

ВЕСТНИК
АКАДЕМИИ НАУК
СССР

(ОТДЕЛЬНЫМ ОТТИСКОМ)

3

ФИЗИКА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

(Симпозиум в Вашингтоне)

Академик

С. Н. ВЕРНОВ,

доктор технических наук

К. И. ГРИНГАУЗ,

кандидат физико-математических наук

И. А. ЖУЛИН

Комитет по исследованию космического пространства, Международный астрономический союз, Международный научный радиосоюз, Международный геодезический и геофизический союз и Международный союз теоретической и прикладной физики провели 3—13 сентября 1968 г. в Вашингтоне симпозиум по физике магнитосферы Земли. Непосредственную его подготовку осуществляли Национальная Академия наук США и Годдардский центр космических полетов. В симпозиуме приняли участие 287 представителей 18 стран: Австралии, Англии, ГДР, Италии, Канады, Мексики, СССР, США, Франции, ФРГ, Швеции, Японии и др.

Программа симпозиума включала девять тем: взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой, моделирование взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой, модели магнитосферы, захваченная радиация, геомагнитный хвост, полярные сияния и магнитные суббури, малоэнергичная плазма в магнитосфере, взаимодействие волн и частиц, процессы ускорения заряженных частиц в магнитосфере.

Обзорный доклад о взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой Земли, послуживший по существу введением ко всему симпозиуму, прочитал Ю. Паркер (США). Он суммировал основные параметры солнечного ветра, взаимодействующего с магнитосферой Земли, и привел сведения о турбулентности и тепловой анизотропии.

Докладчик указал, что основная картина взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли, играющей роль препятствия на пути солнечного ветра, может быть построена при помощи классической теории обтекания тела сверхзвуковым потоком. Вместе с тем он отметил, что гидродинамические представления могут быть справедливы только для стационарного случая и что изменения со временем уже не укладываются в обычную гидродинамику. Детальная картина процессов в ударной волне, в «турбулентном» переходном слое между ударной волной и границей магнитосферы, картина «соскальзывания» (обтекания) по бокам магнитосферы плазмы, подвергшейся термализации при прохождении через ударный фронт, совершенно отличны от аналогичных гидродинамических. Формирование геомагнитного хвоста и развитие конвекции в магнитосфере, тесно связанные с геомагнитной активностью, по-видимому, являются реальным своего рода «трением», возникающего при обтекании магнитосферы.

Важную роль в объяснении взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли должно сыграть решение задачи об устойчивости границы взаимодействия (магнитопаузы). Докладчик подчеркнул, что неустойчивость должна увеличиваться с переходом к более коротким волнам (периодам). В этом отношении недостаточно разработаны некоторые вопросы, относящиеся к процессам в бесстолкновительной плазме.

С другим обзорным докладом по этой теме выступил Дж. Спрайтер (США). Он представил по существу рафинированное магнитогидродина-

мическое количественное рассмотрение задачи (на основе ряда упрощающих предположений).

Значительное место на симпозиуме заняли работы (выполненные главным образом американскими учеными), относящиеся к наблюдениям процессов, протекающих в области ударной волны и переходной области. Так, были доложены некоторые результаты измерений на спутнике OGO-5 (апогей 140 тыс. км). Эти результаты, в частности, показали существование в области взаимодействия волны, соответствующих плазменным частотам для электронов и протонов, что согласуется с представлениями о неустойчивостях в указанной области, развивавшихся Ф. Скарфом, У. Бернштейном и Р. Фредериксом (США). К этому же циклу работ можно отнести и измерения магнитного поля (на удалении до 70 земных радиусов) на спутниках серии «Эксплорер» (28, 33, 34, 35).

Значительный интерес вызвал доклад А. Нишиды (Япония), в котором были приведены результаты сопоставления полярных суббурь с данными о магнитном поле в межпланетном пространстве (ИМП-1). Развитие суббурь докладчик связывает с проникновением в магнитосферу электрического поля, его переносом в ионосферу и появлением токов в ионосфере. А. Нишида считает, что проникновение электрического поля в магнитосферу имеет место на утренней и вечерней сторонах магнитосферы.

