1965 г. Ноябрь *Том 87, вып. 3*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

525.24

МАГНИТОСФЕРА *)

Л. Кахилл

Магнитное поле Земли обычно изображается в виде симметрично расположенных магнитных силовых линий, центрированных относительно магнитной полярной оси Земли. Общая конфигурация линий напоминает невозмущенное дипольное поле, образуемое обычным магнитным бруском, если его поместить в центре Земли (рис. 2). При отсутствии каких-либо внешних воздействий такое поле будет простираться на бесконечно большое расстояние в межпланетном пространстве, постепенно ослабевая по мере удаления от Земли.

Начиная с 1958 г., непосредственные измерения внешних областей магнитного поля Земли с помощью искусственных спутников и космических ракет убедили многих геофизиков, что эту простую картину геомагнитного поля нужно коренным образом пересмотреть. Далеко не свободное от внешних воздействий, геомагнитное поле подвержено непрерывному воздействию «ветра» электрически заряженных частиц, испускаемых Солнцем; это поле искажается электрическими токами, циркулирующими в радиационных поясах, которые опоясывают Землю, и, возможно, искажается еще больше при изменениях межпланетного магнитного поля. Окончательным результатом всех этих воздействий является то, что геомагнитное поле принимает форму, немного похожую на падающую каплю с очень длинным хвостом (рис. 3). Вместо того чтобы иметь бесконечную протяженность, поле, по-видимому, ограничено в определенном объеме пространства, называемом магнитосферой, т. е. окружено флуктуирующим, но дискретным граничным слоем, называемым магнитопаузой. Анализ данных измерений на спутниках (рис. 4) достиг такой стадии, что уже теперь можно с достаточной точностью дать общие контуры магнитосферы. Одновременно для теоретиков возникла возможность построить несколько альтернативных рабочих моделей для объяснения сложных взаимодействий, которые имеют место как внутри, так и вне магнитосферы между заряженными частицами и магнитными полями.

ПЕРВОНАЧАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Первое предположение о том, что геомагнитное поле ограничено в определенном объеме пространства тонким граничным слоем, было сделано около 30 лет назад. Наблюдатели заметили, что большие вспышки

*) L. J. Cahill, The Magnetosphere, Scientific American 212 (3), 58 (1965). Перевод Л. И. Дормана и Н. С. Каминера.

В оригинале — резюме: «Измерения на спутниках показывают, что магнитное поле Земли ограничено определенным объемом пространства, образующим нечто подобное падающей капле с очень длинным хвостом».

В статье отражены результаты исследований на американских спутниках и ракетах. Обзор советских работ по исследованиям магнитосферы Земли можно найти в статьях Ш. Ш. Долгинова и др., Геомагнетизм и аэрономия 2, № 1, 38; № 6, 1061 (1962). (*Прим. перев.*)

на поверхности Солнца часто через один-два дня сопровождаются сильными магнитными бурями на Земле. Такие бури обычно начинаются с заметного увеличения напряженности геомагнитного поля на большей части земной поверхности. Отсюда английский геофизик С. Чепмэн и его коллега В. Ферраро заключили, что мировое возрастание напряженности поля может быть обусловлено сжатием геомагнитного поля. Они предположили в 1931 г., что агентом, создающим сжатие, является электрически нейтральное облако протонов и электронов (плазма), испускаемое Солнцем во время солнечной вспышки. Чтобы объяснить запаздывание между

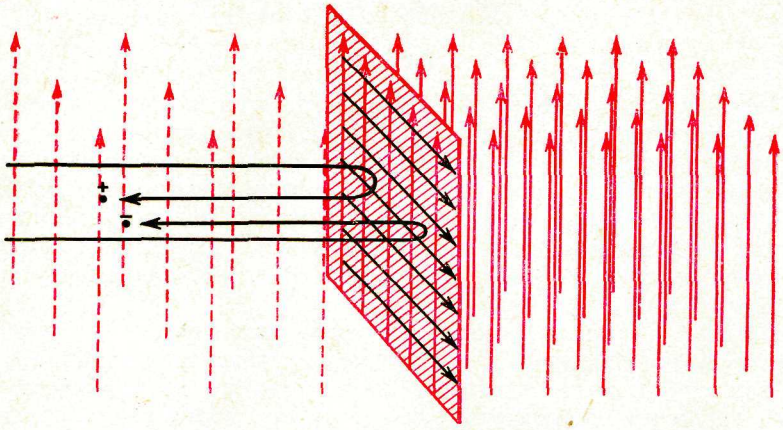

Рис. 1. Механизм сжатия, предложенный в 1931 г. С. Чепмэном и В. Ферраро, объясняет, как электрически нейтральное облако протонов и электронов (плазма), испущенное Солнцем во время солнечной вспышки, может сжать часть геомагнитного поля и таким образом создать магнитную бурю на Земле.

Когда облако плазмы впервые встречает внешнее магнитное поле Земли, отдельные протоны и электроны отражаются под действием силы, перпендикулярной к магнитному полю и направлению движения частиц. Движение большого числа протонов и электронов создает электрический ток (черные стрелки), который в свою очередь создает собственное магнитное поле (не показано на рисунке). Индуцированное поле уничтожает нормальное геомагнитное поле в облаке (слева) и усиливает нормальное поле в области между облаком и Землей (справа). Облако продолжает продвигаться до тех пор, пока его энергия не израсходуется на сжатие геомагнитного поля.

моментами визуального наблюдения солнечной вспышки и начала геомагнитной бури, они установили, что такое облако должно перемещаться в межпланетном пространстве со скоростью около 1000 *км/сек*.

Согласно модели, выдвинутой Чепмэном и Ферраро, в облаке плазмы индуцируется электрический ток, когда оно впервые встречает внешнее магнитное поле Земли; этот ток аналогичен току, индуцируемому в металлическом листе, когда он погружается в магнитное поле. В каждом из этих случаев для определения направления индуцированного тока применяется «правило правой руки» (рис. 1). Индуцированный таким образом в облаке плазмы ток будет в свою очередь создавать собственное магнитное поле, которое уничтожит нормальное геомагнитное поле в облаке и усилит нормальное поле в области между облаком и Землей. Облако будет продолжать продвигаться до тех пор, пока его импульс не будет израсходован на сжатие геомагнитного поля. Возникшая в результате граница останется в равновесном положении до тех пор, пока поток плазмы в облаке будет постоянным. Последовательные поверхности плазмы будут достигать границы и отражаться от нее.

Через несколько лет стало ясно, что плазма более или менее непрерывно испускается Солнцем (см. Э. Паркер, Солнечный ветер, УФН 84(1), 169(1964)). Солнечные вспышки и солнечные пятна, очевидно, соз-

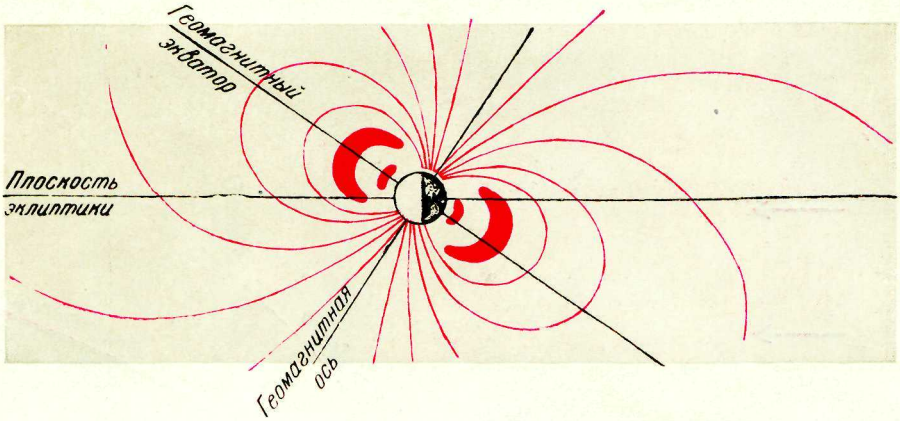

Рис. 2. Неискаженное поле диполя, аналогичное полю, создаваемому магнитным бруском, будет существовать вокруг Земли при отсутствии каких-либо внешних воздействий.

