

53
A46



Научно-исследовательский институт ядерной физики

На правах рукописи

И.И.АЛЕКСЕЕВ

МОДЕЛЬ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ДВИЖЕНИЕ
ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ ВО ВНЕШНЕЙ МАГНИТОСФЕРЕ

047 - физика плазмы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА • 1971

СК 53
АЧ6

I

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерной физики МГУ.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук В.П.Шабанский.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Б.А.Тверской, кандидат физико-математических наук А.И.Ерш-кович.

Ведущая организация - Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн АН СССР.

Автореферат разослан 1971 г.

Защита диссертации состоится 1971 г. на заседании Ученого совета Научно-исследовательского института ядерной физики МГУ. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Ученый секретарь Совета кандидат физико-математических наук (Е.А.Романовский)

Основная информация о физических свойствах удаленных от Земли областей магнитосферы получена при полетах космических аппаратов, начало которых было положено в 1957г. запуском первого советского искусственного спутника Земли. В настоящее время произведены измерения магнитосферного поля и потоков заряженных частиц почти во всех областях магнитосферы вплоть до орбиты Луны. При отдельных пролетах космических аппаратов были обнаружены следы вытянутого в ночную сторону "хвоста" магнитосферы на расстояниях 500 - 1000R_E (R_E - радиус Земли). Общая структура магнитосферы, которая могла бы быть положена в основу теоретических исследований, сравнительно хорошо известна.

Измерения в околоземном пространстве проводятся, как правило, на одном, максимум двух-трех космических аппаратах одновременно. Для обработки и анализа таких результатов, для выяснения связи магнитосферных явлений с процессами, происходящими в ионосфере Земли, необходимы надежные теоретические модели, описывающие структуру геомагнитного поля и динамику заряженных частиц. Количественное описание геомагнитного поля на расстояниях 3 - 4 R_E от центра Земли базируется на измерениях магнитного поля на поверхности Земли и на низколетящих спутниках. В этих областях поле обусловлено, в основном, внутривоздушными источниками. На больших расстояниях от Земли (R > 4 R_E) детали поля внутривоздушных источников становятся несущественными, и поле этих источников можно считать дипольным. С другой стороны, возрастает роль внешних источников магнитного поля: токов, возникающих в результате взаимодействия набегающего потока плазмы солнечного ветра с дипольным полем.

1-2205

Центральная научная
Библиотека
Академии наук Киргизской ССР

Диссертация посвящена построению модели магнитосферного поля на больших расстояниях от Земли, а также рассмотрению движения энергичных частиц во внешней магнитосфере, в частности, в районе нейтрального слоя хвоста магнитосферы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения.

В первой главе дается краткий обзор разработанных моделей магнитосферного поля и работ, посвященных движению заряженных частиц во внешней магнитосфере. Рассматриваемые модели магнитосферы основаны на решении задачи Чепмена-Ферраро о набегании потока солнечного ветра на геомагнитный диполь. В разных приближениях была получена форма границы магнитосферы и затем вычислено поле, обусловленное поверхностными токами, созданными набегавшей плазмой. Принимаемые в различных моделях упрощения дают весьма грубое приближение и существенно отличаются друг от друга. Тем не менее, расчет границы магнитосферы (магнитопаузы) дает примерно одинаковые результаты, сравнительно хорошо описывающие в общих чертах экспериментально полученную форму магнитосферы. Но такие детали магнитопаузы, как например, форма "воронки", возникающей вблизи нейтральных точек магнитного поля на границе магнитосферы, существенно различны в разных моделях и весьма приблизительно соответствуют эксперименту. Это объясняется тем, что в данной области используемые приближения не применимы. Существенным недостатком существующих моделей является феноменологическое введение токового слоя в хвосте магнитосферы, которое нарушает первоначальную замкнутость задачи. Большие вычислительные трудности, связанные с нелинейностью уравнений, позволяют получить решение лишь при определенном угле наклона геомагнитного диполя к линии Земля-Солнце.