В докладе И. А. Жулина (СССР) на основе разрабатываемого им положения о посреднической роли межпланетного магнитного поля во взаимодействии с магнитосферой Земли было предложено объяснение установленного В. А. Троицкой появления некоторых видов колебаний магнитного поля Земли при определенной пространственной ориентации межпланетного магнитного поля.

После белградского симпозиума по солнечно-земной физике (1966 г.) стало известно, что японские ученые разрабатывают расчетную задачу о введении в магнитосферу Земли дополнительной энергии от солнечного ветра. На Вашингтонском симпозиуме Т. Обаяши представил первые результаты таких расчетов, выполненных на ЭВМ (приток энергии для бесстолкновительной плазмы, в которой частицы подвергаются электромагнитным воздействиям).

За последние годы в ряде стран проведены лабораторные эксперименты по моделированию взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли. Обзорный доклад по этой теме прочитал К. Шиндлер (Европейский институт космических исследований, Италия). Докладчик отметил, что, помимо экспериментов с тереллой (моделирование макрокартинны набегающего потока плазмы на дипольное магнитное поле), в которых делались попытки непосредственного моделирования космических явлений, проводились эксперименты по физике плазмы, имевшие другие цели, но оказавшиеся полезными для интерпретации этих явлений (например, эксперименты с плазменными волнами). Докладчик отметил важность наблюдения условий физического подобия. Наибольшим препятствием в этом отношении в лабораторных экспериментах являются процессы столкновений.

Было сделано также сообщение о работе, выполненной в исследовательской лаборатории одной из американских авиационных фирм («Авко», Массачусетс). В лабораторной установке проводилось изучение формирования стоячей ударной волны при набегающей бесстолкновительной плазмы на магнитное поле. Наиболее интенсивные и короткопериодные колебания плазмы обнаружены вблизи ударного фронта.

У. Аксфорд (США) прочитал обзорный доклад «Конвекция в магнитосфере». О существовании конвекции (крупномасштабного движения) плазмы в магнитосфере свидетельствуют наличие вариаций геомагнитного поля, аномалии области F ионосферы, поведение форм полярных сияний,

данные радиолокации полярных сияний, дрейфы в ионосфере, свистящие атмосферерики, поведение искусственных облаков ионизации. Наконец, в последнее время конвекция обнаружена прямыми наблюдениями движения ионов, проведенными на геостационарном спутнике АТС-1. В докладе рассматривалось влияние электрических полей, связанных с конвекцией, на поведение заряженных частиц различных энергий, был проведен анализ геофизических явлений, обусловленных конвекцией, в том числе явления «колева» (перегиба в высотном распределении концентрации тепловых заряженных частиц на высотах $\sim 20\,000$ км, впервые обнаруженного поминими ловушками на советском космическом аппарате «Луна-2»).

Очевидна важность математического описания магнитного поля в магнитосфере, которое позволило бы количественно анализировать процессы, определяемые этим полем. Работам такого характера был посвящен обзорный доклад Ж. Родерера (США) «Количественные модели магнитосферы».

П. Коллман и У. Каммингс (США) привели данные измерений на геостационарном спутнике АТС-1, показавшие, что магнитосфера остается сжатой по крайней мере во время начала главной фазы геомагнитной бури.

Средней конфигурации магнитного поля Земли в области внешней магнитосферы был посвящен доклад Д. Фэрфилда (США), основанный на данных измерений магнитного поля с помощью спутников ИМП-1, 2 и 3 (на удалениях от 5 до 18 земных радиусов).

Л. Ланцеротти (США) провел анализ спутниковых данных («Эксплорер-34» и АТС-1), касающихся проникновения достаточно малоэнергичных ($0,6-2$ Мэв/нуклон) протонов и альфа-частиц внутрь магнитосферы в области экватора.

