движется по окружности большого радиуса. Пересекая границу, она попадает в сильное поле. Здесь радиус кривизны траектории частицы мал. Последовательно пересекая границу полей B_1 и B_2 и двигаясь часть времени в сильном поле, а часть — в слабом, частица дрейфует вдоль границы. Если вместо

резкой границы имеет место постепенное увеличение поля, то радиус кривизны траектории плавно меняется, но характер дрейфового движения остается таким же. Напряженность магнитного поля Земли уменьшается с увеличением расстояния, следовательно, частицы дрейфуют вокруг ее магнитной оси. Дрейф в неоднородном поле накладывается на колебательное движение частицы, отражающейся от областей сильных полей.

Сила, действующая на заряженную частицу в магнитном поле, зависит от заряда частицы, следовательно, положительные и отрицательные частицы дрейфуют в различных направлениях. Различное направление дрейфа, вообще говоря, может привести к изменению распределения зарядов, а следовательно, к появлению электрического поля. Дрейф вокруг магнитной оси Земли электронов и положительно заряженных ионов не приводит к разделению зарядов. Все заряды одновременно вращаются вокруг оси. Электроны в одну сторону, а ионы в другую, и нигде не образуется избыток заряда одного знака. Таким образом, законность использования одночастичного приближения для анализа поведения частиц в радиационных поясах очевидна.

Поляризационные эффекты отчетливо проявляются в ограниченном сгустке плазмы, помещенном в неоднородном магнитном поле. Дрейфуя в различных направлениях, электроны и ионы накапливаются на противоположных границах плазмы. По мере накопления зарядов электрическое поле возрастает и начинает оказывать влияние на траектории электронов и ионов. Дальнейшее движение частиц происходит в самосогласованном поле, и одночастичное приближение становится неприменимым. Однако даже для этого случая можно качественно предсказать поведение сгустка. Проследивая траектории частиц, нетрудно убедиться, что направление поляризационного электрического поля таково, что дрейф в «скрещенных» электрическом и магнитном полях приводит к движению ионов и электронов в сторону слабого поля. Более строгое рассмотрение показывает, что сгусток плазмы ведет себя подобно диамагнетику и выталкивается из области сильного магнитного поля.

Если плазма находится одновременно в магнитном и электрическом полях, силовые линии которых перпендикулярны друг другу, то возникает дрейф в направле-

нии, перпендикулярном силовым линиям обоих полей. Частицы дрейфуют со скоростью $v_D = cE/B$. Характер дрейфовых траекторий для этого случая показан на рис. 3. Силовые линии магнитного поля направлены перпендикулярно плоскости чертежа. Замечательной особенностью дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях является независимость дрейфовой скорости от заряда и массы частицы. Вся плазма, как единое целое, движется со скоростью v_D , и разделения зарядов не происходит.

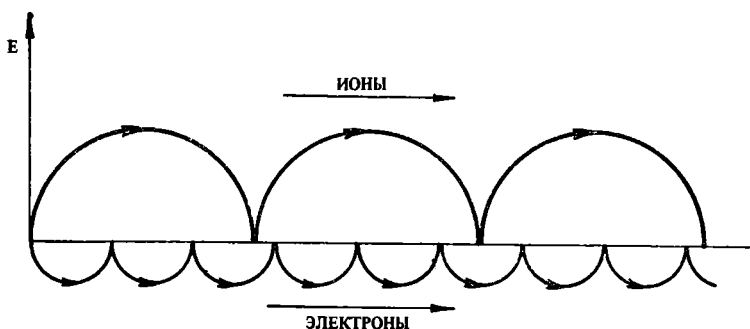


Рис. 3. Движение иона и электрона в скрещенных магнитном и электрическом полях. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости чертежа. Электроны и ионы дрейфуют в одном направлении и с одинаковой скоростью

При рассмотрении различных явлений в магнитосфере Земли обычно считается, что силовые линии электрического поля перпендикулярны магнитному. Составляющая, параллельная магнитному полю, не может быть большой, так как свободное перемещение зарядов вдоль силовых линий магнитного поля приводит к быстрому выравниванию потенциала вдоль силовой линии. Долгое время эквипотенциальность магнитных силовых линий (т. е. когда вся силовая линия находится под одним и тем же потенциалом) считалась в геофизике бесспорной. В последние годы было показано, что быстрому выравниванию потенциала иногда мешают специфические плазменные процессы, но и они не могут, по-видимому, способствовать появлению больших разностей потенциала вдоль силовой линии.

Бариевые облака

Среди немногочисленных активных экспериментов, проведенных к настоящему времени в магнитосфере Земли, наибольшее распространение получили так называемые бариевые облака. Идея эксперимента состоит в создании в магнитосфере сгустка разреженной плазмы и наблюдении за его эволюцией по свечению ионов. Если сгусток плазмы имеет низкую концентрацию, а следовательно, газокинетическое давление в нем значительно меньше магнитного, то магнитное поле магнитосферы не претерпевает заметных искажений. Поведение заряженных частиц в плазме определяется двумя основными процессами: диффузией и дрейфом в электрическом и магнитном полях. Если температура плазмы низка, то скорость дрейфа в неоднородном магнитном поле можно не учитывать, поскольку она мала по сравнению со скоростью дрейфа в скрещенных магнитном и электрическом полях. Это вытекает из пропорциональности скорости дрейфа в неоднородном магнитном поле энергии частицы. При энергии электрона ~ 1 эВ, что примерно отвечает средней энергии в плазме с температурой $\sim 10\,000^\circ$, скорость этого дрейфа на небольших высотах составляет 0,1 см/сек. Температура плазмы в бариевых облаках никогда не достигает $10\,000^\circ$.

Электрическое поле в магнитосфере, как указывалось ранее, должно обладать явно выраженной анизотропией. Совместное действие электрического и магнитного полей, ориентированных перпендикулярно друг другу, вызывает дрейф заряженных частиц в направлении, перпендикулярном как $\mathbf{E}$, так и $\mathbf{B}$. Скорость электрического дрейфа всех частиц зависит только от напряженностей электрических и магнитных полей.

В связи с этим заметим, что скорости переноса электронов и ионов за счет электрического дрейфа могут быть различными из-за столкновения с нейтральными атомами, так как частота столкновений электронов и ионов с атомами не одинакова. Различие в скоростях частиц с различными зарядами означает появление электрического тока, перпендикулярного $\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}$. Это

так называемый ток Холла. При стационарных условиях и при отсутствии нейтральных атомов ток Холла отсутствует. Если барьерное облако плазмы образовано достаточно далеко от поверхности Земли, столкновения с нейтральными атомами чрезвычайно редки и не оказывают влияния на динамику облака.

Если известна напряженность магнитного поля, то, наблюдая за перемещением облака плазмы за счет электрического дрейфа, можно определить радиальную составляющую электрического поля. Перемещения сгустка плазмы чрезвычайно удобно изучать на фоне светящегося облака нейтрального газа, на которое электромагнитные силы не действуют.

Перпендикулярная составляющая поля в таком эксперименте не измеряется, так как непосредственно наблюдать за перемещением облака плазмы вдоль луча зрения невозможно. Для этой цели в принципе пригодна доплеровское смещение спектральных линий, пропорциональное радиальной скорости, но при реально существующих электрических полях это смещение слишком мало, и эффект Доплера в экспериментах с барьерными облаками не используется.

Если перемещение облака плазмы как целого позволяет измерять электрические поля в магнитосфере, то наблюдение за деформацией облака дает возможность определить направление магнитных силовых линий. Анизотропия диффузии плазмы приводит к отчетливому вытягиванию облака плазмы вдоль силовых линий магнитного поля. При низкой концентрации, когда столкновения между частицами чрезвычайно редки, разлет плазмы вдоль магнитного поля происходит с тепловыми скоростями частиц. Единственной причиной, препятствующей независимому движению ионов и электронов вдоль силовых линий, является электрическое поле поляризации, возникающее в связи с тем, что тепловая скорость электронов больше тепловой скорости ионов, и на границе облака плазмы образуется электрическое поле, ускоряющее ионы и тормозящее электроны. Однако при не очень высоких температурах электронов этот эффект не дает значительного вклада в ускорение ионов, и можно считать, что расширение плазмы вдоль поля определяется в основном тепловой скоростью ионов.

Что касается скорости расширения плазмы перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, то здесь ситуация существенно иная. Расширение разреженной плазмы в данном случае не происходит без столкновений, а учет столкновений приводит к довольно низкому коэффициенту диффузии. Одинокое столкновение может сместить частицу поперек поля не более чем на ларморовский радиус, и он приобретает как бы роль длины свободного пробега поперек поля. Вычисления показывают, что коэффициент диффузии плазмы поперек поля обратно пропорционален квадрату напряженности магнитного поля и квадратному корню из температуры. Резкая анизотропия распределения коэффициента диффузии приводит к вытягиванию сгустка плазмы вдоль поля, и он быстро приобретает веретенообразную форму, позволяя определить направление силовых линий.

Естественнее всего создать облако плазмы, испаряя в космическом пространстве цезий или литий, т. е. элементы с низким потенциалом ионизации. Тогда в результате фотоионизации излучением Солнца образуются ионы цезия или лития, наблюдения за которыми и позволяют измерять электрическое поле магнитосферы. Более подробное рассмотрение показывает, что литий и цезий малоприспособлены для подобных экспериментов. Наиболее яркие спектральные линии ионов щелочных металлов лежат в далекой ультрафиолетовой области и недоступны для наблюдения с Земли из-за сильного поглощения излучения этого диапазона спектра в атмосфере. Использование же специальных методов наблюдения, типа радиочастотного зондирования, делает эксперимент настолько громоздким, что возникает сомнение в рациональности его постановки.

Наиболее пригодным для экспериментов с плазменными облаками оказался барий. Имея значительно более высокий потенциал ионизации (5,21 эВ), чем для цезия (3,89 эВ), он тем не менее ионизируется излучением Солнца значительно быстрее. Причиной этого является существование очень низкого метастабильного уровня возбуждения, вследствие чего ионизация может происходить ступенчатым образом, путем последовательного поглощения двух квантов, принадлежащих к видимой области спектра. При поглощении первого кванта элек-

трон переходит на возбужденный уровень, а при поглощении второго электрон отрывается от атома. Среднее время ионизации бария составляет 19 с; для цезия оно равно 1000 с.

Резонансная линия нейтрального бария $\lambda = 5535 \text{ \AA}$ лежит в видимой области спектра и легко наблюдается. Наконец (и это является главным преимуществом), однократно ионизованный ион бария имеет яркую резонансную линию $4554 \text{ \AA}$, также лежащую в видимой области спектра. Последняя легко возбуждается за счет резонансного поглощения солнечного излучения, и ее интенсивность получается фантастически большой. Достаточно сказать, что при использовании обычного фотоаппарата каждый ион бария, возбуждаемый сплошным спектром Солнца, посылает на 1 см^2 поверхности фотопленки примерно один квант в секунду. Правда, световой поток ионизованного бария оказывается примерно на порядок величины меньшим из-за наличия в сплошном спектре линии поглощения (фраунгоферовой линии), также принадлежащей ионизованному барии. Но несмотря на наличие фраунгоферовой линии, поток излучения все равно оказывается настолько интенсивным, что при экспозиции в 1 с можно сфотографировать обычным фотоаппаратом бариевое облако, в котором на 1 см^2 приходится только 10^9 ионов.

Эксперименты с бариевыми облаками необходимо производить в то время, когда облако бария освещается лучами Солнца, однако солнечное излучение, рассеянное на молекулах воздуха, не попадает в объектив фотоаппарата. Такие условия возникают вскоре после захода Солнца или перед его восходом.

Для образования облака нейтрального бария, который затем ионизируется солнечным излучением, используется взрывчатая смесь окиси меди и бария. Бариевый заряд обычно выводится в заданную точку пространства с помощью ракеты и там взрывается. Основные измерения электрических полей с помощью бариевой плазмы выполнены на высоте в несколько сотен километров. Число отдельных измерений, выполненных в различных местах, настолько велико, что уже сейчас делаются попытки построения карты электрического поля. Типичные значения составляющей электрического поля, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля Зем-

ли, составляет $(1 - 3) \cdot 10^{-5}$ В/см. В зоне полярных сияний электрические поля больше примерно на порядок величины. Для ощущения масштаба измеряемых скоростей дрейфа бариевого облака заметим, что при напряженности магнитного поля 0,1 Гс и электрического 10^{-4} В/см скорость бариевого облака составляет 1 км/с.

Эксперименты со сгустками плазмы высокой концентрации

Возможность использования бариевых облаков не ограничивается измерениями электрических полей в магнитосфере и определением направления магнитных силовых линий. При измерении электрических полей необходимо работать с бариевой плазмой, не вносящей существенных искажений в естественное состояние электрических и магнитных полей. Это достигается использованием достаточно разреженной плазмы. Тепловая энергия бариевой плазмы, заключенная в единице объема, должна быть значительно меньше плотности энергии магнитного поля и плотности тепловой энергии магнитосферной плазмы. Конечно, концентрация бариевой плазмы не может быть и очень малой. В противном случае интенсивность ее свечения будет слишком слабой, чтобы вести наблюдение или фотографировать.

Поведение бариевого облака становится существенно иным, если тот же самый бариевый заряд, который используется в измерениях электрических полей, взорвать на высотах в несколько десятков тысяч километров от поверхности Земли. Поскольку магнитное поле Земли спадает в этом интервале расстояний примерно обратно пропорционально кубу расстояния, плотность энергии магнитного поля (напомним, что она пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля — $B^2/8\pi$) на больших расстояниях обычно становится меньше плотности тепловой энергии бариевого облака. Бариевый эксперимент на таких высотах приобретает совершенно новое содержание и носит характер активного, хотя и ограниченного по масштабу, воздействия на магнитосферу.