Такое геомагнитное поле будет простираться неопределенно далеко в межпланетное пространство, становясь все слабее с удалением от Земли. Густота магнитных силовых линий пропорциональна напряженности поля. Показаны внутренний и внешний радиационные пояса, которые состоят из высокоэнергичных протонов и электронов соответственно.

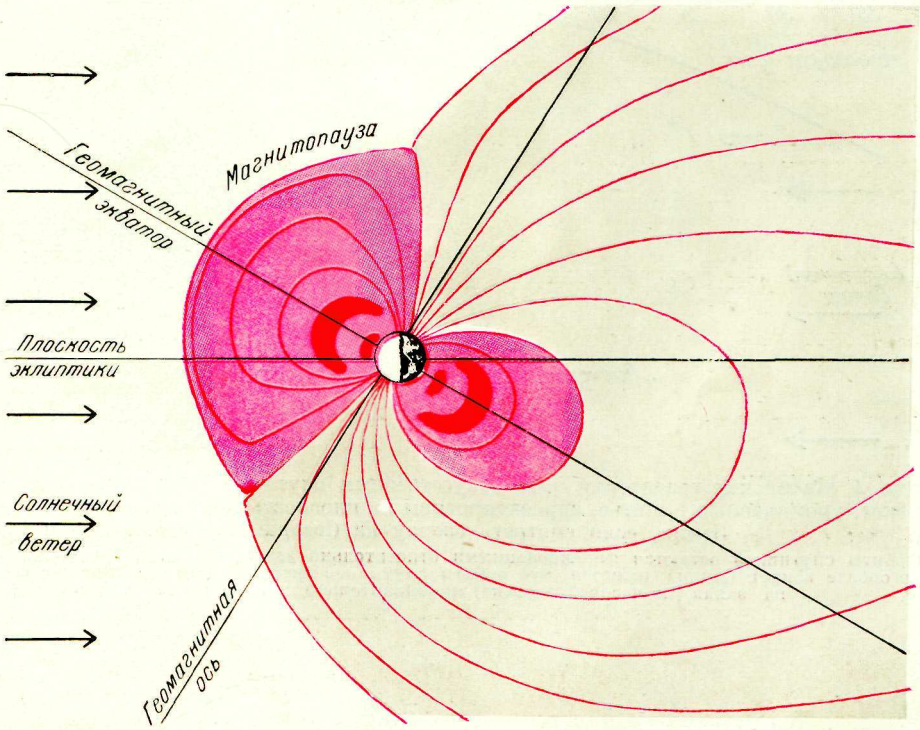

Рис. 3. Реальное геомагнитное поле искажено вследствие внешних воздействий, из которых основным является «ветер» электрически заряженных частиц, испускаемых Солнцем (стрелки).

В результате этого воздействия поле ограничено в пространстве определенным объемом, называемым магнитосферой. Магнитосфера окружена флуктуирующим, но дискретным граничным слоем — магнитопаузой. Внутренняя магнитосфера (окрашенная площадь) остается более или менее симметричной относительно магнитной полярной оси Земли. Солнечный ветер отклоняет линии полярного поля в направлении к хвосту на неосвещенной стороне Земли. На рисунке изображена магнитосфера для зимнего сезона в северном полушарии, когда угол между геомагнитной осью и солнечным ветром максимальный; в это время искажение магнитосферы также максимально.

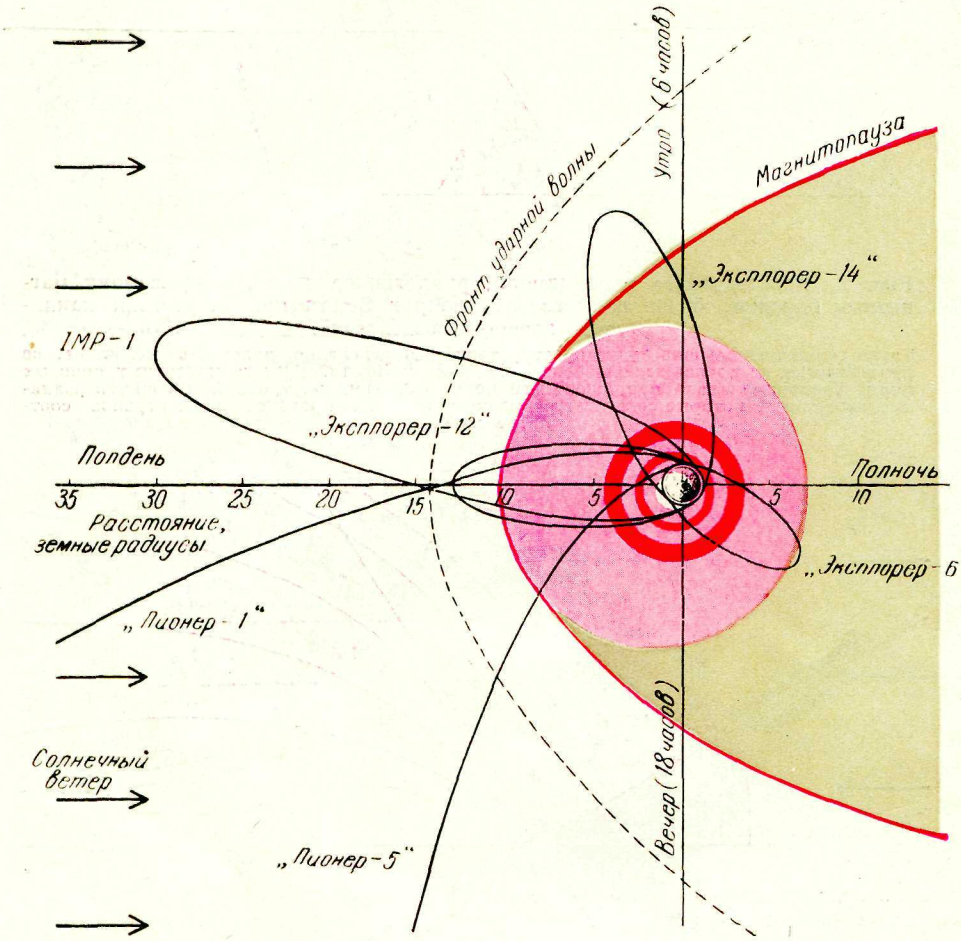

Рис. 4. Начальные траектории семи искусственных спутников Земли и космических ракет, упоминаемых в статье, спроектированы на плоскость географического экватора Земли, если смотреть сверху на Северный полюс.