В широко известной двухдипольной модели магнитосферы поле поверхностных токов ичитуруется полем мнимого диполя, расположенного за границей магнитосферы на линии Земля-Солнце. Эта модель позволяет сравнительно легко получить выражение для магнитосферного поля. Однако, приближенный характер этой модели предопределен заменой поля поверхностных токов на поле мнимого диполя.

В заключении этой главы приведены экспериментальные результаты, которые содержат информацию о конфигурации магнитосферного поля:

1. Прямые измерения магнитного поля.
2. Данные о потоках энергичных частиц во внешней магнитосфере.
3. Широтная зависимость высотных электронов, полученная на низко летящих спутниках.
4. Наземные и спутниковые наблюдения широтного распределения полярных сияний.
5. Наземные наблюдения случаев анимального радиопомехения в полярной ионосфере.

Вторая глава содержит описание предложенной автором параболоидной модели магнитосферы. В этой модели граница магнитосферы считается заданной и аппроксимируется параболоидом вращения. Мы пренебрегли различием экваториального и меридионального сечения магнитопаузы, а также изменением ее формы, связанными с вариациями угла наклона оси геомагнитного диполя к линии Земля-Солнце. Общая картина магнитосферного поля определяется формой всей магнитопаузы в целом. Выбранная нами поверхность хорошо аппроксимирует реальную магнито-

паузу вплоть до орбиты Луны. Поскольку локальные искажения границы магнитосферы могут сильно изменить магнитное поле лишь на расстоянии, сравнимом с характерным размером этих искажений, используемое приближение является оправданным с точки зрения определения магнитосферного поля. Граничное условие, накладываемое на суммарное поле, учитывает равенство нулю нормальной к границе компоненты поля. Это эквивалентно предположению, что поверхность магнитосферы служит тангенциальным разрывом. Экспериментальные данные говорят в пользу такого предположения, если ограничиться, по крайней мере, областью магнитосферы, расположенной до орбиты Луны.

Поле в магнитосфере находится из решения задачи магнитостатики при заданных внутренних источниках, в качестве которых рассматривались геомагнитный диполь и токовый слой хвоста магнитосферы. Следует подчеркнуть, что токовый слой является внутренним источником только с точки зрения его положения относительно магнитопаузы. Параметры токового слоя тесно связаны с параметрами плазмы солнечного ветра - внешнего источника магнитосферного поля. Было получено выражение для поля поверхностных токов, индуцированных на параболоиде полем токового слоя хвоста магнитосферы. Эти поверхностные токи замыкают ток, текущий по экваториальному сечению хвоста магнитосферы и образующий токовый слой. Учет поля токов замыкания устраняет присущую разработанным ранее модели непоследовательность, связанную с рассмотрением в качестве источника магнитосферного поля токовой пластины с незамкнутой линейным током. Поле токов замыкания существенно меняет роль токового слоя. Как показывают наши расчеты, в ранее рассматриваемых моделях влияние токового слоя на магнитное поле в лобовой части магнитосферы сильно занижено. В этой области магнито-

сферы поле токов замыкания компенсирует поле токового слоя. Напротив, в ночной магнитосфере, особенно на небольшом расстоянии от магнитопаузы, поле этих токов усиливает влияние токового слоя. По измерениям на спутниках поле в этой области превышает расчетные значения для всех моделей, в которых игнорируются токи замыкания. Параболоидная модель устраняет имеющееся расхождение.

Линейность задачи магнитостатики с заданной жесткой границей дает возможность получить магнитосферное поле при произвольном угле наклона оси геомагнитного диполя к линии Земля-Солнце. Поле поверхностных токов обладает скалярным потенциалом, для которого было получено интегральное представление в наиболее удобных для решения задачи параболических координатах. Чтобы облегчить сравнение полученного поля с другими моделями и упростить дальнейшие численные расчеты, потенциал поверхностных токов был разложен по сферическим гармоникам. Для достижения требуемой точности оказалось возможным ограничиться шестью членами ряда.