В совместном эксперименте НАСА (США) и Института им. Макса Планка (ФРГ) заряд смеси бария и окиси меди весом 16 кг был взорван на высоте 31 500 км. Заряд был выведен на ракете «Скаут» над Американским континентом вблизи экватора. Эксперименту предшествовали тщательные измерения состояния магнитосферы и наблюдения за облачным покровом Земли. Результаты этих измерений позволили выбрать подходящее время для экспериментов. Даже незначительная облачность могла помешать получению отчетливых фотографий, а изучение магнитных возмущений, вносимых бариевой плазмой, требовало спокойного состояния магнитосферы. Магнитная активность перед пуском ракеты и во время проведения всего эксперимента была невысокой.

Станции для визуального наблюдения и фотографирования бариевой плазмы были расположены на юге США, в Чили и Перу. У восточного побережья Америки работала специально подготовленная самолетная экспедиция. Разнесенная на тысячи километров сеть фотографической аппаратуры, работающая синхронно, позволила с высокой точностью фиксировать пространственную эволюцию бариевого облака.

Место эксперимента было выбрано так, чтобы силовая линия магнитного поля, проходящая через предполагаемую точку взрыва заряда, пересекала поверхность Земли в районе канадской геофизической обсерватории Грейт Вейл. Точность запуска ракеты и ее управление гарантировали прохождение этой силовой линии в пределах 100 км от обсерватории. Приборы обсерватории могли регистрировать возмущения магнитного поля, распространяющиеся вдоль силовых линий. Фотографическая аппаратура была готова сфотографировать свечение верхних слоев атмосферы из-за выпадения вдоль силовой линии быстрых частиц радиационного пояса Земли. Возможное влияние искусственных плазменных образований на поведение быстрых частиц, образующих радиационный пояс Земли, в настоящее время интенсивно изучается теоретиками. Направленные на изучение этого вопроса эксперименты излагаются в § 6.

Станции слежения были оснащены фоторегистрирующей аппаратурой с фокусным расстоянием 350 мм и светосилой 1:1. Была специально разработана телевизион-

ная установка с электронно-оптическим усилителем, снабженная светофильтром, выделяющим спектральную линию 4554 Å. Эта аппаратура позволяла разрешать детали размером в 6 км на расстоянии 31 500 км. Длительность экспозиции составляла 0,5 с или 0,03 с. Использовалось также сканирующее фотоэлектрическое устройство, последовательно измеряющее интенсивность свечения неба в различных точках. При потоке излучения $3 \cdot 10^4$ квантов в секунду на квадратный сантиметр сигнал на выходе составлял 1 В. Все эти технические подробности приводятся для того, чтобы читатель мог представить себе масштаб подготовительной работы, предшествующей эксперименту. Длительность самого эксперимента измеряется минутами. Управление экспериментом осуществлялось с помощью технологического искусственного спутника Земли, в прямой видимости которого находились все станции наблюдения, а также средства контроля и управления.

После взрыва бариевого заряда в течение нескольких секунд наблюдалось сферически симметричное расширение облака продуктов взрыва. При этом центр тяжести облака продолжал двигаться со скоростью движения четвертой ступени ракеты, на которой размещался перед взрывом бариевый заряд. В этой фазе основной вклад в свечение дают линии нейтральных атомов бария и стронция. Стронций содержался в виде примеси к барию, и его яркая резонансная линия 4607 Å позволяла вести наблюдения за нейтральным газом после того, как весь барий перешел в ионизованное состояние. Фронт свечения нейтрального газа имел скорость 1,2 км/с.

По мере разлета свечение нейтральных атомов уменьшалось и одновременно возрастала яркость излучения спектральной линии 4554 Å, принадлежащей иону Ba^+ . Это означало, что нейтральный барий ионизировался и возникло облако бариевой плазмы. На цветных фотографиях отчетливо видно, что расширение ионизованного бария происходило с той же скоростью, что и нейтрального, только вдоль направления силовых линий. Поперек силовых линий расширение бариевой плазмы затормаживалось. Дальнейшее расширение бариевой плазмы вдоль силовых линий происходило даже быстрее, чем расширение нейтрального газа. Авторы эксперимента объясняют это той дополнительной энергией,

которую электроны получают при фотоионизации. Поскольку разлету быстрых электронов препятствуют электрические поля поляризации, ионы ускоряются в этих полях, получая энергию от электронов. На рис. 4 показана фотография, полученная через две минуты после взрыва заряда. Здесь еще видно слабо заметное сфери-

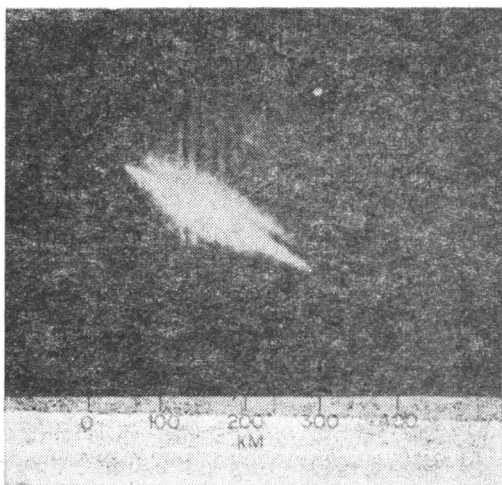


Рис. 4. Фотография бариевого облака высокой концентрации через 2 мин после взрыва заряда. Плазма имеет веретенообразную форму, вытянутую вдоль силовой линии. Сверху виден отделившийся слой плазмы. Вокруг плазмы светится нейтральный стронций

чески симметричное свечение нейтрального газа (в основном паров цезия, так как барий уже перешел в ионизованное состояние) и на его фоне выделяется яркое веретенообразное свечение ионизованного бария. На приведенной фотографии силовые линии магнитного поля направлены примерно под углом 45° к вертикали, т. е. облако бариевой плазмы вытянуто вдоль магнитного поля.

Эффект взаимодействия бариевой плазмы с магнитным полем отчетливо регистрировался магнитометром, помещенным на той же ракете, которая поднимала ба-

риевый заряд. Эти измерения показали, что образование облака ионизованного бария сопровождается значительным ослаблением напряженности магнитного поля в том месте, где это облако было образовано. Наблюдаемый эффект аналогичен скин-эффекту, хорошо известному в электротехнике. Быстро нарастающее магнитное поле не сразу проникает внутрь массивных металлических предметов. Возрастание напряженности магнитного поля приводит к появлению в проводящих телах поверхностных токов. Поле наведенных токов, складываясь с внешним полем, даёт внутри идеального проводника нулевую напряженность. В реальных проводниках за счет джоулевых потерь на нагревание током наведенные токи затухают, и поле по экспоненциальному временному закону проникает внутрь.

В магнитном поле образование плазмы с достаточно высокой проводимостью также приводит к появлению индукционных токов, вытесняющих магнитное поле из области, занимаемой плазмой. Плазма расширяется поперек магнитного поля до тех пор, пока в результате расширения газокINETическое ее давление не упадет до значения давления магнитного поля. Дальнейшая эволюция плазменного облака связана с растеканием сгустка плазмы вдоль магнитного поля и одновременно с затуханием индуцированных токов, а следовательно, и постепенной взаимной диффузией магнитного поля и бариевой плазмы. Характерное время «перемешивания» поля и плазмы пропорционально электропроводности плазмы и квадрату размера облака.

Поскольку скорость движения ракеты во время образования бариевого облака мала, можно считать, что результаты измерений относятся к определенной точке внутри бариевого облака. Интересной особенностью магнитных измерений являлось кратковременное резкое возрастание напряженности магнитного поля вслед за ослаблением, вызванным вытеснением его плазмой. Имеющихся в распоряжении экспериментаторов данных недостаточно, чтобы однозначно объяснить этот импульс поля. Естественнее всего предположить, что, достигнув состояния равновесия между полем и плазмой, граница облака совершает затухающие колебания около положения равновесия. Тогда осциллирующая граница может один раз или более пересечь ракету, и каждый вы-

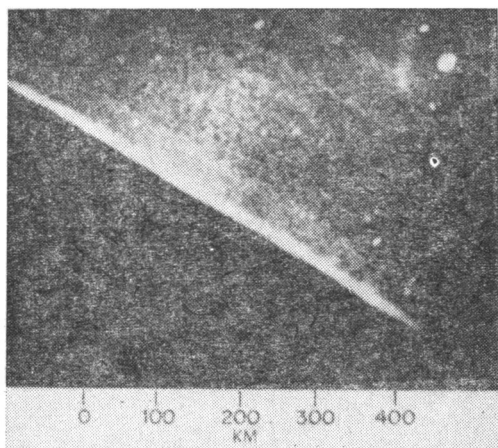
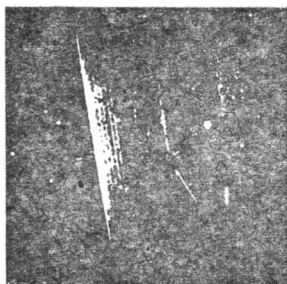
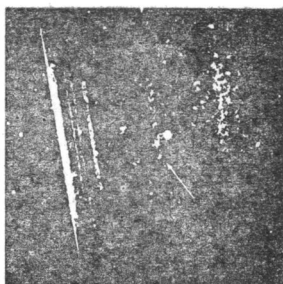


Рис. 5. Внизу расположено вытянутое вдоль силовой линии свечение основного бариевого облака. Выше видны отошедшие от него слои, они образовались в различные моменты времени. Снимок сделан через 9 мин после образования облака



03 24 30 (UT)



03 28 10 (UT)

Рис. 6. Фотографии бариевого облака высокой концентрации через 20 и 23 мин после образования. Отчетливо видны слои, отошедшие от основной части облака. Все слои вытянуты вдоль силовых линий. Наклон силовых линий на этом рисунке отличается от наклона на рис. 4 и 5, так как снимок сделан на другой станции слежения

ход ракеты за пределы облака должен вызывать импульс магнитного поля в показаниях магнитометра. Количество импульсов зависит от количества осцилляций и положения ракеты. Если все обстоит так, то в данном случае ракета выходила один раз за пределы границы плазмы перед тем, как токи в плазме успели затухнуть. Таким образом, можно считать доказанным, что образование бариевого облака сопровождается сильным магнитным возмущением, если количество испаренного бария достаточно велико.

Новым неожиданным физическим результатом является расслоение плазмы. Слои располагаются вдоль силовых линий магнитного поля. Они наблюдались по одну сторону от основного бариевого облака. Слои движутся относительно облака в восточном направлении (в направлении вращения Земли) вначале с ускорением, а затем приобретают одинаковую предельную скорость. Фотографии слоев, полученные через 9 и 23 минуты после образования облака, изображены на рис. 5 и 6 соответственно. Слева видно более яркое основное облако бариевой плазмы и справа от него вверх расположены слои. Фотографии получены с различных станций наблюдения. Из сравнения фотографий видна эволюция картины. Слои, находящиеся вблизи основного облака, еще не приобрели конечную скорость и за 14 минут не успели заметно отойти, в то время как более удаленные слои успели отойти значительно дальше на восток.

К настоящему времени еще нет полной теоретической интерпретации наблюдаемого явления. По-видимому, расслоение облака является следствием гидродинамической неустойчивости плазмы. Такая неустойчивость возникает, когда напряженность окружающего плазму магнитного поля спадает по мере удаления от границы с плазмой. Механизм развития неустойчивости можно представить себе следующим образом. Если на равновесной границе, где давление плазмы равно магнитному давлению, возникло возмущение и на участке границы плазма проникла внутрь поля, то проникающая плазма встречает уже меньшее давление магнитного поля, и происходит ее прорыв через границу. Неустойчивость границы плазмы и магнитного поля аналогична хорошо известной неустойчивости границы тяжелой

жидкости на поверхности легкой. Она носит название неустойчивости Релея — Тейлора.

Отделившиеся от основной части слои бариевой плазмы в дальнейшем приобретают скорость движения «окутывающей» магнитосферной плазмы, т. е. их скорость определяется дрейфом в электрических и магнитных полях. Напряженность электрического поля на экваторе на высоте 31 500 км, определенная в этих экспериментах, получалась равной 0,46 мВ/м.

Не все полученные в эксперименте данные к настоящему времени обработаны, и многие вопросы еще не ясны. Так, например, не ясен механизм ускорения слоев. Время ускорения, по-видимому, зависит не только от массы слоев, но и от его размеров, т. е. определяется временем восстановления первоначальной напряженности электрического поля в данной точке.

Потоки плазмы в магнитосфере

Значительный научный интерес представляют эксперименты с ускоренными сгустками бариевой плазмы. Такие эксперименты важны не только для изучения околоземного космического пространства, но и для дальнейшего развития физики плазмы, так как само космическое пространство может быть использовано как гигантская установка, обладающая рядом преимуществ перед любыми лабораторными сооружениями.

Недавно в США был проведен эксперимент с бариевой струей, направленной вдоль силовой линии магнитосферы. Для этой цели использовались источники взрывного типа, напоминающие противотанковый коммунитивный снаряд. Схема коммунитивного источника плазмы изображена на рис. 7. В цилиндрическом блоке взрывчатки весом 25 кг была сделана коническая полость, поверхность которой была покрыта слоем металлического бария толщиной 0,5 см. Полное количество бария составляло 880 г. При правильно расположенном поджигающем устройстве детонационная волна во взрывчатке распространяется так, что продукты взрыва выбрасываются вдоль оси конуса.