Орбиты спутников остаются фиксированными относительно звезд, но когда Земля движется по орбите вокруг Солнца, кажется, что орбиты спутников вращаются вокруг Земли с востока на запад (по часовой стрелке) приблизительно на один градус в сутки

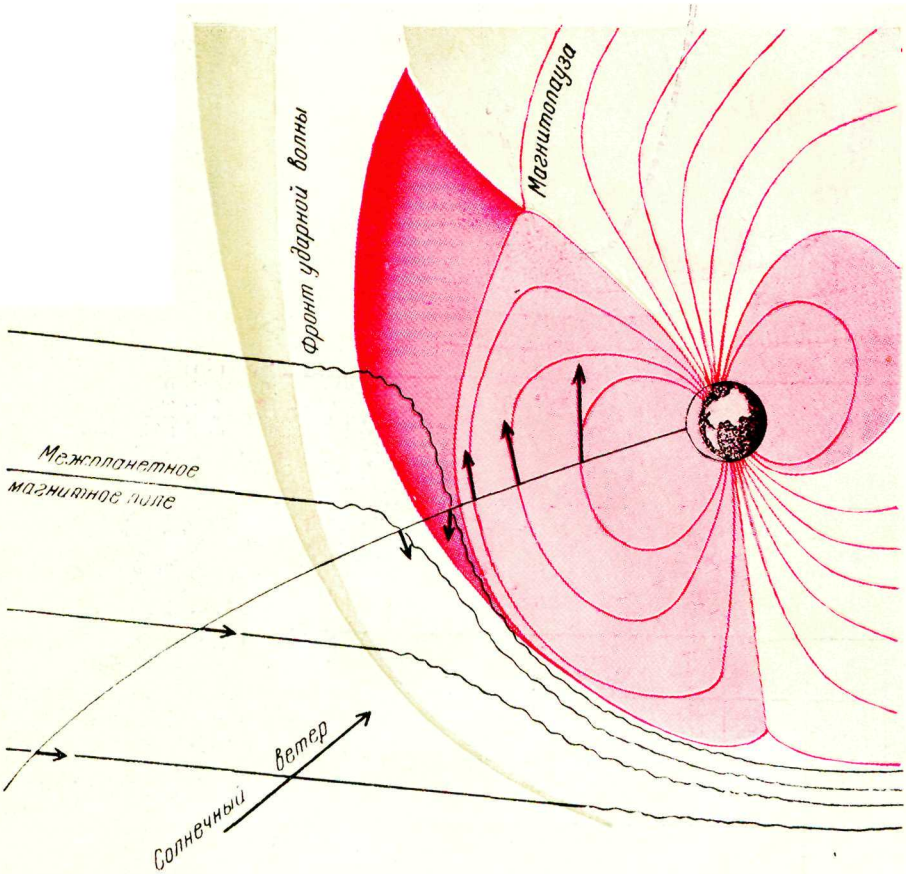

Рис. 5. Межпланетное магнитное поле сжимается и искажается при его движении вокруг магнитосферы в переходной области между магнитопаузой и фронтом ударной волны.

Протоны плазмы солнечного ветра движутся по спиралям вокруг силовых линий межпланетного поля и поэтому могут оказывать коллективное воздействие в этой области наподобие жидкости. Показана типичная траектория спутника, пересекающая магнитопаузу и фронт ударной волны. Стрелки вдоль траектории показывают направление и напряженность измеряемого поля.

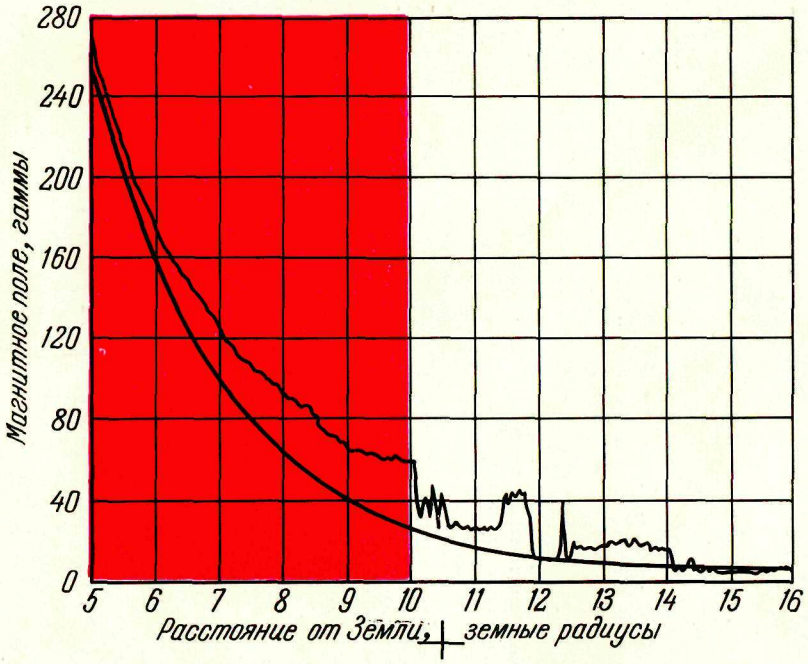

Рис. 6. Типичный пример измерений на спутнике напряженности геомагнитного поля на расстоянии от пяти до шестнадцати земных радиусов на освещенной Солнцем стороне Земли показан волнистой линией.

Плавная кривая — изменение напряженности гипотетического поля диполя. На расстояниях меньше пяти земных радиусов обе кривые плавно возрастают до значения около 50 000 гамм на поверхности Земли (1 гамма = 10^{-5} *гс*). Между пятью и десятью земными радиусами измеренное поле сильнее, чем предсказанное; на 10 земных радиусах, где располагается магнитопауза, напряженность измеренного поля приблизительно в два раза больше напряженности предсказываемого поля. За магнитопаузой наблюдается нерегулярное, флуктуирующее поле, простирающееся на 4—5 земных радиусов. Дальше располагается граница фронта ударной волны, а за ней начинается слабое межпланетное поле.

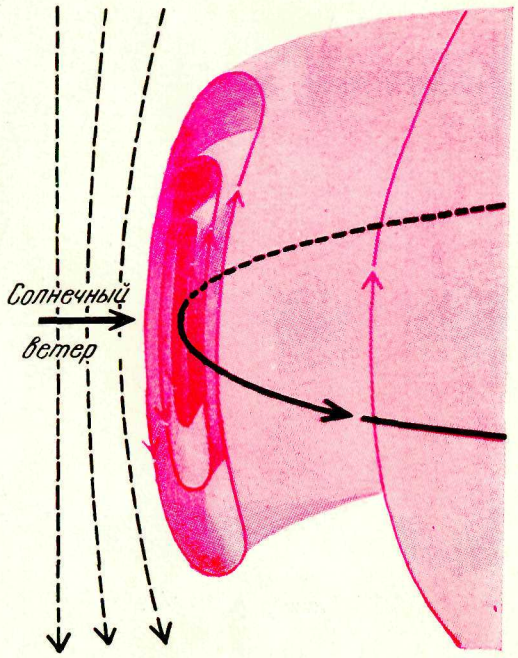

Рис. 7. Закрытая модель магнитосферы, полученная из модели Чепмэна — Ферраро, в которой, как предполагается, внутри магнитопаузы с запада на восток течет лентообразный электрический ток (черная кривая).

Если посмотреть на поперечное сечение, то можно увидеть, что магнитные силовые линии образуют петли вокруг этого токового слоя. В центре этих петель создаваемое токовым слоем магнитное поле уменьшается до нуля. Эта точка нулевого поля называется нейтральной точкой «0-типа». Межпланетное магнитное поле изображено черными стрелками.

дают более сильные потоки в обычно устойчивом ветре плазмы, и магнитопауза все время смещается под действием этих потоков. Некоторые подробности взаимодействия солнечной плазмы и геомагнитного поля содержатся в первоначальной модели Чепмэна и Ферраро, которая, как теперь ясно, не вполне верна. Тем не менее эта модель позволила сделать количественные предсказания относительно местоположения и формы магнитопаузы. Эти предсказания в общем хорошо согласуются с измерениями на спутниках. Поэтому модель продолжает оставаться очень полезной, как первое приближение к действительной картине.