Полученное выражение для магнитосферного поля использовалось при проведении численного расчета силовых линий поля. В результате таких расчетов была построена проекция на экваториальную плоскость (по силовым линиям геомагнитного поля) точек, расположенных на поверхности Земли. Такая проекция позволяет сопоставлять процессы, протекающие в высокоширотной ионосфере с магнитосферными явлениями. Была получена зависимость от местного времени широты полярного овала, разделяющего гладкие силовые линии сердцевин магнитосферы и уходящие в хвост силовые линии с резким изломом в районе нейтрального слоя. Получена зависимость от местного времени

потоков высыпавшихся вдоль полярного овала частиц, обусловленная геометрией силовых линий.

Были рассчитаны сезонные колебания полуденной и полуночной широты полярного овала, связанные с изменением угла наклона геомагнитного диполя к линии Земля-Солнце. Эти колебания объясняют наблюдающийся на эксперименте сезонный сдвиг зоны аномального радиопоглощения в высокоширотной ионосфере. Другой интересный эффект, полученный в параболической модели, состоит в сезонных колебаниях широт сопряженных (находящихся на одной силовой линии) точек на поверхности Земли. Величина сезонного сдвига сопряженных широт растет с приближением к полярному овалу. Для высокоширотной области величина годового сдвига равна 5° - 6° вблизи 12^h местного времени.

В заключительном параграфе второй главы параллельно с изложением результатов численных расчетов и свойств параболической модели производится сопоставление этой модели с экспериментом и другими моделями магнитосферы.

В третьей главе изучается взаимодействие энергичных частиц с нейтральным слоем хвоста магнитосферы. Характерная особенность этой области магнитосферы состоит в том, что на сравнительно небольшом расстоянии $\sim 0,1 R_E$ величина и направление магнитного поля сильно изменяются. В районе нейтрального слоя изменение поля ΔV на ларморовском радиусе для энергичных частиц ($\epsilon_e > 20$ кэв, $\epsilon_p > 0,5$ кэв) того же порядка, что и само поле V . В этом случае условие применимости дрейфового приближения $\Delta V/V \ll 1$ не выполнено, и траектории частицы следует находить из решения точных уравнений движения. С другой стороны, если ларморовский радиус частиц гораз-

до больше толщины нейтрального слоя, этот слой можно рассматривать как бесконечно тонкий разрыв магнитного поля, пренебрегая изменением импульса частицы за время пребывания в слое.

Вне нейтрального слоя поле в хвосте магнитосферы почти однородно. Поэтому для описания движения энергичных частиц можно приближенно считать нейтральный слой плоскостью, разделяющей две области пространства с однородным магнитным полем. Выше плоскости слоя силовые линии наклонены под углом α , ниже - под углом $\pi - \alpha$. В этих предположениях получены условия, определяющие траекторию частицы вблизи слоя. В зависимости от pitch-угла θ и фазы, с которыми частица впервые пересекает нейтральный слой, она после нескольких пересечений либо отражается от плоскости слоя, либо переходит в другое полупространство.

В магнитосфере нормальная к нейтральному слою компонента магнитного поля V_n , гораздо меньше полного поля V . Соответственно угол α наклона силовых линий мал. При $\alpha \ll 1$ частица многократно пересекает плоскость слоя. Ее траектория получается при суперпозиции быстрых осцилляций в направлении перпендикулярном слою и более медленного перемещения в плоскости слоя. Характер изменения вдоль траектории pitch-угла и фазы в момент пересечения слоя таков, что величина магнитного потока через квазипериодический элемент траектории сохраняется. Неадиабатичность движения проявляется в момент первого пересечения частицей плоскости слоя, когда магнитный поток удваивается, и при уходе от плоскости слоя, когда он уменьшается в два раза. Постоянство магнитного потока означает, что первый адиабатический инвариант сохраняется при

взаимодействию с нейтральным слоем. При гладком распределении падающих частиц по pitch-углам число отраженных и прошедших сквозь слой частиц одинаково.