Ракета выводила коммулятивный источник на высоту 467 км. В момент срабатывания детонатора ось источника совпадала с направлением силовой линии магнитного поля Земли с точностью до 3°

Две успешные попытки проследить поток плазмы вдоль силовой линии $L = 1,25$ были осуществлены над

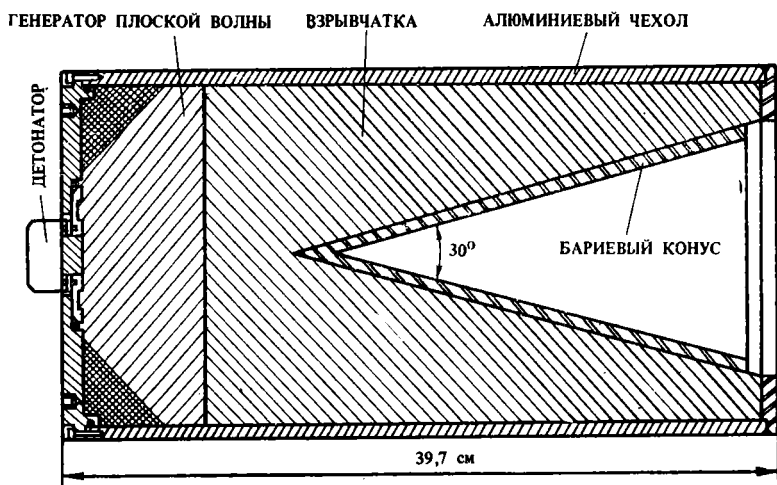


Рис. 7. Схема коммулятивного заряда для создания барьерной струи в магнитосфере. Перед срабатыванием заряда ось конуса устанавливается вдоль силовой линии

Гавайями в октябре 1971 г. (здесь L есть расстояние силовой линии от центра Земли в плоскости экватора, выраженное в радиусах Земли).

Свечение наблюдалось вдоль всей силовой линии (6900 км) и фотографировалось с наземных станций и с самолетов электронно-оптической аппаратурой. Фронт свечения достиг Южного полушария со средней скоростью 13,5 км/с. Перед приходом в южную сопряженную точку диаметр светящейся струи составлял 3 км, а концентрация ионов бария $10^3 - 10^4 \text{ см}^{-3}$. Светящаяся барьерная струя двигалась почти точно вдоль магнитной силовой линии, позволяя наблюдать с Земли ее форму и фотографировать.

Основными измеряемыми величинами в этих двух экс-

периментах являлись значения электрических полей, определенные одновременно в сопряженных точках. Полученные данные оказались для геофизиков неожиданными. Как величина скорости дрейфа, так и ее направление оказались различными в Северном и Южном полушариях. В Северном полушарии напряженность электрического поля получилась равной 10^{-5} В/см, в Южном — $7 \cdot 10^{-6}$ В/см. Эти данные, по-видимому, должны поставить под сомнение концепцию об эквипотенциальности силовых линий магнитосферы. В этих экспериментах получена информация о форме силовой линии. Точное знание формы силовой линии позволяет правильно расположить регистрирующие приборы в районе сопряженной точки при зондировании пучками быстрых электронов. Еще один эксперимент с направленной вдоль силовой линии коммулятивной струей бария был сделан в марте 1972 г. на Аляске на высоте 500 км. Струя бария была выпущена на силовой линии $L = 6$, т. е. должна была пройти над экватором на расстоянии пяти радиусов Земли от ее поверхности. Однако, достигнув за 17 минут высоты $3R_z$, изображение было разрушено из-за возникшей сильной суббури. Флуктуации магнитного поля оказались настолько быстрыми и значительными, что поток плазмы не успевал следовать за изменяющейся формой силовой линии, рассеялся и в дальнейшем не наблюдался.

Коммулятивным методам создания потоков плазмы в магнитосфере присущи два основных недостатка. Во-первых, невозможно повторить эксперимент и нельзя проверить его результаты. Во-вторых, «управляемость» эксперимента ограничена, так как отсутствует возможность варьировать в значительных пределах таким важным параметром, как скорость потока плазмы.

Диапазон возможностей экспериментов в магнитосфере значительно расширяется, если использовать ускорители плазмы. Ускорители плазмы начали разрабатывать в связи с проблемой управляемых термоядерных реакций и сейчас они широко используются в различных лабораторных экспериментах. В настоящее время известно несколько типов ускорителей плазмы, и почти все они основаны на взаимодействии электромагнитных полей с плазмой. Наиболее значительные концентрации плазмы в потоке дает электродинамический ускоритель,

в котором сгусток плазмы выталкивается магнитным давлением. Магнитное поле оказывает на плазму давление, равное $B^2/8\pi$. В зависимости от величины магнитного поля сгусток плазмы приобретает различную скорость.

Электродинамический ускоритель плазмы был впервые разработан в лаборатории Л. А. Арцимовича еще в 1956 г., и сейчас задача сводится к созданию модели, удобной для использования на спутниках и ракетах и позволяющей получать плазму однократно ионизованного бария. В докладе Л. В. Лескова, В. В. Савичева и их сотрудников, прочитанном на 11-й Всесоюзной конференции по ускорителям плазмы, сообщалось, что такая модель уже создана.

Использование импульсного электродинамического ускорителя плазмы позволит решить ряд проблем взаимодействия плазмы с магнитным полем, которые до сих пор не решены в условиях лаборатории. Околоземному космическому пространству в этих экспериментах отводится роль гигантской лаборатории.

Лабораторные эксперименты по взаимодействию потоков плазмы с магнитным полем были начаты еще в 1960 г., но многие особенности динамики сгустка плазмы остаются невыясненными. До сих пор невозможно описать даже картину движения сгустка в поперечном магнитном поле. Теория обычно может объяснить экспериментальные факты, но часто не в состоянии предсказать поведение сгустка в конкретных условиях. Прежде чем перейти к рассмотрению экспериментов в магнитосфере, для иллюстрации сделанного здесь утверждения рассмотрим один любопытный пример поведения плазмы в лаборатории.

В лабораторных экспериментах Линдсберга и Кристоферсона изучалось движение плазменной струи в магнитном поле, имеющем участок прямолинейных силовых линий и участок искривленных линий (рис. 8). Плазма инжестировалась (вводилась) вдоль прямолинейных силовых линий слева направо; длина свободного пробега частиц превышала размеры установки. Естественнее всего предположить, что поток плазмы на прямолинейном участке будет двигаться вдоль силовых линий. Эксперимент показал, что такое предположение

является неверным и характер движения оказывается значительно сложнее.

Вдоль прямолинейных силовых линий движется только головная часть струи. При попадании струи плазмы в искривленное поле происходит поляризация, но благодаря высокой проводимости плазмы вдоль поля



Рис. 8. Схема движения струи плазмы в искривленном магнитном поле. Струя отклоняется на прямолинейном участке поля за счет поляризации в области искривленных линий.

изменяется и потенциал всей линии, в том числе и на прямолинейном участке. В результате электрическое поле поляризации, перпендикулярное плоскости чертежа, возникает также и на прямолинейном участке. Дрейф в «скрещенных» полях приводит к смещению струи вверх, как схематически показано на рис. 8.

Подобных примеров неожиданного поведения плазмы можно привести много. Особенно сильное влияние на поведение плазмы в лабораторных установках имеют условия на стенках вакуумной камеры. В частности, скорость ухода зарядов, накопленных на силовой линии, зависит от проводимости стенки. Образование непроводящих пленок на металлических стенках и увеличение поверхностной проводимости стенок из диэлектрика в присутствии излучения из плазмы не позволяют получить в лаборатории количественные данные о траектории сгустка в магнитном поле. Магнитосфера Земли в этом смысле является идеальной лабораторией с контролируемыми начальными условиями.

Импульсный электродинамический ускоритель позволяет создать сгусток бариевой плазмы с такими параметрами, что за его поведением в магнитосфере можно наблюдать с космического аппарата, на котором распо-

ложен ускоритель, или с другого космического аппарата, находящегося вблизи. Рассмотрим поведение сгустка со средней скоростью $5 \cdot 10^6$ см/с и числом однократно ионизованных ионов бария $N = 10^{18}$. Генерация такого сгустка может быть осуществлена в ускорителе плазмы весом не более 20 кг, что вполне приемлемо для бортового прибора.

Инжектированный в магнитосферу сгусток плазмы расширяется с тепловой скоростью до тех пор, пока его газокинетическое давление не уравнивается магнитным. В дальнейшем беспрепятственное расширение будет происходить только вдоль силовых линий. При средней энергии хаотического движения 20 эВ равновесие давлений наступит тогда, когда размер облака станет равным ~ 20 м. Во время достижения равновесия концентрация составит $4 \cdot 10^7$ см $^{-3}$, а число ионов на единицу поверхности облака около 10^{11} см $^{-2}$. Такая поверхностная плотность позволяет получить снимки с помощью сверхскоростной кинокамеры с экспозицией в 10^{-2} с. Используя электронно-оптический преобразователь, можно получить снимки с экспозицией, на два порядка меньшей. Интенсивность излучения атомов бария из плазмы, движущейся к Солнцу или от него, должна быть в несколько раз больше, чем из неподвижного облака. Это связано с доплеровским смещением длины волны, которое выводит линию поглощения за пределы фраунгоферовой линии солнечного излучения. Поскольку время расширения составляет $\sim 10^{-3}$ с, использование электронно-оптического преобразователя позволит получить достаточно подробную информацию о стадии свободного расширения.

В течение всей стадии свободного расширения магнитное поле не должно оказывать существенного влияния на движение сгустка, инжектированного поперек силовых линий. Сгусток с высокой электропроводностью свободно раздвигает силовые линии и диссипация его энергии связана только с токами, вызванными изменениями магнитного поля.

Одновременно с расширением сгустка происходит проникновение поля в плазму. Вычисление скорости диффузии магнитного поля в сгусток требует знания изменения электронной температуры при расширении, а также влияния специфических плазменных процессов на про-

водимость. Грубые оценки времени диффузии магнитного поля дают значение, соизмеримое с временем расширения до установления баланса давления. Для следующей стадии динамики сгустка наиболее приемлема модель, в которой плазма движется в «скрещенных» полях: магнитном поле магнитосферы и электрическом поле, вызванном поляризацией. Вначале, пока средний заряд сгустка практически равен нулю, движение плазмы как целого продолжается прямолинейно с прежней скоростью, а затем в предельном случае малой концентрации ионы станут двигаться по окружностям с ларморовским радиусом независимо от электронов.

Как только магнитное поле начнет препятствовать расширению сгустка поперек силовых линий, дальнейшее уменьшение концентрации замедлится и будет происходить почти прямо пропорционально времени расширения. Увеличение объема сгустка в этой стадии обязательно исключительно растеканию плазмы вдоль поля. Эта стадия характеризуется неустойчивым состоянием плазмы из-за анизотропии давления. Анизотропия давления является следствием одномерного расширения. Составляющая скорости частицы поперек поля остается неизменной, а составляющая скорости хаотического движения вдоль поля адиабатически уменьшается. Поскольку столкновения не в состоянии снять анизотропию давлений, имеются все основания ожидать развития кинетических неустойчивостей.

При высокой электронной температуре динамика сгустка будет несколько иной. Равенство давлений $B^2/8\pi$ и nkT достигается раньше, чем поле проникнет в плазму. Сгусток будет расширяться, как и в случае перемешивания плазмы и поля, вдоль силовых линий, но при этом на границе, параллельной силовым линиям, все время сохраняется баланс давлений. Это означает, что за стадией свободного расширения сгустка последует стадия сжатия сгустка магнитным полем поперек силовых линий. Движение сгустка плазмы с высокой проводимостью в магнитосфере было рассмотрено И. А. Жулиным, В. И. Карпманом и Р. З. Сагдеевым. Ими была вычислена длина пробега такого сгустка, в предположении, что сгусток увлекает окружающую плазму.

В реальных условиях на высоте ~ 300 км длина торможения должна составлять несколько километров.

Эксперимент по изучению динамики сгустка в магнитосфере удобнее всего производить с космического корабля, так как получить отчетливую фотографию объекта размером 10 м с Земли, если этот объект находится на высоте ~ 300 км, чрезвычайно трудно.

Описанная здесь схема поведения сгустка является, по-видимому, лишь грубым приближением к той картине, которая будет наблюдаться в действительности. Теоретическое рассмотрение отдельных стадий динамики сгустка может внести некоторые уточнения и, по-видимому, позволит сформулировать дополнительные требования к постановке будущего эксперимента.

Зондирование магнитосферы пучками заряженных частиц

Явления, сопровождающие инжекцию быстрых сгустков плазмы в магнитосферу, слишком сложны и разнообразны, и это обстоятельство затрудняет детальный анализ происходящих при инжекции процессов. Более четко задачу о зондировании магнитосферы можно поставить в экспериментах с электронными и ионными пучками. Исследование магнитных полей, а также плазмы, находящейся в магнитном поле, пучками заряженных и нейтральных частиц давно уже широко используется в лаборатории. Последние годы пучки быстрых электронов стали применяться и для изучения магнитосферы. Малая концентрация плазмы в магнитосфере и быстрое уменьшение с энергией сечения рассеяния при столкновении заряженных частиц позволяют в первом приближении пренебречь взаимодействием ускоренных электронов с плазмой магнитосферы. Так, например, на расстоянии 200 км от поверхности Земли, где концентрация плазмы составляет $\sim 10^5 \text{ см}^{-3}$, длина свободного пробега электрона энергией 10 кэВ составляет $2 \cdot 10^{15} \text{ см}$, т. е. в сто раз превосходит расстояние до Солнца. Это не означает, что взаимодействие пучка электронов с плазмой магнитосферы отсутствует совсем. В действительности электронный пучок вызывает элек-

тростатические и электромагнитные колебания плазмы. Эти колебания, взаимодействуя с холодной плазмой магнитосферы, передают ей свою энергию.

Торможение электронного пучка в плазме в таких условиях, когда столкновения чрезвычайно редки, неоднократно наблюдалось и исследовалось в лаборатории. Однако результаты лабораторных исследований не всегда можно непосредственно переносить на космос. В лабораторных условиях при длительности работы электронной пушки в 10^{-6} с и скорости электронов $5 \cdot 10^9$ см/с, что отвечает энергии 10 кэВ, длина пучка составляет 50 м, т. е. заведомо превышает размер экспериментальной установки. В космосе такой пучок занимает небольшую часть магнитосферы Земли, окруженную невозмущенной плазмой, и условия торможения пучка могут быть другими. В космосе электронный пучок, образованный импульсно работающей пушкой, подобен игле, пронизывающей окружающую плазму. Пространственная ограниченность пучка накладывает свою специфику на раскачку колебаний в плазме. К моменту постановки первых экспериментов в космосе в этом вопросе не было ясности. Если считать, что торможение электронного пучка в межпланетной плазме за счет специфических плазменных процессов незначительно, то его поведение будет определяться взаимодействием с магнитным полем и столкновениями.