Согласно первоначальной теории Чепмэна — Ферраро и последующим моделям, основанным на этой теории, давление солнечного ветра сдвигает геомагнитное поле ближе к Земле на освещенной стороне Земли и отклоняет силовые линии полярной области к хвосту на неосвещенной стороне Земли. Плазма наиболее эффективно сжимает магнитосферу в тех направлениях, где течение плазмы перпендикулярно к поверхности магнитопаузы. В наиболее простом случае, когда предполагается, что плазма течет радиально от Солнца, точка максимального сжатия находится на линии, соединяющей центры Земли и Солнца. При удалении от этой точки плазма встречает магнитопаузу под меньшими углами, и давление соответственно уменьшается (рис. 5). Давление становится равным нулю в точках, где течение плазмы касательно к магнитопаузе, т. е. вблизи утреннего и вечернего меридианов. Оценив плотность и скорость частиц солнечного ветра, можно предсказать, что магнитопауза должна располагаться на расстоянии между 5 и 10 земными радиусами от Земли вдоль линии Солнце — Земля, причем это расстояние увеличивается на 30—40% вблизи утреннего и вечернего меридианов (радиус Земли равен приблизительно 6400 *км*).

На неосвещенной стороне Земли, где солнечная плазма уже не сжимает магнитосферу, размер и форму магнитосферы предсказать труднее. Сначала предполагалось, что тепловое давление солнечной плазмы, создаваемое хаотическим движением индивидуальных частиц и одинаковое во всех направлениях, будет ограничивать хвост магнитосферы и что силовые линии, выходящие из полярных областей Земли, будут локализованы благодаря этому давлению в пределах нескольких десятков земных радиусов в антисолнечном направлении. Однако в большинстве более поздних моделей хвост магнитосферы простирается на бо́льшие расстояния на неосвещенной стороне Земли или вообще остается незамкнутым.

ДАННЫЕ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ

Первые измерения внешних областей магнитосферы были выполнены в 1958 г. аппаратурой, установленной на космической ракете «Пионер-1» (см. рис. 4). С помощью приборов, способных измерять составляющую магнитного поля, направление которой перпендикулярно к оси вращения спутника, Ч. Соннет и его коллеги нашли, что измеренное поле достаточно близко к невозмущенному дипольному полю на расстоянии 3—7 земных радиусов, но значительно сильнее, и сильно флуктуирует на расстояниях 12—14 земных радиусов. В точке, близкой к 14 земным радиусам, наблюдалось внезапное уменьшение напряженности поля. Типичные данные измерений напряженности магнитного поля на расстояниях 5—16 радиусов Земли приведены на рис. 6.

Через 2 года «Пионер-5» с аналогичной аппаратурой пересек внешнюю область магнитосферы вдоль меридиана, соответствующего 15 часам местного времени. Результаты оказались сходными с полученными

в первых полетах: постепенное уменьшение поля до 8 земных радиусов, сильное флуктуирующее поле за 10 земными радиусами и уменьшение до слабого, по-видимому, межпланетного поля на расстояниях 15—20 земных радиусов. Если уменьшение напряженности, наблюдавшееся за четырнадцатью земными радиусами, интерпретировать как магнитопаузу, то это расстояние будет значительно больше предсказываемого моделью Чепмэна — Ферраро.

В марте 1961 г. Г. Гопнер осуществил эксперимент с магнетометром на спутнике «Эксплорер-10», который был запущен за пределы области магнитосферы вдоль меридиана, соответствующего 21 часу местного времени. В этом эксперименте измерялись как напряженность, так и направление геомагнитного поля. Поле дальше восьми земных радиусов было искаженным, и представлялось, что силовые линии уходят от Земли, причем напряженность поля была выше предсказываемой. Однако поле оставалось практически постоянным вплоть до расстояния в 21 земной радиус, а затем его напряженность резко уменьшалась от 20 гамм до приблизительно 10 гамм (1 гамма = 10^{-5} *гс*). В этой точке направление поля также резко менялось, и детектор плазмы на космическом корабле впервые зарегистрировал плазму, имевшую большую скорость. Дальше 21 земного радиуса напряженность и направление поля продолжали сильно флуктуировать. Появление плазмы и резкие изменения поля являлись убедительным доказательством того, что космический корабль в этот момент проходил через магнитопаузу. В последующие моменты времени плазма появлялась и исчезала несколько раз; каждый раз отсутствие плазмы совпадало с появлением стабильного магнитного поля напряженностью около 20 гамм, направленного от Земли. Когда регистрировалась плазма, магнитное поле было более сильным и более неустойчивым, чем это ожидалось для межпланетного поля. Наиболее простым объяснением этих случаев является то, что спутник удалялся от Земли приблизительно параллельно протяженному хвосту магнитосферы и что магнитопауза совершала колебательные движения относительно спутника, отражая изменения солнечного ветра.

Позднее, в 1961 г., спутник «Эксплорер-12» был запущен на эллиптическую орбиту с апогеем, расположенным дальше 13 земных радиусов. Автор вместе с несколькими студентами подготовил для этого спутника эксперимент с магнетометром. Спутник, время жизни которого составляло 102 дня, совершал один оборот вокруг Земли за сутки, так что оказалось возможным провести обширные наблюдения внешней магнитосферы при различных солнечных и геомагнитных условиях. Сначала точка апогея находилась вблизи полуденного меридиана, но при движении Земли вокруг Солнца орбита спутника оставалась фиксированной в пространстве; в результате угол между большой осью орбиты и полуденным меридианом возрастал приблизительно на один градус в сутки в западном направлении.

Магнитопауза регистрировалась при многих прохождениях «Эксплорера-12» как внезапное большое изменение направления поля и соответствующее уменьшение его напряженности, причем отмечались их большие флуктуации. Было обнаружено, что напряженность поля в магнитосфере вблизи магнитопаузы приблизительно в два раза больше невозмущенного поля диполя; этот результат согласовался с механизмом сжатия в модели Чепмэна — Ферраро. Однако за пределами магнитопаузы поле не уменьшалось до нуля, как это предсказывает модель Чепмэна — Ферраро,— оно было сравнительно сильным (от 10 до 50 гамм) и в нем обнаруживались большие флуктуации как по напряженности, так и по направлению. Расстояние от магнитопаузы до Земли обычно составляло

около 10 земных радиусов вблизи полуденного меридиана, хотя и наблюдались значительные изменения этого расстояния ото дня ко дню. Минимальное расстояние, на котором наблюдалась магнитопауза, составляло 8,2 земного радиуса. При удалении от полуденного меридиана это расстояние увеличивалось, хотя флуктуации ото дня ко дню маскировали эту тенденцию. Через три месяца, когда спутник находился вблизи утреннего меридиана, магнитопауза наблюдалась редко, откуда следует, что она располагалась дальше 13 земных радиусов.

На «Эксплорере-14», запущенном в октябре 1962 г., также выполнялся эксперимент с магнетометром. У этого спутника точка апогея находилась на расстоянии 16 земных радиусов, и он первоначально располагался вблизи меридиана с местным временем 7 часов, но при движении Земли по орбите вокруг Солнца орбита спутника медленно смещалась в обратном направлении к хвосту магнитосферы. Так как в течение первых месяцев полета спутника магнитопауза регистрировалась только в редких случаях, она, по-видимому, бо́льшую часть времени находилась дальше 16 земных радиусов. Внешние области магнитосферы оказались более возмущенными, чем на освещенной Солнцем стороне Земли. Наблюдались значительные флуктуации напряженности и направления поля, но среднее направление было близким к предсказываемому моделью Чепмэна—Ферраро. Через месяц магнитопауза уже не наблюдалась и, как предполагалось, спутник в это время находился внутри хвоста магнитосферы.