Доклад В. М. Мишина, И. А. Жулина и Т. И. Сайфутдиновой (СССР), в котором на основе сведений о распределении геомагнитной активности была предложена модель магнитосферы Земли, учитывающая существование двух квазикруговых зон вторжения частиц в ионосферу и связывающая эти две зоны с вторжением частиц из хвоста и через нейтральные точки, вызвал дискуссию. Некоторые выступившие в дискуссии ученые (А. Нишида — Япония, П. Грегори — Италия и др.) сообщили, что они также пришли к подобным выводам.

Общий интерес вызвал кинофильм о полярных сияниях, снятый при парных самолетных полетах в сопряженных областях ($L \sim 10$) северного и южного полушарий в марте 1968 г. (группы Аляскинского университета и Лос-Аламосских лабораторий). Анализ результатов эксперимента свидетельствовал о высокой сопряженности форм сияний даже в периоды наибольшей активности и вместе с тем показал, что учет только внутренних источников геомагнитного поля недостаточен для определения истинно магнито-сопряженных областей.

Обзорные доклады о захваченной радиации были сделаны Дж. Ван Алденом (США) — «Заряженные частицы в магнитосфере» и С. Н. Верновым (СССР) — «Потоки частиц во внешнем геомагнитном поле». Следует отметить, что в первом докладе описывались по существу только результаты, полученные самим автором и его сотрудниками. С. Н. Вернов наряду с обзором широкого круга работ о захваченной радиации, зоне неустойчивого захвата, изменениях зоны радиации с циклом солнечной активности и т. д. привел новые данные о сравнительно кратковременных увеличениях интенсивности радиации во внутреннем поясе. Эти данные могут привести к пересмотру существующих представлений о физических процессах в магнитосфере Земли.

В ряде научных сообщений содержалась ценная информация об альфа-частицах, протонах и электронах в области захвата частиц, а также об их пространственно-временных изменениях.

Обзорный доклад Н. Несса (США) по теме «Геомагнитный хвост» представлял собой сводку имеющихся в настоящее время сведений об этой интересной области магнитосферы, ответственной, по-видимому, за многие геофизические явления электромагнитного комплекса.

Значительное внимание привлек доклад П. Банкса и Т. Хольцера (США) «Полярный ветер», в котором была предложена теория полярной ионосферы и магнитосферы. На основе обычных гидродинамических уравнений авторы доклада показали, что начиная с высоты ~ 200 км происходит быстрое ускорение ионов H^+ и He^+ до сверхзвуковых скоростей, поскольку силовые линии, исходящие из полярных шапок и образующие геомагнитный хвост, являются разомкнутыми, а давление плазмы в межпланетном пространстве мало. Переход к сверхзвуковому течению (полярный ветер) происходит на высотах в несколько тысяч километров.

Были прочитаны два обзорных доклада на тему «Полярные сияния и магнитные суббури» — Я. И. Фельдштена (СССР) и Б. Хультквиста (Швеция). Б. Хультквист сделал весьма полный обзор имеющихся сведений о наблюдениях полярных сияний и токовых системах, ответственных за те или иные виды геомагнитных возмущений. В докладе советского ученого была продемонстрирована возможность тесной увязки спутниковых наблюдений с наземными, оценки ряда параметров магнитосферы по наземным данным, разделения пространственных и временных измерений этих параметров на основе данных о динамике авроральной зоны.

Обзорный доклад К. И. Грингауза (СССР) был посвящен малоэнергичной плазме в магнитосфере. В нем были приведены экспериментальные данные, касающиеся тепловой плазмы, окружающей Землю, мягких заряженных частиц внутри радиационного пояса, в области квазизахваченной радиации, в переходной области между фронтом ударной волны и магнитопаузой и в геомагнитном хвосте, а также была изложена физическая интерпретация наблюдаемых явлений.