Исследование плазменных процессов, приводящих к торможению пучка электронов, является далеко не единственной задачей, стоящей перед таким экспериментом. В зависимости от конкретных условий полученные результаты могут способствовать решению различных проблем магнитосферы. Прослеживание пучка в магнитном поле Земли прежде всего позволяет установить форму силовой линии и тем самым сделать выбор между различными моделями магнитосферы.

Часто в литературе обсуждается возможность непрерывного перехода некоторых силовых линий магнитосферы в межпланетное магнитное поле. Общие силовые линии открывают прямой путь для попадания космических лучей внутрь магнитосферы, поэтому их обнаружение является одной из важнейших задач геофизики. Существование таких линий может быть обнаружено в экспериментах с пучками электронов. Время пролета

электрона вдоль силовой линии позволяет определить ее длину. При движении электронов вдоль силовой линии они испытывают дрейф как за счет неоднородности магнитного поля, так и благодаря наличию электрического поля. Измеряя скорость дрейфа, можно отмерить напряженность электрического поля, аналогично тому, как это делается с бариевыми облаками.

Помимо взаимодействия с магнитным полем магнитосферы, привлекают внимание также вопросы проникновения электронных пучков в верхние слои атмосферы Земли. Исходя из приведенных в § 1 рассуждений, следует, что инжектированный в магнитосферу электрон будет двигаться вдоль силовой линии, при этом полная энергия остается неизменной. На движение вдоль силовой линии накладывается медленный дрейф вокруг магнитной оси Земли. Если торможение электрона за счет взаимодействия с плазмой магнитосферы мало, то, двигаясь вдоль силовой линии, электрон отразится при определенном значении поля и станет двигаться обратно. Однако может случиться так, что «зеркальная» точка лежит ниже границы атмосферы, тогда, рассеиваясь на молекулах воздуха, электрон может отразиться от атмосферы, не достигнув «зеркальной» точки. При рассеянии часть энергии электрона теряется. Некоторые из них, попав в атмосферу, полностью потеряют там свою энергию.

Процессы, происходящие при внедрении электронного пучка в атмосферу, ничем не отличаются от тех, которые происходят в полярных сияниях. Электроны возбуждают и ионизируют нейтральные частицы, и этот процесс сопровождается излучением в различных областях спектра. Иными словами, внедрение быстрых электронов в атмосферу должно вызвать свечение, которое можно назвать искусственным полярным сиянием. Основной вклад в естественные полярные сияния дают электроны с энергией в десятки килоэлектронвольт, поэтому именно такие энергии необходимы для воспроизведения явлений, происходящих в сияниях.

Первый эксперимент с инъекцией электронов в магнитосферу был совместно выполнен в январе 1969 г. несколькими исследовательскими центрами США под руководством В. Н. Хесса. Эксперименту предшествовал теоретический анализ задач, которые могут быть решены

с помощью электронного пучка. Основное внимание при постановке эксперимента было обращено на проверку возможности прохождения пучком больших расстояний в магнитосфере, так как теоретические предсказания были противоречивыми.

Эксперимент В. Н. Хесса осуществлен на ракете «Аэроби», которая достигла высоты 270 км. Ускоритель электронов был направлен вниз. Он инжектировал вдоль силовой линии серию электронных импульсов длительностью до 1 с. Максимальный ток достигал 0,5 А, максимальная энергия — 10 кэВ. При подготовке эксперимента возникли опасения, что при инъекции мощного электронного пучка ракета может зарядиться до потенциала, близкого к ускоряющему потенциалу ускорителя, и в дальнейшем может прекратиться поступление быстрых электронов в магнитосферу. В этом случае быстрые электроны, выйдя из ускорителя, станут тормозиться в электрическом поле вблизи ракеты. Для компенсации заряда, уносимого электронным пучком, ракета была снабжена алюминиевой фольгой площадью около 300 м². После выхода ракеты за пределы плотных слоев атмосферы экран был развернут перпендикулярно силовым линиям и служил собирающей поверхностью для тепловых электронов плазмы. Этот поток электронов мог компенсировать заряд быстрых электронов пучка.

Несмотря на то что ракета несколько отклонилась от расчетной траектории, телевизионная аппаратура зарегистрировала светящиеся траектории электронных пучков, которые можно рассматривать как искусственные сияния лучевой формы. Четыре луча диаметром около 100 м были зарегистрированы одновременно на двух станциях. Полученные фотографии позволили простыми геометрическими построениями показать, что электронный пучок до полного торможения в атмосфере достиг расстояния ~ 105 км от поверхности Земли, т. е. прошел до полного торможения путь почти 200 км. Таким образом, было впервые показано, что упрощенная одномерная модель, применяемая для расчета торможения пучка за счет специфических плазменных процессов, неприменима к пучку ограниченных размеров. В этих экспериментах была показана также принципиальная возможность определения состава атмосферы

на различных высотах из спектра излучения сияния пучка.

Программой предусматривался также комплекс радиолокационных и радиометрических измерений, однако эта часть программы осталась невыполненной. Запуск ракеты совпал по времени с появлением потока метеоритов, и радиолокаторы не смогли различить импульсы, отраженные следами метеоритов, от ионизации атмосферы электронным пучком. Радиометрическим измерениям с Земли помешали атмосферные возмущения, связанные с приходом фронта непогоды, а измерения непосредственно в космосе не состоялись, так как запуск второй ракеты, специально предназначенной для этих измерений, был неудачным.

Эксперимент, в котором электронный пучок инжестировался вдоль силовой линии из Северного полушария в Южное и регистрировались электроны, вернувшиеся к месту запуска ракеты после отражения в Южном полушарии от верхних слоев атмосферы, был произведен 13 августа 1970 г. группой Дж. Р. Винклера. Всего было инжестировано 3000 электронных импульсов длительностью 16 мс с энергией около 45 кэВ. Ток пучка составлял 0,07 А. Инжекция электронов происходила под углом, близким к 90° по отношению к силовой линии, т. е. энергия поступательного движения была значительно меньше энергии вращательного. Напомним, что электрон, имеющий равную нулю скорость движения вдоль силовой линии, должен выталкиваться полем вдоль силовой линии в сторону ослабления напряженности. Если такой электрон отразится полем в другом полушарии и вернется обратно, то он вторично отразится в точке инъекции. Таким образом, для электрона, инжестированного под углом 90° к силовой линии, точка инъекции является одновременно «зеркальной» точкой. В действительности электрон отразится не точно в точке инъекции, так как за время полета его траектория несколько сдвинется из-за дрейфа вокруг магнитной оси Земли. Приборы, регистрирующие отраженные и вернувшиеся из Южного полушария электроны (электронное эхо), располагались на той же ракете, что и электронная пушка.

Траектория ракеты была выбрана таким образом, чтобы скомпенсировать дрейф электронов в поле Земли

за время их движения к точке отражения и обратно. Это необходимо для регистрации электронного эха приборами ракеты. Через 0,6 с после инъекции импульса отчетливо регистрировался отраженный поток электронов длительностью примерно 0,05 с, т. е. длина электронного пучка растягивалась не более чем в 3—4 раза. Сильного (во всяком случае в 1,5—2 раза) изменения энергии электронов после отражения обнаружено не было. Спустя еще 0,6 с на пределе чувствительности аппаратуры регистрировался сигнал от второго отражения. Третье отражение ни разу обнаружено не было.

В этих экспериментах отражение электронов происходило не вследствие возрастания напряженности магнитного поля вдоль силовой линии, а из-за рассеяния в верхних слоях атмосферы Земли. Дело в том, что для электронов, инжектированных с ракеты под углом 90° к силовой линии, «зеркальная» точка в эксперименте Винклера лежала в Южном полушарии ниже поверхности Земли.

Основным результатом эксперимента, по-видимому, следует считать прямое доказательство непрерывности силовой линии, расположенной достаточно далеко от поверхности Земли, и отсутствие значительных потерь энергии при прохождении пучком в магнитосфере расстояний в десятки тысяч километров. Интересные данные были получены с помощью радиорегистрирующей аппаратуры, расположенной в головной части ракеты. Отсек с измерительной аппаратурой отстреливался перед включением электронной пушки и в дальнейшем следовал по близкой с основной частью ракеты траектории. Было обнаружено излучение, возбуждаемое электронным пучком в интервале частот от 1 до 10 МГц. По-видимому, верхние частоты спектра представляют электронные плазменные колебания, а самые низкие частоты естественнее всего приписать «свистам» — электронным волнам, распространяющимся в плазме в присутствии магнитного поля. Такие волны легко возбуждаются в магнитосфере и регистрируются радиоприемником прямого усиления в виде характерного свиста, отсюда и возникло их название.

Дальнейшие эксперименты с использованием более совершенной аппаратуры помогут установить связь между излучением в различных диапазонах частот и

отдельными волновыми процессами, происходящими в магнитосферной плазме. Совершенно неожиданным явлением, обнаруженным в эксперименте с электронным пучком, явился так называемый эффект «черного облака»: сигналы ультракоротковолновых передатчиков при инжекции электронного пучка оказались резко ослабленными. Это явление не нашло пока удовлетворительного объяснения. Таким образом, сейчас трудно сказать, какова роль в науке эксперимента «электронное эхо»? Что важнее, возросший уровень понимания процессов в магнитосфере или вновь поставленные проблемы?

Среди недостатков эксперимента «электронное эхо» в первую очередь следует назвать отсутствие каких-либо измерений в районе отражения электронного пучка и слишком низкое положение точки, в которой должно было произойти отражение электронов магнитным полем. Последнее обстоятельство не позволило исследовать само магнитное отражение. Эти и другие недостатки будут устранены в совместном советско-французском эксперименте, известном под названием «Аракс».

В 1975 г. предполагается инжектировать пучки электронов с ракеты, которая будет запущена в Южном полушарии с острова Кергелен. Инжекция должна быть осуществлена на более длинной силовой линии, чем в эксперименте Винклера. В эксперименте «Аракс» $L=3,8$, а в эксперименте Винклера $L=2,5$. Силовая линия, связывающая остров Кергелен с Северным полушарием, проходит через Архангельскую область. Здесь «зеркальная» точка лежит выше, чем над островом Кергелен, что должно обеспечить магнитное отражение без заметного влияния атмосферы. В Архангельской области предполагается разместить сложную сеть научной аппаратуры. Электронный ускоритель будет посылать пучки электронов с различными параметрами и инжекция будет производиться под различными углами. При инжекции под малыми углами к силовой линии электроны не отразятся магнитным полем и войдут в Северном полушарии в верхние слои атмосферы. Для фотографирования искусственных полярных сияний будет использована аппаратура, синхронизированная с программой работы ускорителя электронов.

В порядке подготовки к программе «Аракс» в мае 1973 г. под руководством Р. З. Сагдеева был проведен

эксперимент «Зарница». Основная подготовительная работа и координация групп наблюдения осуществлялись лабораторией, руководимой И. А. Жулиным (Институт земного магнетизма и распространения радиоволн АН СССР). Ускоритель электронов был поднят на ракете на высоту ~ 160 км. Ускоритель давал импульсы электронов длительностью в 1 с с интервалом также в ~ 1 с. Ток электронов составлял 0,5 А, энергия — 10 кэВ. С помощью телевизионной аппаратуры фотографировалось свечение, вызываемое электронными пучками в диапазоне высот 100—160 км. Было отчетливо видно перемещение ограниченного в пространстве свечения, вытянутого вдоль силовой линии. В этом диапазоне высот плотность атмосферы достаточно велика, чтобы наблюдать свечение при прохождении электронов. Радиоизлучение, вызываемое пучком электронов на частоте 44,5 МГц, носило пульсирующий характер, что, по-видимому, связано с вращением ракеты. Получены также данные о рассеянии радиоволн. В настоящее время экспериментальный материал, собранный за две минуты полета ракеты, обрабатывается. Важной технической деталью эксперимента «Зарница» являлось отсутствие специальных приспособлений для компенсации заряда, уносимого электронным пучком. Было показано, что на высотах ~ 150 км компенсация заряда вполне обеспечивается металлической поверхностью самой ракеты.

До сих пор для корпускулярного зондирования магнитосферы использовались только электроны. В некоторых случаях удобнее работать с пучками ионов. Интересная возможность использования ионных пучков с некомпенсированным объемным зарядом для исследования возмущений магнитного поля магнитосферы была рассмотрена А. И. Морозовым и Р. З. Сагдеевым. В основе этого эксперимента лежит постоянство периода обращения по ларморовской окружности частиц, обладающих одинаковой массой. Если из данной точки пространства K (рис. 9) перпендикулярно силовым линиям одновременно инжектирована группа заряженных частиц массы m , имеющих различные направления в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, и различные скорости, то через время $T = 2\pi mc/eB$ все частицы вновь окажутся в точке K . При наличии распре-

деления по скоростям вдоль поля частицы сфокусируются не в точке, а будут размазаны вдоль силовой линии, проходящей через точку K . Частицы распределятся на участке $l_1 = v_{max} T$, где v_{max} — максимальная скорость вдоль магнитного поля. Такой характер движения имеет место в поле, однородном на протяжении ларморовской

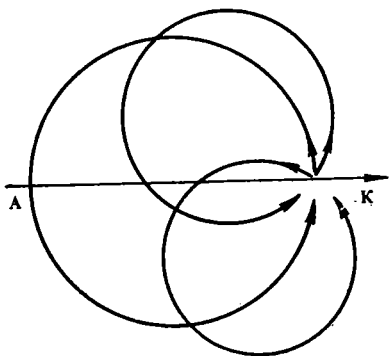


Рис. 9. Траектории ионов, инжектированных в магнитосферу поперек поля. Ионы данной массы, вышедшие из точки K , возвращаются в нее одновременно независимо от энергии или направления инжекции

орбиты, что с высокой точностью справедливо для поля Земли при использовании нерелятивистских частиц.