В конце 1963 г. на эллиптическую орбиту был запущен спутник «IMP-1» с апогеем около 30 земных радиусов. Спутники этой серии оборудуются аппаратурой для исследования космических лучей, плазмы и магнитного поля в межпланетном пространстве, за пределами магнитосферы. Эксперимент с магнетометром на «IMP-1», подготовленный Н. Нессом, позволил провести первые убедительные измерения напряженности и направления межпланетного магнитного поля. Кроме того, спутник также дважды за каждые четверо суток пересекал магнитопаузу. Магнитопауза была обнаружена вновь на расстоянии около 10 земных радиусов вблизи полуденного меридиана, и расстояние это увеличивалось приблизительно до 14 земных радиусов вблизи утреннего меридиана. Высота апогея «IMP-1», равная 30 земным радиусам, позволила провести наблюдения магнитопаузы еще дальше утреннего меридиана. Так, например, вблизи меридиана, соответствующего 5 часам, магнитопауза в ряде случаев наблюдалась на расстоянии 16 земных радиусов.

СТРУКТУРА МАГНИТОПАУЗЫ

На основе всех этих измерений оказалось возможным достаточно уверенно установить, что магнитосфера простирается приблизительно до 10 земных радиусов на освещенной Солнцем стороне Земли и удаляется по крайней мере на 30 земных радиусов на неосвещенной стороне Земли. Толщина магнитопаузы, по-видимому, составляет менее 100 *км*. По сравнению с размером магнитосферы магнитопаузу можно представить себе наподобие кожуры яблока. В пределах этого тонкого граничного слоя напряженность геомагнитного поля резко уменьшается и направление поля меняется до 180°. Согласно модели Чепмэна—Ферраро внутри магнитопаузы с запада на восток течет лентообразный электрический ток. В сечении магнитные силовые линии образуют петли вокруг этого токового слоя (рис. 7). В центре этих петель магнитное поле, создаваемое токовым слоем, падает до нуля. Эта точка нулевого поля называется нейтральной точкой «0-типа». Существование такой структуры может быть подтверждено путем наблюдений изменений направления магнитного

поля, когда спутник проходит через токовый слой. Б. Соннеруп нашел доказательство петлевой структуры поля в магнитопаузе по данным спутника «Эксплорер-12». В других случаях, во время магнитных возмущений на Земле, он нашел, что направления поля в магнитопаузе противоположны направлениям, предсказываемым моделью Чепмэна—Ферраро.

ФРОНТ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

На ранних стадиях изучения магнитосферы предполагалось, что межпланетное магнитное поле пренебрежимо мало и что за магнитопаузой солнечная плазма не содержит магнитного поля. Однако последующие исследования солнечного ветра и солнечных космических лучей показали, что от Солнца до Земли простирается спиральное магнитное поле, напряженность которого вблизи Земли составляет 5—10 гамм. Измерения на «Эксплорере-10» и «Эксплорере-12» показали, что за магнитопаузой магнитное поле не исчезает, а флуктуирует между значениями от 10 до 50 гамм. На «Пионере-1» и «Пионере-5» также было зарегистрировано нерегулярное флуктуирующее поле на расстояниях от 10 до 20 земных радиусов. В этой «переходной области» слабое межпланетное поле, по-видимому, сжато и искажено каким-то образом из-за движения плазмы вокруг магнитосферы (см. рис. 5).

Единственным объяснением этого неожиданного факта, выдвинутым рядом теоретиков, является то, что при обтекании солнечной плазмы вокруг магнитосферы может возникать ударная волна аналогично тому, как образуется ударная волна при сверхзвуковом обтекании твердого тела сжимаемым газом. При этом ударная волна будет возникать в межпланетной среде на расстоянии 4—5 земных радиусов от магнитопаузы.

Как показано в обычной газовой динамике, такая ударная волна не образуется при обтекании препятствия, исключая случай, когда препятствие велико по сравнению со средним пробегом между столкновениями молекул газа внутри потока. Когда такое условие выполняется, молекулы действуют коллективно, как жидкость, а не как индивидуальные частицы. Однако течение солнечной плазмы вокруг магнитосферы не удовлетворяет этому условию; «средний свободный пробег» протонов плазмы между столкновениями, как следует из оценки, составляет 10^8 *км*, тогда как диаметр магнитосферы порядка 10^5 *км*.

Альтернативный механизм образования фронта ударной волны в солнечной плазме обусловлен наличием межпланетного магнитного поля. Протоны в солнечной плазме описывают окружности радиусом в несколько сотен километров вследствие вращения в межпланетном поле. При определенных обстоятельствах это расстояние можно считать аналогичным среднему свободному пробегу между столкновениями в обычном потоке газа. Таким образом, наличие межпланетного магнитного поля может быть причиной того, что частицы плазмы будут действовать коллективно, как жидкость.

Изменение характера поля, наблюдавшееся на расстоянии 14 земных радиусов на «Пионере-1» и между 15 и 20 земными радиусами на «Пионере-5», и было, очевидно, предполагаемым фронтом ударной волны. Спутники «Эксплорер-10» и «Эксплорер-12» не удалялись достаточно далеко за пределы магнитопаузы и не могли достичь этой второй границы. Спутник «IMP-1» с апогеем на расстоянии 30 земных радиусов неоднократно пересекал фронт ударной волны; в серии прохождений в конце 1963 г. и начале 1964 г. его данные позволили очертить не только положение магнитопаузы, но и положение второй границы магнитосферы — фронта ударной волны. Результаты, полученные на «IMP-1», хорошо согласуются с предсказан-

ными изменениями течения плазмы и свойств поля на фронте ударной волны. Было обнаружено, что магнитное поле между магнитопаузой и фронтом ударной волны сильнее, чем в межпланетном пространстве, а скорость солнечной плазмы меньше. Плазма уже не движется только в радиальном направлении от Солнца, а поступает в детекторы плазмы со всех направлений. Кроме того, в переходной области наблюдались электроны с энергиями в несколько тысяч электрон-вольт, тогда как электроны солнечного ветра лишь в редких случаях имеют энергии выше нескольких электрон-вольт. Отсюда можно предположить, что некоторая часть первоначальной кинетической энергии протонов плазмы передается электронам на фронте ударной волны.

ВНУТРЕННЯЯ ОБЛАСТЬ МАГНИТОСФЕРЫ

Измерения на спутниках показали, что давление солнечного ветра искажает магнитные силовые линии по обе стороны от магнитопаузы. Внутри, непосредственно вблизи магнитопаузы, где геомагнитное поле

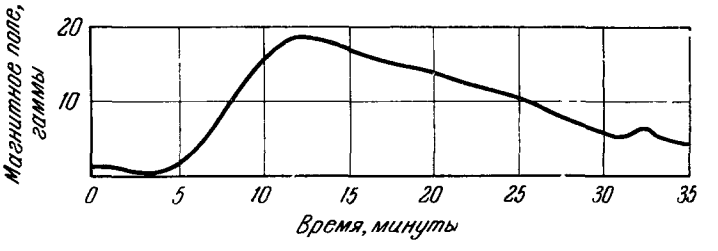

Рис. 8. Положительный «внезапный импульс»— часто наблюдаемое на поверхности Земли менее сильное магнитное возмущение.

Аналогичные импульсы, зарегистрированные на спутниках, начинались на 1—2 минуты раньше, чем соответствующие наземные импульсы, и имели немного бо́льшие амплитуды. Часто наблюдаются также отрицательные внезапные импульсы. Эти флуктуации напряженности геомагнитного поля, по-видимому, возникают вследствие внезапных сжатий или расширений магнитосферы, отражая увеличение или уменьшение давления солнечного ветра.