Траектория частицы в плоскости слоя подобна половине ларморовской окружности в поле B_n . Поскольку $B_n \ll B$ перемещение за время взаимодействия со слоем гораздо больше ларморовского радиуса частицы в поле B . Двигаясь вдоль нейтрального слоя, энергичные частицы сами создают ток, который направлен в ту же сторону, что и исходный ток, обеспечивающий скачок магнитного поля в плоскости слоя.

После того, как частица уходит от плоскости нейтрального слоя, её движение описывается дрейфовыми уравнениями для ведущего центра. Двигаясь вдоль силовой линии к Земле, она достигает точки отражения и вновь возвращается к нейтральному слою. Перемещение частицы в результате взаимодействия со слоем в сочетании с колебаниями до точки отражения и обратно приведёт к тому, что частица, совершив несколько колебаний, пересечёт хвост магнитосферы. Зная общее число колебаний и оценив примерно время одного колебания частицы, можно получить время задержки t , которое проходит между появлением энергичных частиц в межпланетном пространстве и появлением тех же частиц в хвосте магнитосферы. Для протонов с $E_p \sim 0,5$ мэв время $t \sim 10$ мин. Измерения потоков солнечных протонов ($E_p > 0,6$ мэв) на спутниках *Vela 4 A, B*, один из которых находился внутри магнитосферы, а другой — вне её, даёт величину t от 15 мин до 120 мин. Близость расчетного значения t к экспериментальному говорит о том, что механизмы проникновения частиц из межпланетной среды в хвост магнитосферы в результате разобранного нами взаимодействия частиц

с нейтральным слоем может играть существенную роль.

Возникающее во время магнитосферных возмущений крупномасштабное, квазистационарное электрическое поле меняет траекторию частиц. Однородное электрическое поле \vec{E} , направленное с утренней стороны магнитосферы на вечернюю, можно исключить, перейдя в систему координат, двигающуюся со скоростью $V = cE/B_n$ вдоль линии Земля-Солнце. Поскольку траектория частицы при $\vec{E} = 0$ нами получена, обратный переход в исходную систему координат даст траекторию частицы в присутствии электрического поля. Появление такого поля приведёт к ускорению частиц в результате взаимодействия с нейтральным слоем. Максимальное увеличение энергии при многократном возвращении к плоскости слоя равно разности потенциалов поперёк хвоста магнитосферы (~ 50 кэв). Помимо ускорения весьма существенно появление у всех частиц дрейфовой скорости V . Такой дрейф приведёт к тому, что падающие из межпланетного пространства в хвост магнитосферы частицы в результате взаимодействия с нейтральным слоем будут инжектироваться в сердцевину магнитосферы и захватываться геомагнитной ловушкой.

Полученные результаты для движения энергичных частиц вблизи нейтрального слоя легко обобщаются на случай магнитогидродинамических разрывов — косых ударных волн и вращательных разрывов. Для таких разрывов при малом угле наклона силовых линий к плоскости разрыва траектория энергичных частиц определяется условием постоянства магнитного потока через квазипериодический элемент траектории. Получены условия отражения или прохождения частицей плоскости разрыва и величина ускорения частиц на плоскости разрыва. Эти результаты были

привлечены для объяснения некоторых особенностей наблюдающихся потоков энергичных частиц в межпланетной среде.

В заключение кратко сформулированы наиболее существенные, на наш взгляд, результаты, полученные в диссертации:

1. Предложена новая модель магнитосферного поля, в которой поверхность магнитосферы аппроксимируется параболоидом вращения. Эта модель позволила получить выражение для магнитосферного поля при произвольном угле наклона геомагнитного диполя к линии Земля-Солнце и количественно оценить роль токов "замыкания" на поверхности магнитосферы, которые вызваны током нейтрального слоя хвоста магнитосферы.