Предположим теперь, что инжекция частиц в точке K произведена с борта космического корабля, движущегося вдоль оси AK со скоростью v_0 , тогда через промежуток времени T позади корабля на расстоянии $v_0 T$ за кораблем будет наблюдаться «фокус» заряженных частиц. Такие фокусы будут возникать с временным периодом T и пространственным — $v_0 T$ в системе отсчета, связанной с кораблем. Интенсивность фокусов должна постепенно ослабевать за счет размазывания вдоль поля. При инжекции под углом к силовой линии, отличным от 90° , фокусы одновременно перемещаются вдоль поля.

При инжекции под углом 90° и движении корабля перпендикулярно полю геометрическое место фокусов лежит вдоль траектории корабля и может легко регистрироваться на втором космическом корабле при совместном полете. Нарушение наблюдаемой картины явится индикатором магнитных возмущений в магнитосфере. Для проведения этого эксперимента электронный пучок непригоден, так как электроны при тех же энергиях имеют значительно большую скорость и значительно

меньший радиус кривизны траекторий. В результате, описав часть окружности в магнитном поле, электрон попадет на стенку космического корабля, так как последний не успеет сдвинуться за это время на заметное расстояние.

Диапазон возможных применений ионных пучков в магнитосферных экспериментах, по-видимому, будет продолжать расширяться, и многие методы корпускулярной диагностики лабораторной плазмы найдут себе применение в космосе. Так, например, в лаборатории уже много лет пучки ионов используются для определения пространственного распределения потенциала плазмы. Если пучок ионов с определенной энергией направляется сквозь исследуемую плазму, то его энергия в данной точке изменится на величину $e\Delta\phi$, где e — заряд иона, а $\Delta\phi$ — разность потенциалов между данной точкой пространства и точкой инъекции. Таким образом, измеряя энергию ионов, можно определить потенциал точки, в которой измеряется энергия. В лаборатории измерительная аппаратура сильно искажает распределение потенциала, поэтому обычно измеряется не энергия частиц, а время пролета. В космосе, благодаря гигантским масштабам, можно измерять непосредственно энергию, не внося при этом значительных искажений.

Метод ионного пучка может оказаться весьма полезным для измерения возможного падения потенциала вдоль силовой линии магнитосферы. Для этой цели необходимо использовать два космических корабля, одновременно пересекающих одну и ту же силовую линию. На одном из них должен быть расположен источник ионов заданной энергии, а на втором — приемник с анализатором. Поскольку в магнитосфере содержатся ионы различных энергий, на эффект измерения может налагаться значительный фон, и поэтому в измерениях необходимо использовать ионы, содержание которых в магнитосфере мало. Например, дейтерий или литий. В такой постановке эксперимента аппаратура должна включать устройство, разделяющее ионы по массам.

Вынужденное высыпание частиц из радиационных поясов

Обнаружение радиационного пояса Земли было первым научным открытием, сделанным на искусственных спутниках Земли. Оказалось, что природная магнитная ловушка — магнитосфера Земли — заполнена быстрыми частицами, в основном электронами и протонами. Причины длительного удержания частиц в магнитосфере были рассмотрены в § 1. Движение каждой захваченной заряженной частицы можно представить как наложение трех независимых движений: а) вращение по ларморовской окружности вокруг силовой линии; б) движение вдоль силовой линии с поочередным отражением от зеркальных точек, расположенных в различных полушариях Земли; в) медленный дрейф вокруг магнитной оси из-за неоднородности магнитного поля. Захваченные частицы движутся по этим сложным траекториям и заполняют область, не сильно отличающуюся от тела вращения с осью, совпадающей с магнитной осью Земли. По форме радиационный пояс больше похож на обручальное кольцо, чем на пояс. Иногда говорят о двух поясах радиации, внешнем и внутреннем, один из них содержит высокоэнергетичные электроны, второй — протоны.

Радиационный пояс непрерывно «подпитывается» новыми частицами и одновременно часть частиц теряется, уходя вдоль силовых линий в атмосферу Земли и вызывая полярные сияния. Механизмы захвата в радиационные пояса еще недостаточно изучены. По-видимому, механизмы захвата электронов и ионов различны. Во всяком случае часть протонов радиационного пояса образуется за счет радиоактивного распада нейтронов. Такие нейтроны возникают при ядерных реакциях в атмосфере Земли, вызванных космическими лучами. Механизм заполнения быстрыми электронами будет обсуждаться в следующем параграфе. Здесь нас будут интересовать в основном механизмы потерь частиц из радиационного пояса. Важно отметить, что энергия частиц, запасенных в радиационном поясе, велика. Она составляет $10^{15} - 10^{16}$ Дж, что по порядку величины

сравнимо с энергией, выделяемой при ядерном взрыве.

Естественно, что к такому запасу энергии ученые не могут относиться равнодушно. Хотя конкретных идей практического использования этой энергии, по существу, нет, сейчас обсуждается эксперимент, в котором будет сделана попытка управлять уходом частиц из радиационного пояса. Остановимся на механизмах ухода частиц из радиационного пояса подробнее. При уходе захваченной частицы из радиационного пояса вектор ее скорости должен изменить направление так, чтобы возросла энергия продольного движения за счет уменьшения вращательной энергии. Тогда зеркальная точка для такой частицы переместится в область более сильного поля, и при определенном угле между силовой линией и вектором скорости частица уйдет в атмосферу Земли. Это означает, что частицы, удерживаемые магнитным полем, обладают явной анизотропией распределения скоростей. Среди удерживаемых магнитным полем Земли частиц отсутствуют такие, вектор скорости которых составляет с силовой линией угол, меньший некоторого критического значения α_0 , при котором частица отражается до входа в плотные слои атмосферы. О таких частицах говорят, что они находятся за пределами «конуса потерь», определяемого углом α_0 .

Для того чтобы захваченная магнитным полем частица могла уйти вдоль силовой линии, вектор ее скорости должен быть переведен внутрь конуса потерь. Угловое распределение с «вырезанным» конусом потерь не является термодинамически неравновесным. Частицы, захваченные магнитным полем, напоминают длительно живущие в возбужденном состоянии атомы (нак называемые метастабильные состояния), которые при внешнем воздействии переходят в основное состояние, выделяя энергию. Вынужденное высвечивание метастабильных атомов позволяет получать управляемые потоки световой энергии в лазерах. По аналогии всю магнитосферу с ее радиационными поясами можно представить себе как гигантский прибор типа лазера, для срабатывания которого необходимо подобрать соответствующий спусковой механизм. Энергия, запасенная в таком приборе, составляет $10^{15} - 10^{16}$ эрг.

Утечка частиц и радиационного пояса должна происходить непрерывно за счет их столкновений между со-

бой. Столкновения меняют направления скоростей и переводят частицы в конус потерь. Такая роль столкновений вытекает из самых общих соображений. Столкновения всегда приближают систему к термодинамическому равновесию, в частности ликвидируют анизотропию углового распределения.

При высоких энергиях частиц и низких концентрациях, характерных для радиационных поясов, столкновения настолько редки, что их вклад в утечку частиц незначителен. Изучение ухода частиц из магнитной ловушки чрезвычайно существенно не только с точки зрения науки о космосе. Скорость ухода является решающим фактором в судьбе целого направления термоядерных исследований, основанного на длительном удержании горячей плазмы в адиабатических ловушках.

Лабораторные исследования неоднократно показывали, что уход частиц из магнитной ловушки невозможно объяснить только столкновениями. На существование специфического плазменного процесса, приводящего к уходу, указывают импульсы электромагнитного излучения, сопровождающие аномально быстрые потери частиц вдоль силовых линий.

Теоретический анализ, выполненный в лаборатории Л. А. Арцимовича молодыми тогда теоретиками Р. З. Сагдеевым и В. Д. Шафрановым, показал, что аномальный уход частиц может вызвать резонансное взаимодействие волн в плазме и отдельных частиц. Не вдаваясь в теорию этого явления, рассмотрим грубую физическую картину, которая позволяет понять смысл резонансного взаимодействия. Если вдоль силовой линии распространяется электромагнитное возмущение, то, вообще говоря, его воздействие на отдельные частицы невелико. Воздействие становится значительным, если фазовая скорость волны близка к скорости движения частицы вдоль силовой линии. В этом случае частица долгое время «ощущает» поле волны при фиксированной фазе. В течение долгого времени на частицу действует почти постоянная сила, поворачивающая вектор скорости (т. е. результат такого взаимодействия, по сути дела, ничем не отличается от столкновения). Вектор скорости может перейти в конус потерь, и частица уйдет из магнитной ловушки. Если же скорость частицы мала по сравнению со скоростью волны, то взаимодействие

носит характер слабых осцилляций; адиабатический инвариант практически не изменяется, и частица долгое время остается удерживаемой магнитным полем.

Волнами, переводящими резонансные электроны в конус потерь, могут быть «свисты». Неустойчивость «свистов» развивается, когда достаточно велика анизотропия распределения векторов скорости частиц. Коэффициент анизотропии должен превосходить отношение частоты волны к частоте вращения электрона в магнитном поле. Критическая энергия высыпания, т. е. та энергия, при которой скорость электрона совпадает с фазовой скоростью волны, зависит от коэффициента анизотропии и обратно пропорциональна концентрации частиц в радиационном поясе. Для электронного радиационного пояса критическая энергия составляет 30—40 кэВ. Именно такую энергию имеют электроны, вызывающие низкоширотные полярные сияния. Из этих данных можно заключить, что высыпание из радиационного пояса действительно происходит в основном за счет резонансного взаимодействия волн и частиц.

Исходя из приведенных соображений, Н. Брайс предложил космический эксперимент по управлению высыпанием частиц из радиационного пояса. Уход частиц из радиационного пояса, образующий полярное сияние, может быть вызван по команде человека. Если увеличить концентрацию частиц в радиационном поясе, то уменьшится критическая скорость, и в процессе высыпания будут участвовать менее быстрые частицы, составляющие основное содержание радиационного пояса. Н. Брайс предложил ввести в радиационный пояс искусственную холодную плазму и тем самым, путем небольших затрат энергии на образование холодной плазмы, вызвать значительное освобождение энергии, запасенной в магнитосфере.

Оценки показывают, что при увеличении концентрации плазмы примерно в десять раз, т. е. доведении ее до десяти частиц в кубическом сантиметре, резонансная энергия станет равной 20—30 кэВ. Это обуславливает высыпание частиц мощностью до 0,3 эрг/см²с. Такая мощность высыпания вызовет заметное искусственное полярное сияние, причем внешнее воздействие будет играть роль только спускового устройства. Поскольку пары бария легко ионизируются солнечным излучением и

за бариевой плазмой можно наблюдать, то на первый взгляд в эксперименте по вынужденному высыпанию частиц удобнее всего использовать именно этот элемент. В действительности же быстрое время ионизации бария (~ 10 с), чрезвычайно удобное при измерении электрических полей, здесь не приемлемо, так как пары бария не успевают значительно расшириться до полной ионизации.

Дальнейшему расширению препятствует магнитное поле, которое не позволяет ввести бариевую плазму в значительный объем, занимаемый радиационным поясом. Инжекция большого количества бария приведет к искажению магнитного поля, как это наблюдалось в немецких экспериментах, и вынужденное высыпание за счет резонансного взаимодействия волны с частицей невозможно выделить в чистом виде.

Более удобным для изучения резонансного взаимодействия является цезий. Время ионизации атома цезия солнечным излучением составляет ~ 1000 с, хотя его потенциал ионизации меньше, чем бария. Малое время ионизации бария, как указывалось ранее, обусловлено наличием метастабильного уровня. При тепловой скорости цезия около $3 \cdot 10^4$ см/с его пары успеют до ионизации распространиться на расстояние 300 км, т. е. при инъекции образуется шар цезиевой плазмы диаметром в 600 км.

Для инъекции в магнитосферу цезиевой плазмы предполагается использовать американский геостационарный спутник «APC-1». Научным руководителем программы является Д. Вильямс. Геостационарным называют спутник с периодом обращения вокруг Земли, равным суткам. Такой спутник находится непрерывно на одной и той же долготе, т. е. все время находится вблизи одних и тех же силовых линий магнитного поля Земли. Использование геостационарного спутника для инъекции холодной плазмы позволит наблюдать с помощью находящихся на нем приборов за процессами, происходящими после инъекции. Для того чтобы спутник вращался синхронно с Землей, он должен быть выведен на круговую орбиту с радиусом, примерно равным шести радиусам Земли, т. е. инъекция с него плазмы будет производиться на силовую линию $L = 6$. Предполагается, что связанная со спутником «APC-1»

силовая линия будет проходить через станцию наземных наблюдений, расположенную на Аляске. В момент инъекции значительная часть силовой линии будет освещена Солнцем, станция же наблюдения должна находиться в тени. Помимо визуального наблюдения сияний и их фотографирования предполагается провести серию измерений на аэростатах и других спутниках. В измерениях примут участие несколько геомагнитных и радиолокационных станций.

Первая попытка зарегистрировать вынужденное высыпание частиц из магнитосферы была предпринята в эксперименте Вескота и других с наполнением силовой линии бариевой плазмой из коммулятивного источника взрывного типа. Было зарегистрировано слабое высыпание из силовой трубки $L = 6$. Однако именно в это время наблюдалась и магнитная буря, помешавшая наблюдению за потоком плазмы, и поэтому осталось неизвестным, было ли высыпание обусловлено наполнением плазмой силовой трубки или началом магнитной бури.