наиболее слабое, искажение велико, но даже вблизи Земли флуктуации магнитопаузы оказывают некоторое влияние на геомагнитное поле. Когда магнитопауза быстро перемещается, то в наиболее внешних силовых линиях и в плазме, связанной с этими линиями, возникают колебания. Эти колебания распространяются внутрь через заполненную плазмой магнитосферу как магнитогидродинамические волны (см. H. Alfven, Electricity in Space, Sci. American, May 1952). Было сделано заключение, что резкие сжатия или расширения всей магнитосферы ответственны за мировые флуктуации напряженности поля на поверхности Земли — так называемые «внезапные импульсы» (рис. 8). Недавно А. Нишида, обрабатывая данные «Эксплорера-12», обнаружил внезапные импульсы внутри магнитосферы между 5 и 10 земными радиусами, причем через 1—2 минуты соответствующие импульсы регистрировались на поверхности Земли. Это подтверждает заключение, что внезапные импульсы возникают вблизи магнитопаузы. Время запаздывания дает также грубую оценку средней скорости распространения магнитогидродинамических волн через магнитосферу.

Магнетометры на поверхности Земли регистрируют также периодические магнитные возмущения с периодами от долей секунды до нескольких минут. Предполагается, что эти возмущения также возникают во внешней магнитосфере. На высотах спутников наблюдались два типа долгопериодических магнитогидродинамических волн. Наиболее простым типом

является волна сжатия, подобная звуковой волне в воздухе. Волна распространяется поперек силовых линий поля и состоит из чередующихся зон сгущения и разрежения силовых линий; она наблюдается как синусоидальная волна напряженности поля с небольшой флуктуацией по направлению (или совсем без нее). Волны сжатия с амплитудами от 5 до 10 гамм наблюдались на спутниках, но до сих пор еще невозможно было отождествить эти волны с данными регистрации на поверхности Земли.

Долгопериодная магнитогидродинамическая волна второго типа распространяется в направлении, параллельном линиям поля. Вектор возмущения перпендикулярен к магнитному полю и вращается вокруг силовых линий при перемещении волны. Доказательство существования этих

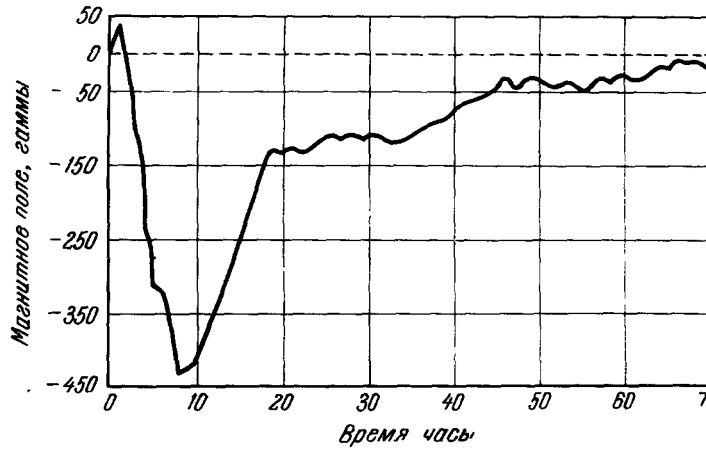

Рис. 9. Большая геомагнитная буря, зарегистрированная в Гонолулу 11 февраля 1958 г., обнаруживает четыре характерные фазы возмущений такого типа.

Во время начальной фазы бури, которая длилась около двух часов, напряженность магнитного поля на поверхности Земли увеличивалась приблизительно на 50 гамм относительно нормального уровня. Во время главной фазы напряженность поля быстро уменьшилась более чем на 400 гамм. Фаза быстрого восстановления закончилась через 18 часов после начала бури. Фаза медленного восстановления поля длилась в течение нескольких суток.

поперечных волн впервые получено при наземных измерениях в зонах полярных сияний. Эти волны были отождествлены по спутниковым измерениям П. Коулманом при обработке данных «Эксплорера-6», а затем с большей убедительностью В. Пателом, который обработал данные измерений полного вектора поля, полученные на «Эксплорере-12». Оба типа волн (волны сжатия и поперечные волны) недавно были зарегистрированы на «Эксплорере-14» с периодами от 20 до 45 минут и с амплитудами в 10 гамм. Огромный размер магнитосферы обусловливает возможность генерации и распространения магнитогидродинамических волн с исключительно большими периодами и соответствующими большими длинами волн. Магнитометрические измерения на спутниках позволяют исследовать эти необычные волны, которые не могут быть воспроизведены в ограниченных объемах лабораторий на поверхности Земли.

Предполагается, что магнитогидродинамические волны в магнитосфере оказывают значительное влияние на захваченные частицы, возможно, ускоряя и замедляя их или изменяя траектории этих частиц таким образом, что они уходят в атмосферу. Частицы, захваченные в изменяющихся внешних областях магнитосферы, обнаруживают большие флуктуации, в особенности во время магнитных возмущений.

Плотность энергии частиц, захваченных во внутренних радиационных поясах, также существенно меняется, иногда довольно быстро. Полное выявление связи между магнитогидродинамическими волнами и ускорением частиц требует наблюдения частиц всех энергий и волн всего диапазона частот. До сих пор это еще не достигнуто и остается одной из наиболее интересных и фундаментальных проблем исследования магнитосферы.

В своей модели Чепмэн и Ферраро попытались объяснить ослабление геомагнитного поля во время главной фазы магнитной бури (рис. 9) действием электрического тока протонов и электронов, охватывающих Землю

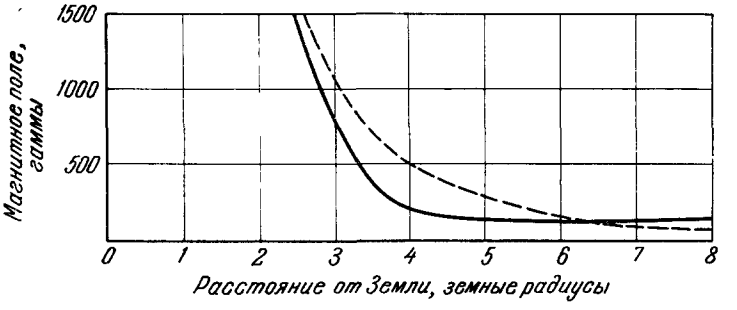

Рис 10. Кольцевой ток, окружающий Землю на расстоянии нескольких земных радиусов, создается в результате движения заряженных частиц, захваченных геомагнитным полем.

Главная фаза геомагнитной бури наблюдается тогда, когда число захваченных частиц или их энергия возрастает. Это приводит к уменьшению напряженности магнитного поля в области между током и Землей и к увеличению напряженности поля за пределами токового кольца. Напряженность поля перед бурей показана штриховой линией, сплошной линией изображен вычисленный эффект поля кольцевого тока.

по окружности на расстоянии нескольких земных радиусов. В настоящее время предполагается, что этот кольцевой ток создается движением заряженных частиц, захваченных геомагнитным полем. Главная фаза геомагнитной бури наблюдается, когда число захваченных частиц или их энергия возрастает. Это приводит к уменьшению напряженности магнитного поля в объеме между током и Землей, но в области выше тока напряженность поля должна возрастать (рис. 10).

Первые измерения Гоннера на спутнике «Вангард-3» показали, что токовая система, ответственная за понижение напряженности поля в период главной фазы, располагалась на расстоянии больше двух земных радиусов. Измерения Э. Смита на «Эксплорере-6» показали, что ток располагается дальше четырех земных радиусов на неосвещенной стороне магнитосферы. Во время нескольких прохождений этого спутника на расстоянии между шестью и восемью земными радиусами наблюдалось значительное понижение напряженности поля ниже предсказанного значения, соответствующее изменениям поля, ожидаемым вблизи центра кольцевого тока. Во время наблюдений на «Эксплорере-12» с августа по декабрь 1961 г. наблюдалось несколько магнитных бурь и не было обнаружено ослабления поля в объеме между магнитопаузой и четырьмя радиусами Земли. На расстоянии четырех радиусов Земли было замечено, что напряженность поля возрастает во время главной фазы для ряда бурь одновременно с уменьшением поля на поверхности Земли. Отсюда определенно следует, что кольцевой ток в это время располагался между двумя и четырьмя радиусами Земли на освещенной стороне магнитосферы.