В докладе отмечалось, что хотя именно из заряженных частиц с энергиями менее 50 кэв состоят токовые системы, создающие геомагнитный хвост и вызывающие геомагнитные бури и полярные сияния, распределение этих частиц в магнитосфере экспериментально изучено далеко не достаточно. В частности, на высотах, превышающих земной радиус, при геомагнитных широтах более 45° эксперименты по изучению малоэнергичной плазмы в магнитосфере велись только на советских космических аппаратах «Марс-1» и «Электрон-2, 4».

Из отпосланных к этой теме оригинальных сообщений необходимо отметить сообщение Л. Франка (США) об экспериментальных исследованиях, проведенных на спутниках серииOGO. Оно сопровождалось кинофильмом, в котором была представлена информация о спектрах частиц в различных областях магнитосферы. Весьма высокая чувствительность примененных приборов позволила впервые обнаружить внутри внешнего радиационного пояса потоки мягких протонов ($E \leq 50$ кэв), создающих кольцевой ток, который вызывает главную фазу магнитной бури.

В сообщении В. Васильюнаса (США) приводились результаты наблюдений электронов с энергиями от 100 эв до ~ 2 кэв на спутникахOGO-1 иOGO-3. Наблюдения показали, что внутри магнитосферы радиационные пояса окружены мягкими электронами; внутренняя граница слоя этих электронов во время геомагнитных бурь приближается к Земле.

О прямых наблюдениях конвекции малоэнергичной магнитосферной плазмы на геостационарном спутникеATC-1сообщил Дж. Фримен (США).

В обзорном докладе Ч. Кейнела (США) «Последствия наличия малоэнергичной плазмы в магнитосфере» рассматривались диссипативные процессы в магнитосфере, обусловленные неустойчивостями плазмы. Изотро-

ния распределения поpitch-углам частиц, высыпавшихся вдоль силовых линий и проходящих через зону полярных сияний, свидетельствует о существовании механизма, который приводит к сильной диффузии поpitch-углам. Таким механизмом, видимо, является возникновение неустойчивостей.

По вопросам взаимодействия волн и частиц с обзорным докладом «Синхротроника низкочастотных волн в магнитосфере» выступил Р. Хелливелл (США). Он рассмотрел дисперсию и анизотропию распространения низкочастотных волн в тепловой плазме ионосферы. Особое внимание им было уделено резонансным эффектам взаимодействия этих волн с энергичными электронами, в частности циклотронному резонансу применительно к когерентным волнам в узкой полосе частот.

В обзорном докладе Ч. Робертса (США) были представлены экспериментальные и теоретические сведения о диффузии поpitch-углам электронов в магнитосфере. Эта диффузия оказывает существенное влияние на потери захваченных частиц. Экспериментальные данные о спектре мощности электромагнитной турбулентности в магнитосфере показывают, что диффузия поpitch-углам может происходить как в результате циклотронного резонанса при взаимодействии с волнами типа свистящих атмосфериков, так и при резонансном взаимодействии с волнами сжатия на частотах, кратных частоте осцилляции электронов между зеркальными точками. Еще одним важным механизмом диффузии электронов поpitch-углам является взаимодействие с электростатическими плазменными волнами.

Обзорные доклады по теме «Процессы ускорения заряженных частиц в магнитосфере», в которых освещалось современное состояние вопроса, были представлены Б. А. Тверским (СССР) и К. Фалтхаммером (Швеция). В ряде научных сообщений по этой теме рассматривались исследования радиальной диффузии захваченных частиц (один из основных механизмов ускорения) и экспериментальные данные об ускорении и потерях энергичных частиц в магнитосфере.

Интересной особенностью симпозиума было заключительное заседание, на котором три видных ученых — К. Мак Илвэйн и Л. Кахилл (США), Дж. Данжи (Англия) выступили с краткими обобщениями заслушанных докладов, отметили наиболее слабо разработанные вопросы и предложили возможные пути их решения. По выступлениям этих ученых развернулась широкая дискуссия.

Симпозиум прошел на высоком научном уровне и позволил суммировать современные представления о физике магнитосферы Земли.