Аналогичный эксперимент на геостационарной орбите предлагался автором с использованием пучков бариевых ионов, получаемых в плазменном ускорителе стационарного действия. При токе в 20 А и энергии бариевых ионов ~ 100 эВ, что вполне соответствует уровню современной техники, концентрация струи в слое на 1 см составляет $2 \cdot 10^{14}$ см $^{-1}$. Принимая радиус струи равным ларморовскому радиусу, получаем концентрацию ~ 10 см $^{-3}$. При длительности инъекции в 30 мин силовая трубка будет заполнена плазмой на длине $\sim 20\,000$ км. Приведенные цифры не являются критическими и допускают изменения в пределах порядка величины, т. е. имеется возможность по желанию экспериментатора управлять начальными условиями. В ночное время имеется прекрасная возможность наблюдать искусственные полярные сияния на фоне ночного неба. Постановка этого эксперимента не требует разработки специальной аппаратуры и методов исследования.

Эксперимент с наполнением силовой трубки холодной плазмой может быть осуществлен не только на геостационарном спутнике. Если траектория ракеты, на которой установлен стационарный источник бариевой

плазмы, совпадает с силовой линией на протяжении десятков минут и все это время ось ракеты ориентирована вдоль поля, то такой полет также позволит однократно наполнить силовую трубку с помощью стационарного источника.

Эксперименты с искусственной магнитосферой

В предыдущих параграфах были рассмотрены эксперименты в космосе, направленные на выяснение свойств околоземного космического пространства. Большинство космических экспериментов требует тщательной подготовки и может быть осуществлено только с помощью дорогостоящей аппаратуры. В обмен на материальные и интеллектуальные затраты космические эксперименты дают уникальную информацию о природе, недоступную для обычной лабораторной техники. Несмотря на всю его громоздкость и трудоемкость, космический эксперимент является необходимым этапом исследования. Однако единство законов природы позволяет успешно воспроизводить в лаборатории некоторые явления, происходящие в межпланетной среде и магнитосфере, и исследовать их в привычных для экспериментаторов условиях.

Колоссальное различие в пространственных и временных масштабах накладывает определенные ограничения на возможность лабораторных исследований, но там, где моделирование явлений возможно, преимущества лабораторного эксперимента неоспоримы. Он проще, обладает большим диапазоном средств исследования и позволяет изучать явление в изолированном виде, когда оно не маскируется совокупностью сложных процессов, протекающих одновременно.

В брошюре этой же серии за 1972 г. уже рассматривались лабораторные эксперименты по моделированию взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли*. Там рассказывалось, что, используя

* И. М. Подгорный. Плазма в космосе и лаборатории. М., «Знание», 1972.

принцип ограниченного моделирования, можно воспроизвести в лаборатории форму магнитосферы с ее магнитным хвостом и бесстолкновительную ударную волну, возникающую у границы магнитосферы при обтекании сверхзвуковым потоком плазмы, которым в реальных условиях является солнечный ветер. Основные параметры солнечного ветра и искусственного солнечного ветра, который используется в модельных экспериментах Института космических исследований (ИКИ) АН СССР, представлены в табл. 1.

Таблица 1

	Скорость, см/с	Температура электронов, эВ	Концентрация, см ⁻³	Вырожденное в плазму поле, Гс
Параметры солнечного ветра	(3—5) 10 ⁷	20—30	6	10 ⁻⁴
Параметры искусственного солнечного ветра в экспериментах ИКИ АН СССР	3 · 10 ⁷	15—20	10 ¹³	40

Поток плазмы в этих экспериментах направлялся на терреллу — небольшой соленоид с током, являющийся моделью магнитного поля Земли. В этих условиях были воспроизведены бесстолкновительная ударная волна и форма магнитосферы. Наиболее наглядное представление о том, насколько хорошо моделируются процессы при обтекании солнечным ветром магнитосферы, может дать спектр магнитных флуктуаций на фронте ударной волны. На рис. 10 представлены спектры флуктуаций, полученные в космосе и в лаборатории. Несмотря на то что эти измерения велись независимо и измеряемые величины отличаются на много порядков величины, спектры мощности флуктуаций, выраженные в безразмерных единицах, прекрасно согласуются между собой. Черными точками на рисунке показаны результаты измерений микрофлуктуаций магнитного поля в лабораторном эксперименте с параметрами плазмы, выбранными исходя из принципа ограниченного моделирования. Сплошная линия представляет спектр мощ-

ности внутри ударной волны в космосе, построенный по данным, полученным на спутнике «ОГО-3». Белые точки, квадратики и треугольники — измерения на спутнике «ОГО-1» в турбулентной области за фронтом ударной волны (где уровень шумов несколько ниже, чем в ударной волне). В качестве единицы энергии на

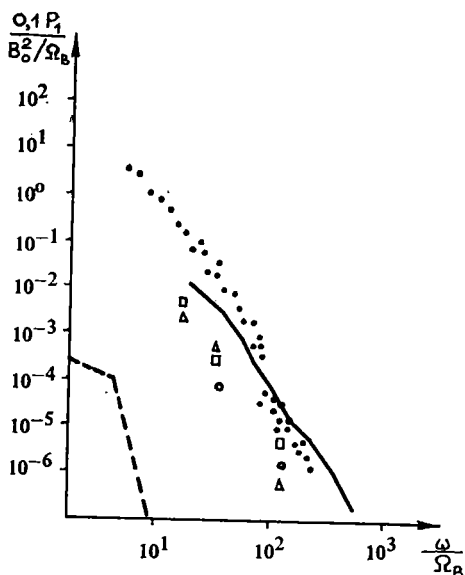


Рис. 10. Спектр микрофлуктуаций магнитного поля, выраженный в безразмерных единицах. Черные кружки представляют собой результаты модельных экспериментов. Сплошная линия — измерения в космосе внутри фронта ударной волны. Белые кружки, треугольники и квадраты — различные измерения в космосе за фронтом ударной волны, где уровень микрофлуктуаций меньше

графике взята плотность магнитной энергии в потоке плазмы $B^2/8\pi$. В качестве единицы частоты выбрана частота вращения иона по ларморовской окружности $\Omega_B = eB/Mc$.

Этот и ряд других результатов показывают, что искусственная магнитосфера, образующаяся в лаборатории при взаимодействии потока плазмы с магнитным полем диполя, может быть использована для изучения физики околоземного пространства. В лабораторных условиях активное вмешательство в изучаемые процессы осуществляется несоизмеримо проще. Можно сказать, что лабораторный эксперимент является даже излишне активным, так как сам процесс измерения в эксперименте влияет на характер изучаемого явления и

может привести к значительным его искажениям. Здесь возникает необходимость ставить различные контрольные опыты с целью выяснения и устранения этих искажений.

Центральной проблемой физики магнитосферы является выяснение механизмов попадания быстрых частиц в магнитосферу. Быстрые частицы, входя в верхние слои атмосферы, вызывают несравнимое по красоте и величию явление — полярное сияние. Для выяснения путей проникновения быстрых частиц в магнитосферу автором совместно с Э. М. Дубининым и Ю. Н. Потаниным был использован искусственный солнечный ветер, который содержал небольшое количество ($\sim 0,01\%$ от концентрации плазмы) быстрых электронов, энергией около 5 кэВ. Прослеживание потоков электронов, внедряющихся вместе с плазмой в магнитосферу, производилось двумя методами. Быстрые электроны, попадая на сцинтиллирующий кристалл, вызывают его излучение в видимой области спектра, и это излучение может быть зарегистрировано фотоэлектронным умножителем.

Другой метод, позволяющий получить распределение интенсивности потока в пространстве, — фотографический. Чувствительная фотопленка, защищенная от видимого света тонкой алюминиевой фольгой, помещается в той плоскости, где необходимо определить интенсивность потока плазмы. Быстрые электроны, содержащиеся в плазме, попадают на алюминиевую фольгу и выбивают рентгеновские кванты. Кванты с энергией в несколько килоэлектронвольт легко проникают через алюминиевую фольгу толщиной 6 мк и вызывают почернение фотопленки.

Введение пленок значительных размеров в магнитосферу может заметно исказить потоки плазмы и форму магнитного поля. При использовании пленки, соизмеримой с размерами искусственной магнитосферы и позволяющей получить общее представление о направлении потоков плазмы, приходилось тщательно подбирать ее положение, чтобы она по возможности не перекрывала основные потоки и вносила минимальное искажение в форму силовых линий магнитного поля. Каждый такой эксперимент сопровождался серией

контрольных измерений с помощью миниатюрных регистраторов быстрых электронов и магнитных зондов.

Полярные сияния. В лабораторном эксперименте чрезвычайно трудно наблюдать свечение газа под действием частиц, прорвавшихся внутрь искусственной магнитосферы, но используя различные детекторы,

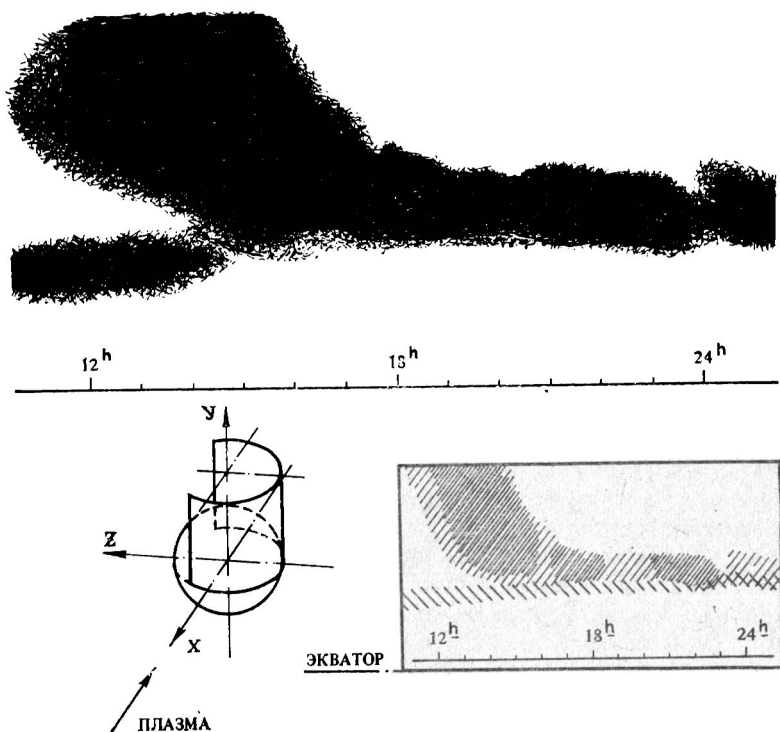


Рис. 11. Фотография цилиндрической пленки, одетой на терреллу, и схема ее экспонирования. На дневной стороне отчетливо видны две зоны выпадения частиц. Высокоширотная зона образуется за счет прорыва плазмы через северную полярную щель. В низкоширотной зоне выпадают электроны из радиационного пояса

можно регистрировать те самые потоки заряженных частиц на поверхности терреллы, которые в космосе при попадании в атмосферу вызывают полярные сияния. Высыпание быстрых электронов, введенных в искусст-

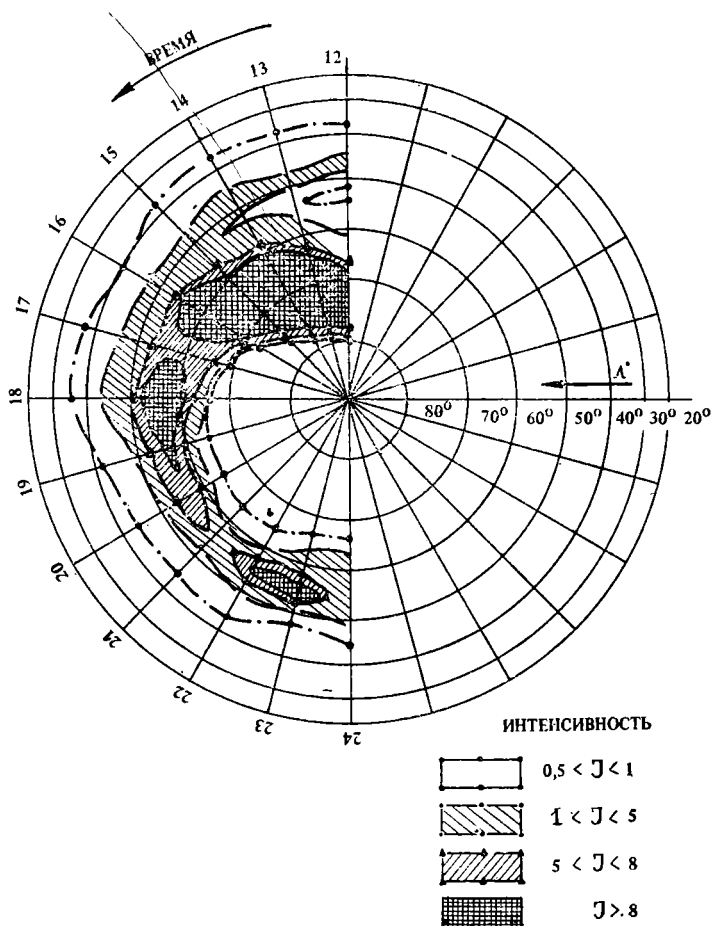


Рис. 12. Распределение интенсивности выпадения частиц на вечерней стороне, полученное в модельном эксперименте

венный солнечный ветер, на поверхность терреллы исследовалось с помощью фотопленок сферической и цилиндрической форм. Пленки одевались на терреллу и были защищены алюминиевой фольгой от воздействия видимого света. Почернение цилиндрической пленки,

вызванное потоками электронов, показано на рис. 11. На том же рисунке показана геометрия эксперимента и схематическое расположение отдельных зон выпадения. Основной максимум выпадения, наблюдающийся в районе полуденного меридиана, лежит на высоких широтах и продолжается на вечернюю сторону, несколько смещаясь в низкие широты. Эта зона выпадения распространяется и на утреннюю сторону, но там интенсивность выпадения значительно слабее и на фотографии зона практически не видна.