До сих пор в магнитосфере не были обнаружены потоки частиц достаточно интенсивные, чтобы создать регистрируемое на Земле уменьшение напряженности поля во время главной фазы бури. Л. Дэвис зарегистри-

ровал на спутнике «Эксплорер-12» очень интенсивный поток протонов с энергиями больше 10^5 *эв*. Эти протоны находились на расстоянии между двумя и четырьмя земными радиусами. Во время бури 30 сентября 1961 г. Дэвис наблюдал возрастание потока протонов в 3 раза относительно уровня спокойного периода. Это увеличение сопровождалось ростом напряженности магнитного поля на расстоянии около четырех земных радиусов, отмеченным на «Эксплорере-12». Поток частиц, обнаруженных Дэвисом, очевидно, еще недостаточно интенсивен, чтобы создать наблюдаемое уменьшение поля во время главной фазы; кроме того, еще большее число частиц должно иметь энергии меньше регистрировавшихся.

На «Эксплорере-14» были выполнены измерения в период очень низкой солнечной активности глубоко в хвосте магнитосферы. Орбита в январе 1963 г. располагалась вблизи меридиана с местным временем 1 час, на противоположной стороне хвоста, изученной на спутнике «Эксплорер-6», на несколько лет раньше. В нескольких случаях на расстоянии пяти — восьми земных радиусов наблюдалось ослабление напряженности поля ниже предсказываемого значения. Меньшие значения были получены только тогда, когда спутник проходил очень близко от плоскости геомагнитного экватора. Интенсивный поток низкоэнергичных электронов наблюдал также в этой области Л. Франк с помощью этого же спутника. Так как магнитная активность была низкой (не было заметной магнитной бури в течение нескольких месяцев до этих измерений), представляется, что поток низкоэнергичных частиц и ослабленная область поля вблизи геомагнитного экватора являются постоянно существующими особенностями хвоста магнитосферы.

С. Акасофу высказал предположение, что некоторые особенности главной фазы больших магнитных бурь требуют наличия двух областей электрических токов. Первая часть главной фазы состоит из максимального ослабления поля и довольно быстрого восстановления после достижения минимального значения. После быстрого восстановления напряженность поля продолжает возрастать, но более медленно: часто проходит несколько суток, прежде чем достигается нормальный уровень. Возможно, существуют две токовые системы, из которых одна распадается быстро, а другая в течение более длительного периода. Ослабление поля, наблюдавшееся между пятью и восемью земными радиусами на «Эксплорере-14», может обусловливаться более или менее постоянным током, созданным большим количеством низкоэнергичных электронов. Во время магнитных бурь количество частиц может возрасти, и тогда поле станет еще слабее. Существование этой области частиц, даже в период сравнительно низкой магнитной активности, позволяет предположить, что ток, обусловленный этими частицами, частично может быть ответственным за фазу медленного восстановления больших магнитных бурь. Высказывалось предположение, что полярные сияния возникают в результате возбуждения молекул атмосферы на высотах больше 100 *км* заряженными частицами, высыпающимися из радиационных поясов. В 1957 г. К. Мак-Илвейн обнаружил электроны и небольшое количество протонов с помощью аппаратуры, которая запускалась на ракетах в область видимых дуг полярного сияния. Б. О'Брайн с помощью спутников серии «Инджун», которые запускались на низкие полярные орбиты, наблюдал частицы, опускавшиеся до высот полярных сияний во время их появления. Во внешних областях магнитосферы потоки частиц сильно меняются ото дня ко дню и магнитопауза совершает быстрые колебания в радиальном направлении.

В таком случае представляется вполне правдоподобным, что излучение полярных сияний как-то связано с этими менее стабильными внешними областями магнитосферы. К сожалению, измеренное количество частиц

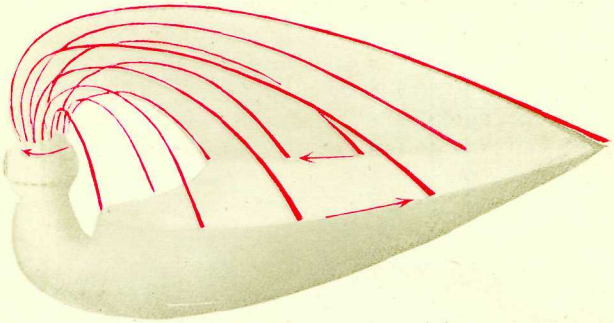

Рис. 11. Конвекция плазмы внутри магнитосферы изображена в виде модели «замкнутого хвоста».

Плазма движется вдоль хвоста магнитосферы и возвращается обратно к центру хвоста, увлекая за собой силовые линии полярной области. Концы линий поля, которые связаны с зонами полярных сияний на Земле, создают в полярных областях ионосферные электрические токи. Движение плазмы указано цветными стрелками в области хвоста, цветная стрелка на Земле указывает на соответствующее движение концов силовых линий поля в полярной области. Черная стрелка показывает направление вращения Земли.

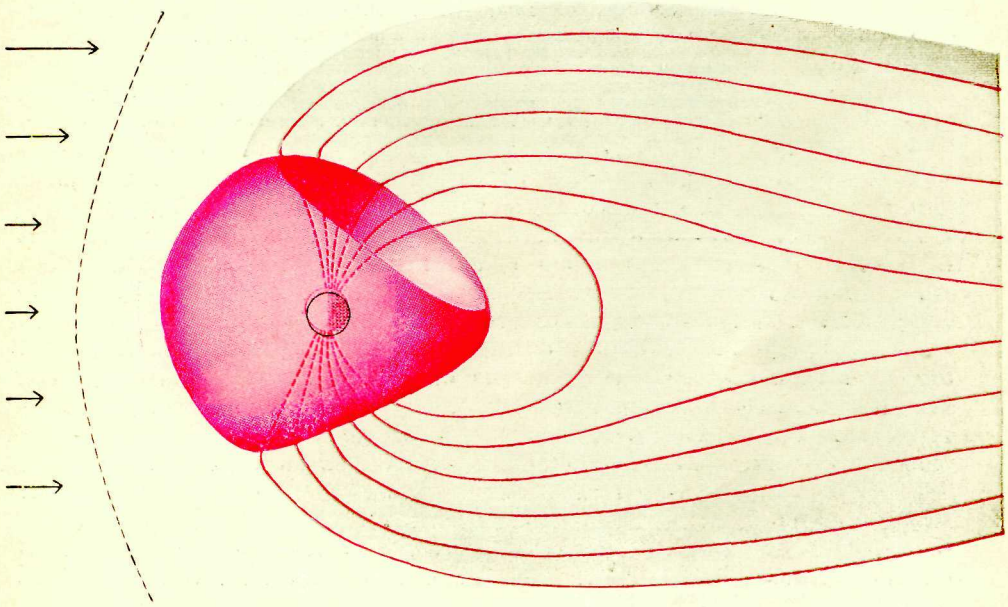

Рис. 12. Трехмерное изображение магнитосферы показывает характерную форму внутренней магнитосферы (окрашено), которая содержит низкоэнергичные захваченные частицы.

Силовые линии, возникающие в северной и южной полярных шапках, выходят из полости внутренней магнитосферы и остаются в хвосте магнитосферы. В моделях, развитых в последнее время, хвост простирается на большое расстояние на неосвещенной стороне Земли и, возможно, остается открытым.