2. Произведен численный расчет силовых линий и линий $B = \text{const}$ при различных значениях параметров. На основе таких расчетов получено соответствие между поперечной и экваториальной плоскостями магнитосферы при проекции вдоль силовых линий геомагнитного поля. Эти результаты могут служить основой для разработки "стандартной магнитосферы", описывающей регулярную составляющую магнитосферного поля. Рассчитан ряд сезонных эффектов, связанных с деформацией магнитосферного поля при изменении наклона геомагнитного диполя к линии Земля-Солнце. Произведено сравнение результатов параболоидной модели с экспериментом и уже имеющимися моделями магнитосферы.

3. Рассмотрено движение энергичных частиц в районе нейтрального слоя хвоста магнитосферы. Показано, что, хотя в процессе движения частицы вблизи нейтрального слоя её pitch-угол меняется, результирующее изменение магнитного момента равно нулю. Первый адиабатический инвариант сохраняется. Рассмотрен механизм проникновения энергичных частиц из межпланетного про-

странства внутрь магнитосферы в результате взаимодействия с нейтральным слоем. Полученное на основе такого механизма время запаздывания между появлением этих частиц вне магнитосферы и заполнением хвоста магнитосферы близко к наблюдаемому.

4. Рассмотрено изменение траекторий, пересекающих нейтральный слой, при наличии однородного электрического поля, направленного с утренней стороны на вечернюю. Появление такого поля во время магнитосферных возмущений приводит к ускорению и инжекции частиц в сердцевину магнитосферы.

5. Проанализировано взаимодействие частиц с фронтом косой ударной волны и вредительского разрыва. Получены условия отражения или прохождения частицей плоскости разрыва. Получена величина ускорения частиц при движении вблизи фронта.

Основные результаты диссертации доложены на VI Всесоюзной ежегодной зимней школе по космофизике (Апатиты, 1969), на Международной (Будапешт, 1969) и Всесоюзной (Ленинград, 1969) конференциях по физике космических лучей, на Международном симпозиуме по Солнечно-земной физике (Ленинград, 1970), и содержатся в следующих работах:

1. Алексеев, И.И., Кропоткин А.П., Труды VI Всесоюзной ежегодной зимней школы по космофизике, Часть I, Апатиты, 1969, стр. 275.

2. Алексеев И.И., Кропоткин А.П., "Геомагнетизм и Аэрномия", 10, 777, 1970.

3. Алексеев И.И., Кропоткин А.П., "Геомагнетизм и Аэрномия", 10, 958, 1970.

4. Алексеев И.И., Кропоткин А.П., Шабанский В.П., Изв. АН СССР, сер. физ., 94, 2818, 1970.

5. Alekseev I.I., A.P. Kropotkin, Proc. IIth Int.Conf. on Cosmic Rays, Budapest, 1969. Acta Physica Academiae Scientiarum Hungaricae, 29^h, Suppl., 4, p.521, 1970.
6. Alekseev I.I., V.P. Shabansky, International Symposium on Solar-Terrestrial Physics, Leningrad, May, 1970, Program and Abstracts, MI-2.
7. Алексеев И.И., В. П. Шабанский, "Геомагнетизм и Астрономия", II, № 3, 1971, / в печати /.
8. Alekseev I.I., V.P. Shabansky, "Planetary and Space Sci.", 1971, (in press).

ПОДП. К ПЕЧАТИ 10/Ш-71 Г. Л-43844. Ф. 80x80/18
ФНЗ.П.Л. 0,75. ЗАКАЗ 2205. ТИР. 200 ЭКЗ.

ОТПЕЧАТАНО НА РОТАПРИНТАХ В ТИП. ИЗД. МГУ
МОСКВА, ЛЕНГОРЫ