Помимо высокоширотного выпадения отчетливо видно низкоширотное. Оно отделено от высокоширотного на дневной стороне и постепенно сливается с ним при переходе на ночную сторону. Таким образом, наблюдаются как бы два различных овала полярных сияний, которые перекрываются на ночной стороне. Обработка результатов измерений для вечерней стороны представлена на рис. 12. Эта картина характерна как для Северного, так и для Южного полушарий.

Несмотря на многолетние исследования полярных сияний, информация о их распределении по долготе недостаточна, и до сих пор нет общепринятой модели распределения их интенсивности. Иногда говорят об одном овале, опоясывающем Землю; последнее время чаще высказывается мнение о существовании двух независимых овалов.

Довольно часто овальная форма сияний не принимается, и высказываются мнения о различном происхождении выпадений частиц на дневной и ночной сторонах.

Богатый материал по геометрии выпадения заряженных частиц, собранный при измерениях на космических аппаратах, был обобщен Н. Брайсом и Т. Хартцем. Результат этого обобщения представлен на рис. 13. В модели Н. Брайса и Т. Хартца отчетливо видны две зоны выпадения частиц на дневной стороне, которые плавно переходят на ночную сторону и там сливаются вместе. Картина Н. Брайса и Т. Хартца, построенная по отдельным измерениям, выполненным в разное время, согласуется с данными модельного эксперимента (рис. 12), которые носят «мгновенный» характер, т. е. дают полную картину выпадения для определенного момента времени.

Единственным различием распределений высыпающихся частиц в космосе и лаборатории является несовпадение абсолютных значений широт высыпания. Это расхождение не носит принципиального характера и обусловлено тем, что магнитное поле терреллы создается катушкой с током, а непосредственно на по-

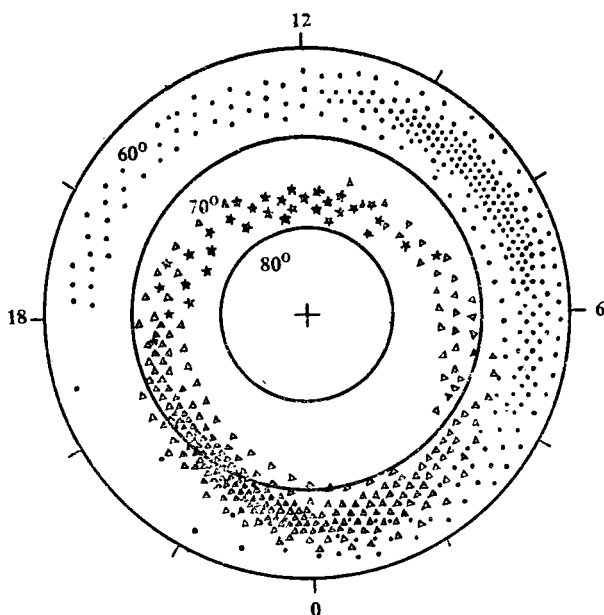


Рис. 13. Высыпание частиц, построенное Брайсом и Хартцем на основании совокупности ряда измерений в космосе

верхности катушки конфигурация отличается от дипольной. Поле терреллы хорошо описывается формулой дипольного поля только на расстоянии, в несколько раз превышающем характерный размер катушки, в то время как магнитное поле Земли, где источник поля лежит глубоко в недрах, уже на поверхности является практически дипольным. Таким образом, модельный эксперимент показал существование двух овальных зон высыпания, что согласуется с моделью Брайса —

Хартца, построенной на основании отдельных измерений в космосе.

Полярные сияния в природе, а в лабораторных условиях фотографии высыпания на поверхность терреллы можно рассматривать как результат действия некоторой своеобразной телевизионной системы, дающей некоторое трансформированное изображение физических процессов в магнитосфере. Расшифровку изображения особенно удобно производить в условиях лабораторного эксперимента.

Полярные щели в магнитосфере. Лабораторные эксперименты, выполненные в 1970 г. в ИКИ АН СССР, и данные космических измерений Л. А. Франка показали, что имеется отчетливо выраженный прорыв частиц в магнитосферу на дневной стороне в том месте, где происходит разделение силовых линий полярной шапки и силовых линий замкнутой магнитосферы. Прорыв частиц был обнаружен вблизи полуденного меридиана, и его существование не было абсолютно неожиданным. При магнитогидродинамическом рассмотрении обтекания Земли солнечным ветром на поверхности магнитосферы получаются две нейтральные точки, лежащие на полуденном меридиане. В таких точках направление поля не определено, и частица, приходящая из солнечного ветра, может проникнуть в магнитосферу, так как ее адиабатический инвариант в районе нейтральной точки не сохраняется.

В реально существующих условиях нет математической нейтральной точки, так как никогда не бывает бесконечно тонкой идеализированной границы между плазмой и полем, и можно ожидать значительного прорыва потока плазмы вдоль границы раздела силовых линий, уходящих в хвост, от линий, образующих замкнутую магнитосферу. Похожая конфигурация магнитного поля исследовалась в лаборатории задолго до того, как стало известно о существовании границы магнитосферы. В опытах с магнитными термоядерными ловушками автором было показано, что поток плазмы раздвигает силовые линии магнитного поля и может легко проникнуть в область сильного поля. На возможность проникновения частиц в магнитосферу в районе предполагаемого существования нейтральных

точек впервые обратили внимание Г. А. Скуридин и его сотрудники.

Измерения, выполненные с искусственной магнитосферой, показали, что высокоширотное высыпание непосредственно связано с прорывом плазмы вдоль границы полярной шапки. Детальные исследования позволили заключить, что область прорыва не локализована на дневной стороне, а простирается на ночную сторону. Помещая пленку в различные меридиональные сечения искусственной магнитосферы, можно было установить как форму области вторжения частиц, так и направление вторгающегося потока вплоть до его прихода на поверхность терреллы. Области вторжения опоясывают всю терреллу и представляют собой глубокие щели, по которым потоки частиц поступают в зоны высыпания. Одна из таких полярных щелей расположена в Северном полушарии, вторая — в Южном. Каждая из щелей ограничивает пучок силовых линий, уходящий из соответствующей полярной шапки в геомагнитный хвост.

Исследования, выполненные непосредственно в космосе, не обладают пока достаточными данными о форме полярных щелей, но там, где информация имеется, она полностью согласуется с результатами лабораторного эксперимента. Так, например, измерения В. Хеккила показали, что полярная щель, или, как он говорит, «ущелье» простирается на вечернюю и утреннюю стороны по крайней мере на десятки градусов.

Сечение щелей в плоскости главного меридиана показано на рис. 14. Отчетливо видна граница магнитосферы, непроницаемая для искусственного солнечного ветра. На этой границе давление потока плазмы уравновешивается давлением магнитного поля. В районе «нейтральной точки» поток плазмы внедряется в магнитосферу и попадает затем на поверхность терреллы, создавая высокоширотную зону высыпания. Аналогичное внедрение отчетливо видно и на ночной стороне.

Необходимо еще раз отметить, что введение в поток плазмы кассеты с пленкой может исказить картину обтекания, поэтому каждый полученный снимок тщательно проверялся измерениями с магнитными зондами и миниатюрными пленками, помещенными в различных

местах. Поскольку плоскость полуденного и полуночного меридианов является плоскостью симметрии и не пересекает поток искусственного солнечного ветра, вносимые такой кассетой искажения оказались практически незаметными. Несмотря на то что искажения, вносимые пленками, расположенными в других меридио-

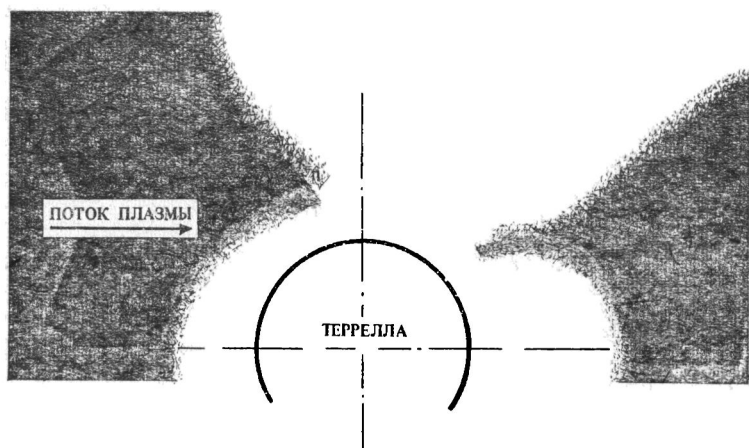


Рис. 14. Фотография сечения искусственной магнитосферы в плоскости главного меридиана. Отчетливо видна граница магнитосферы. На дневной и ночной сторонах имеются области внедрения плазмы. Они представляют собой единую полярную щель

нальных сечениях, получаются большими, используя серию фотографий, можно проследить непрерывную область вторжения — полярную щель, опоясывающую терреллу. На ночной стороне щель направлена почти перпендикулярно магнитной оси диполя и несколько смещена к экватору. Прорвавшиеся через северную и южную полярные щели частицы и образуют высокоширотные высыпания в обоих полушариях. Поскольку на ночной стороне полярные щели расположены ближе к экватору, чем на дневной, высокоширотное высыпание также лежит там ближе к экватору и сливается с низкоширотным. Природа низкоширотного высыпания была выяснена в другой серии модельных экспериментов.

Низкоширотная зона высыпания и радиационный

пояс. Первые же лабораторные эксперименты с искусственной магнитосферой показали, что низкоширотное высыпание невозможно связать с внедрением частиц в полярные щели, и необходимо искать другой механизм его образования. Измерения пространственного распределения быстрых электронов позволили заключить, что в магнитном поле искусственной магнитосферы имеются захваченные быстрые электроны, которые, дрейфуя вокруг оси диполя, образуют радиационный пояс. Захваченные магнитным полем электроны отражаются от зеркальных точек, однако часть их уходит вдоль силовой линии и высыпается на поверхность терреллы. Именно эти уходящие из радиационного пояса электроны и создают низкоширотную зону высыпания.

Уход частиц из радиационного пояса не является неожиданным, так как имеется ряд процессов, вызывающих нарушение адиабатического инварианта и уход частицы вдоль силовой линии. Один из механизмов нарушения адиабатической инвариантности, связанный с резонансным взаимодействием волны с частицей, рассматривался в предыдущем параграфе. Значительно труднее объяснить захват частиц в магнитном поле. Если захват протонов магнитным полем Земли удовлетворительно объясняется радиоактивным распадом нейтронов, т. е. образованием заряженных частиц непосредственно в магнитном поле ловушечной конфигурации, то для электронов эффективный механизм захвата обнаружить ранее не удавалось. Различные соображения о захвате быстрых электронов неоднократно обсуждались в научной литературе, однако космические измерения не позволяют еще сделать однозначный выбор.

Искусственная магнитосфера представляет возможность для почти неограниченного изменения условий, в частности, дает возможность вводить в радиационный пояс перегородки и тем самым определить положение источника быстрых частиц. Совокупность большого числа экспериментов с перегородками показала, что наполнение радиационного пояса электронами происходит на ночной стороне. Перегородки, помещенные на ночной стороне в плоскостях как меридиана, так и экватора, полностью снимают радиационный пояс. Одновремен-

но исчезает и вся низкоширотная зона высыпания частиц на поверхность терреллы.

Перегородки, помещенные на других долготах, прерывают высыпание и снимают радиационный пояс в секторе, расположенном между перегородкой и полуночным меридианом в сторону дрейфа электронов от положения перегородки. В остальной части магнитосферы, т. е. в секторе, расположенном в сторону дрейфа электронов от ночного меридиана, характер высыпания и концентрация частиц в радиационном поясе заметно не меняются. Таким образом, перегородки, помещенные в любом месте, кроме полуночного меридиана, обрывают дрейф электронов вокруг оси диполя, идущих с ночной стороны. При помещении перегородки на ночной стороне полностью прекращается поступление электронов в радиационный пояс. Следует особо подчеркнуть, что высыпание электронов из радиационного пояса происходит только в низкоширотной зоне.

Эксперименты с перегородками, перекрывающими потоки частиц в радиационном поясе, в естественных условиях могут быть осуществлены в магнитосфере Юпитера. Часть естественных спутников Юпитера расположена внутри магнитосферы, и по мере их движения вокруг планеты должны перекрываться потоки захваченной радиации на различных долготах. В работе В. Хесса отмечалось, что присутствие в магнитосфере Юпитера естественных спутников позволит измерить радиальную диффузию частиц в радиационных поясах. Последние данные модельных экспериментов о наполнении радиационного пояса на ночной стороне показывают, что исследования магнитосферы Юпитера на космических аппаратах приобретают особую важность. Во время пролета мимо Юпитера американского космического аппарата «Пионер-10» был обнаружен радиационный пояс. При пересечении «Пионером-10» орбит спутников было замечено уменьшение потоков захваченных частиц. Пока не ясно, позволяют ли эти данные, полученные при однократном пролете космического корабля, сделать заключение о локализации источников быстрых частиц в магнитосфере Юпитера.

Модель магнитосферы. Применение разнообразных методов исследования искусственной магнитосферы позволило наряду с полярными щелями обнаружить

экваториальную щель. Экваториальная щель не проявляется на полуденном меридиане, но начинается недалеко от него. На утренней и вечерней сторонах поток плазмы продавливает вблизи экватора замкнутые линии магнитосферы и внедряется в ее выпуклую границу. Чем дальше на ночную сторону, тем сильнее продавливает поток плазмы силовые линии и щель становится более глубокой, но ее глубина остается меньше размера магнитосферы, и внедрение через экваториальную щель не достигает внутренних областей магнитосферы. На ночной стороне экваториальная щель переходит в плазменный слой. В этом смысле экваториальную щель следует рассматривать как продолжение плазменного слоя на дневную сторону. Поскольку экваториальная щель начинается на вечерней и утренней сторонах, она не видна в сечении магнитосферы по главному меридиану (рис. 15). На рисунке схематически показано положение радиационного пояса и двух зон высыпания: низкоширотной и высокоширотной.

На ночной стороне разреза показаны несколько различных по физическому содержанию областей. Прежде всего внутренняя область — замкнутая магнитосфера с границей B_M . Глубже границы B_M плазма солнечного ветра не затекает, и здесь имеются только быстрые частицы радиационного пояса. С наружной стороны к B_M примыкает плазма высокой концентрации. Параметры этой плазмы не сильно отличаются от параметров плазмы, прорвавшейся через дневную часть полярных щелей. Наружная граница плазмы высокой концентрации S проходит через точку X , в которой меняется направление вертикальной составляющей магнитного поля. Кривую S можно рассматривать как перенесенную на ночную сторону сепаратрису, разделяющую силовые линии полярной шапки и замкнутой магнитосферы. Плазма, заключенная между B_M и S , поступает из той части полярной щели, которая прилегает к замкнутым силовым линиям. За линией S располагается уходящая в хвост область плазмы низкой концентрации. Плазма в эту область попадает из частей полярных щелей, лежащих ближе к полярной шапке. Наконец, на ночной стороне имеется свободная от плазмы область, образованная силовыми линиями (пришедшими из полярных шапок), обуславливающими геомагнит-

ный хвост. Выше экваториальной плоскости они направлены к Солнцу, а ниже — от Солнца.

Полученная на основании лабораторных данных модель магнитосферы, точнее, модель сечения магнитосферы в плоскости полдень—полночь, согласуется с рядом отдельных измерений в космосе. Так, например,

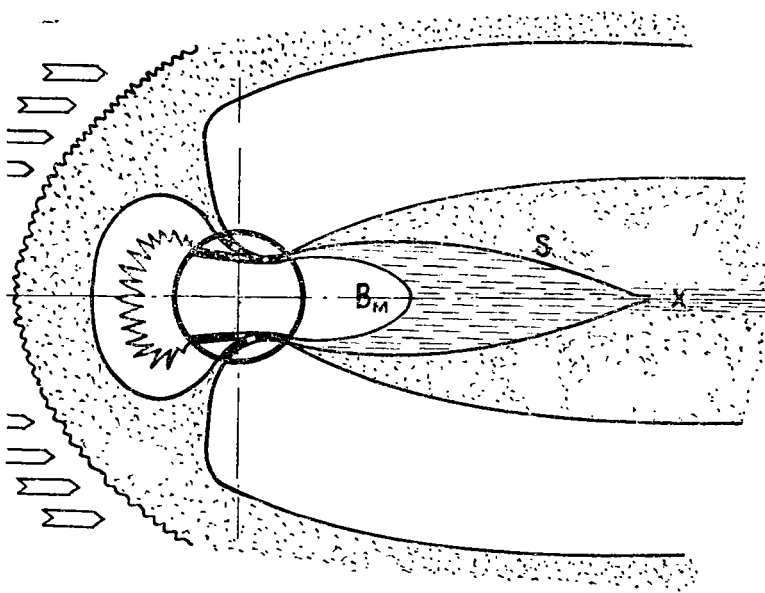


Рис. 15. Схема сечения магнитосферы по меридиану полдень — полдень. В точке X нейтральная линия пересекает плоскость чертежа. Между B_m и S находится плазма высокой концентрации, пришедшая вместе с силовыми линиями, конвектируемые вдоль границы магнитосферы

возможность изменения знака вертикальной составляющей поля хвоста (т. е. существование нейтральной линии, пересекающей рисунок в точке X), неоднократно обсуждалась в литературе в связи с экспериментальными данными, полученными на космических аппаратах. Нестационарность магнитных явлений в хвосте не позволяет пока установить четкую закономерность локализации нейтральной линии. Изменение ее положения часто связывается с началом магнитной суббури.

Рассмотрим теперь, как выглядит экваториальный разрез магнитосферы (рис. 16). Из-за недостатка данных измерений в космосе будем использовать только результаты модельных экспериментов. Поток плазмы, обтекая магнитосферу, все глубже внедряется в экваториальную щель и затем проникает в плазменный

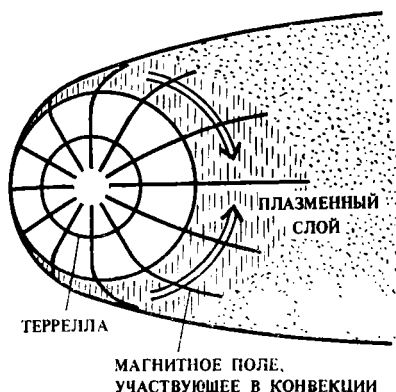


Рис. 16. Схема сечения магнитосферы экваториальной плоскостью. «Затекающая» в экваториальную щель плазма увлекает силовые линии и переносит их на ночную сторону. В щели линии показаны искривленными в направлении потока

слой геомагнитного хвоста. Экваториальное внедрение указывает на существование сильного взаимодействия потока плазмы с магнитным полем, приводящего к увлечению потоком силовых линий магнитного поля. Увлекаемые потоком силовые линии, точнее, их проекции на экваториальную плоскость, изображены изогнутыми в направлении движения, или, как чаще говорят, конвекции. Перемещаемые на ночную сторону благодаря конвекции силовые линии вытягиваются потоком плазмы. На ночной стороне встречаются два потока. Один из них приходит с вечерней стороны, а второй — с утренней. Взаимодействие потоков происходит в области, ограниченной на рис. 15 кривыми B_m и S . В теории плазмы рассмотрен ряд случаев неустойчивости двухпоточкового движения. Особенно сильно взаимодействуют потоки, несущие магнитные поля. При взаимодействии потоков возникают микрофлуктуации, которые, в свою очередь, приводят к увеличению эффективной частоты столкновений между частицами плазмы. Увеличение частоты столкновений означает уменьшение электропроводности, и силовые линии пере-

стают быть связанными с плазмой. Они сокращаются и погружаются внутрь магнитосферы. Те, отдельные быстрые частицы, которые погрузились в магнитосферу вместе с силовыми линиями, дают начало радиационному поясу. Таким образом, конвекция силовых линий в пограничном слое и взаимодействие встречных пото-

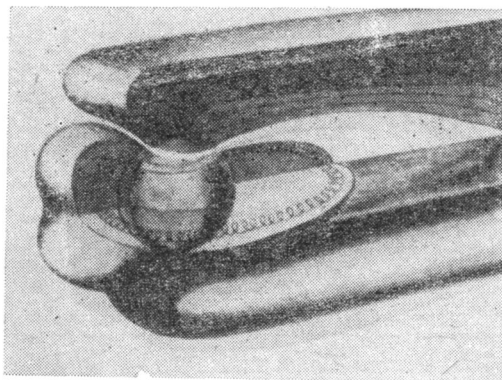


Рис. 17. Модель магнитосферы, построенная на основании данных лабораторного эксперимента. Кольцевая полярная щель позволяет проникнуть частицам в высокоширотную зону полярных сияний. В разрезе виден радиационный пояс. Уход частиц из него вызывает сияние в низкоширотной зоне

ков плазмы приводят к появлению источника частиц радиационного пояса вблизи полуночного меридиана.

Объемная модель магнитосферы показана на рис. 17. Отчетливо видна северная полярная щель, опоясывающая терреллу, и экваториальная щель, начинающаяся на дневной стороне. Внутри выреза виден радиационный пояс. Следует еще раз подчеркнуть, что эта модель построена по лабораторным данным, и отдельные ее детали требуют проверки в космосе. Данные Хеккила (США) и К. И. Грингауза и его сотрудников (СССР) показали, что полярное внедрение является протяженным; но еще нет измерений в космосе, показывающих «опоясывание» полярной щелью Земли. О существовании экваториальной щели в магнитосфере Земли пока ничего не известно, если не считать качественных сооб-

ражений (Я. И. Фельдштейн), основанных на косвенных данных.

Изображенная на рис. 17 модель дает возможность наиболее экономно планировать траектории космических аппаратов, предназначенных для исследования магнитосферы.

Заключение

В предыдущих параграфах были рассмотрены эксперименты в космосе с использованием потоков заряженных частиц и плазмы, искусственно вводимых в магнитосферу Земли. Космические эксперименты часто называют активными, или управляемыми, чтобы подчеркнуть, что при их проведении могут происходить качественные изменения в состоянии космического пространства, в отличие от измерений параметров магнитосферной и межпланетной среды, когда вносимые аппаратурой искажения должны быть минимальными. Помимо плазмы, для воздействия на магнитосферу с успехом применяется зондирование электромагнитным излучением. В течение ряда лет профессор В. А. Троицкая совместно с французскими коллегами успешно исследует особенности распространения электромагнитных возмущений вдоль силовой линии магнитного поля Земли. Измерения ведутся одновременно на двух станциях, расположенных на одной и той же силовой линии. В Архангельской области исследования ведут советские ученые, а на острове Кергелен — французские. Заслуживает внимания предложение инициировать высыпания частиц из магнитосферы с помощью генератора электромагнитных колебаний (Р. А. Хеливел, США).

Несколько слов следует сказать о предложении С. М. Кримигиса испарить в солнечном ветре перед ударной волной Земли несколько десятков килограммов лития. Проследивая за изотопами лития и измеряя их энергию в различных точках магнитосферы, можно выяснить место ускорения высыпающихся частиц и пути их проникновения в магнитосферу. Предварительные данные, показывающие, что в полярных сияниях участвуют частицы, пришедшие из солнечного ветра, недавно были получены анализом изотопного состава

гелия в солнечном ветре и в полярных сияниях. В этих экспериментах использовался остроумный метод поглощения частиц фольгами, разработанный И. Гайсом.

Данные о составе солнечного ветра получены при экспонировании алюминиевых фольг, развернутых на поверхности Луны экипажами космических кораблей «Аполлон». После экспонирования потоком солнечного ветра фольги доставлялись на Землю и изучался состав поглощенного вещества. Луна является идеальной «лабораторией» для изучения солнечного ветра, так как она не имеет ни атмосферы, ни собственного магнитного поля и поэтому не защищена от потока плазмы, идущей от Солнца. Среди прочих данных методом фольг было получено отношение изотопного состава гелия в солнечном ветре. Оказалось, что отношение концентраций изотопов He^3 и He^4 составляет $\sim 4 \cdot 10^{-4}$. В атмосфере Земли это отношение равно $\sim 10^{-6}$. Если измерить изотопный состав гелия в потоке быстрых частиц, вызывающих полярные сияния, можно выяснить, приходят ли эти частицы из солнечного ветра или образуются путем ускорения ионов магнитосферы.

Для определения относительной концентрации изотопов гелия в потоке, вызывающем полярные сияния, в зону полярных сияний направлялись ракеты, несущие сложенную алюминиевую и платиновую фольгу в герметически закрытом контейнере. На высоте около 200 км фольги разворачивались и экспонировались примерно 20 с. Хотя время экспозиции было невелико и точность измерений оказалась невысокой, полученные данные позволяют заключить, что авроральные частицы, по-видимому, приходят из солнечного ветра, что согласуется с моделью магнитосферы, построенной по данным лабораторного эксперимента.

Космические эксперименты приобретают все более богатое содержание. Возможно, придет время, и мы научимся управлять теми процессами в магнитосфере, которые наиболее важны для народного хозяйства. Так, например, высыпание быстрых частиц в атмосферу меняет ее состав на больших высотах, а следовательно, и прозрачность в различных участках спектра. Если процессы высыпания станут управляемыми, откроется почти неограниченная возможность регулировать погоду на земном шаре.

УВАЖАЕМЫЙ ТОВАРИЩ!

Редакция серии «Космонавтика, астрономия», издательства «Знание» просит вас заполнить настоящую анкету. Заполненную анкету просим высылать по адресу: Москва, Центр, Новая площадь, 3/4, издательство «Знание», редакция серии «Космонавтика, астрономия».

Заранее благодарим за присланные ответы.

АНКЕТА

I. Место проживания (подчеркнуть):

- 1) Москва или Ленинград
- 2) столица республики
- 3) областной или районный город
- 4) сельская местность или рабочий поселок

II. Ваш возраст (подчеркнуть):

- 1) до 17 лет
- 2) 18—25 лет
- 3) 26—35 лет
- 4) 36—50 лет
- 5) старше 50 лет

III. Кто вы (подчеркнуть):

- 1) школьник
- 2) студент
- 3) учитель средней школы
- 4) преподаватель вуза
- 5) лектор-пропагандист
- 6) служащий или рабочий
- 7) колхозник
- 8) научный работник

IV. Сколько лет вы пользуетесь нашей литературой (подчеркнуть):

- 1) 1 год
- 2) до 3 лет
- 3) больше 3 лет

V. Что вас больше интересует (подчеркнуть):

- 1) астрономия
- 2) космонавтика

VI. Желаете ли вы, чтобы наши брошюры были (подчеркнуть):

- 1) более популярными
- 2) более специальными
- 3) содержали бы больше справочного материала
- 4) давали бы больше биографических данных о выдающихся деятелях в областях астрономии и космонавтики (в том числе и космонавтах)

VII. Что вас больше всего интересует в области астрономии:

- 1) изучение планет, Солнца и других объектов Солнечной системы
- 2) звезды, галактики и другие объекты Вселенной
- 3) другие общие вопросы астрономии
- 4) популярное изложение последних достижений в области астрономии

VIII. Что вас больше всего интересует в области космонавтики:

- 1) общие проблемы
- 2) вопросы космической техники
- 3) результаты научных исследований космоса
- 4) прикладное значение космических исследований
- 5) изложение конкретных проектов и программ освоения космоса

Ваши пожелания и критические замечания о брошюрах серии «Космонавтика, астрономия».

10 коп.

Индекс 70101