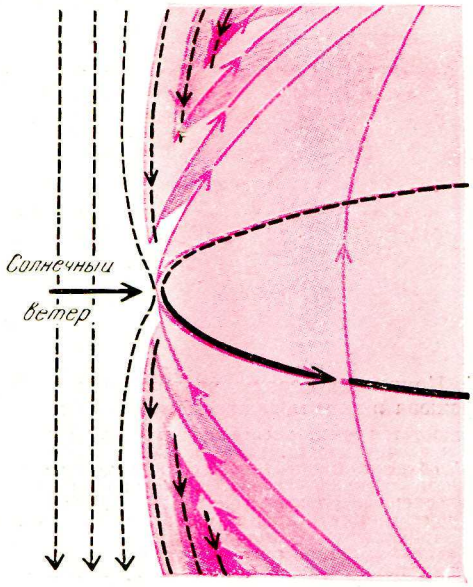

Рис. 13. Открытая модель магнитосферы, впервые предложенная Дж. Данжи в 1961 г.

Если бы межпланетное магнитное поле было антипараллельно земному полю на границе атмосферы, силовые линии, подходящие к Земле из межпланетного пространства, могли бы соединиться с внешними линиями магнитосферы в нейтральной точке «Х-типа» в магнитопаузе. Межпланетное магнитное поле изображено черными стрелками.

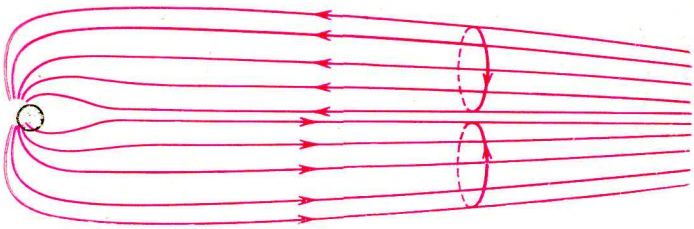

Рис. 14. «Двухцилиндрический хвост», образующийся на большом расстоянии от Земли, предсказывается моделью, которая недавно предложена А. Десслером.

Линии полярного поля, возникающие выше линии нейтральной точки в каждом полушарии, образуют при вращении Земли границу каждой трубки силовых линий поля в хвосте магнитосферы. Линии из северной полярной области направлены к Земле; линии южной полярной области направлены от Земли. Таким образом, плазма солнечного ветра имеет прямой доступ в зоны полярных сияний.

во внешних областях должно быть израсходовано в течение нескольких минут, чтобы обеспечить поток, необходимый для поддержания полярного сияния. Приходящая солнечная плазма дает значительно более высокую плотность частиц, если эти частицы могут каким-либо образом проникать внутрь магнитосферы. Энергия электронов солнечного ветра — всего лишь несколько электрон-вольт, т. е. значительно меньше, чем энергия электронов полярных сияний.

Электроны с энергиями в несколько тысяч электрон-вольт были обнаружены в переходной области Дж. Фрименом по данным «Эксплорера-12», а позже — в экспериментах на спутнике «IMP-1». Частицы требуемой энергии, по-видимому, имеются непосредственно за магнитопаузой. Нейтральные точки на фронтальной поверхности магнитосферы могут служить местами входа этих электронов в зону полярных сияний, так как вычисленные силовые линии нейтральных точек достигают Земли вблизи (но немного выше) зоны полярных сияний на полуденном меридиане. Однако полярные сияния на неосвещенной стороне Земли не объясняются вхождением электронов необходимых энергий на освещенной стороне. В замкнутой, каплеобразной магнитосфере силовые линии из ночной части зоны полярных сияний уходят глубоко в хвост магнитосферы.

НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ МОДЕЛИ

Модели магнитосферы должны объяснить значительное количество экспериментальных данных. Освещенная Солнцем сторона магнитосферы вблизи экватора экспериментально хорошо изучена. Вытянутые на большое расстояние линии поля в хвосте магнитосферы наблюдались на спутниках «Эксплорер-10», «Эксплорер-14» и «IMP-1». Измерения на «Эксплорере-14» и «IMP-1» показывают, что характеристики хвоста магнитосферы определяются солнечным ветром и что хвост симметричен не только относительно плоскости геомагнитного экватора, но и еще в большей степени относительно продолжения линии Солнце — Земля. Результаты «Эксплорера-10» и «IMP-1» позволяют заключить, что хвост магнитосферы простирается не менее чем на 40 земных радиусов. Несмотря на большое количество проведенных измерений, полярная область и удаленная часть хвоста остаются мало исследованными, поэтому для этих районов различные модели дают разные результаты. Завершенные модели должны объяснить две наиболее важные проблемы магнитосферы — полярные сияния и магнитные бури.

Наиболее простая модель, упоминавшаяся выше, предсказывает каплеобразную форму магнитосферы с довольно коротким хвостом, ограниченным тепловым давлением солнечной плазмы (рис. 11). Геомагнитное поле со всех сторон ограничено магнитопаузой, ограничивающей доступ солнечной плазмы. Силовые линии магнитного поля полярных областей всегда остаются на неосвещенной стороне Земли. Силовая линия, исходящая от северной нейтральной точки в плоскости геомагнитной полярной оси и линии Солнце — Земля, проходит по поверхности хвоста магнитосферы на полуночный меридиан и возвращается к нейтральной точке в южном полушарии. В 12 часов эта же линия следует по значительно более короткому пути во внутреннюю часть хвоста магнитосферы. Все линии, возникающие на более высоких широтах, в полярной шапке остаются внутри хвоста магнитосферы и никогда не достигают магнитопаузы. Линии, которые возникают на широтах ниже нейтральной точки, вращаются вместе с Землей, вычерчивая характерную форму внутренней магнитосферы (рис. 12). Внутренняя магнитосфера стабильна и содержит захваченные частицы. Полярные линии пронизывают полость внутренней

магнитосферы (см. рис. 12). Разработанные в последнее время модели согласуются с этой простой схемой для освещенной солнцем стороны магнитосферы и для ее внутренней, тороидальной части. Эти модели не могут дать правильного ответа о форме хвоста или его протяженности.

В отличие от модели замкнутой магнитосферы, Дж. Данжи в 1961 г. предположил, что при определенных условиях межпланетное магнитное поле может соединяться с полем Земли. Согласно Данжи это может происходить в тех случаях, когда межпланетное поле антипараллельно земному полю на границе магнитосферы. Тогда линии поля, приходящие к Земле из межпланетного пространства, могут быть связаны с внешними линиями магнитосферы в нейтральной точке «Х-типа» в магнитопаузе (рис. 13). После возникновения такой связи силовые линии внешней части магнитосферы и связанная с ними плазма будут отжиматься в глубь магнитосферы набегающим потоком солнечной плазмы. Эта модель была предложена для объяснения некоторых загадочных явлений, наблюдавшихся в полярных областях даже в магнитоспокойные периоды. Геомагнитное поле в полярных областях часто бывает возмущенным, и для объяснения особенностей этих полярных возмущений постулировалась специальная система ионосферных электрических токов. Электрические токи этой системы текут с востока на запад вдоль зоны полярных сияний на утренней стороне и с запада на восток на вечерней стороне; обратно ток течет через полярную шапку. В модели Данжи по линиям полярного поля плазма проникает в глубь магнитосферы. Возвращение плазмы к границе магнитосферы происходит вдоль силовых линий, связанных с зоной полярных сияний. Плазма движется по линиям поля вниз до ионосферных высот и создает полярные ионосферные токи.

Модель, предложенная У. Аксфордом и К. Хайнсом, описывает аналогичное течение плазмы через магнитосферу, но связывает это с вязким взаимодействием внешней плазмы, текущей за пределами магнитосферы, и с плазмой, находящейся внутри магнитосферы. В обеих моделях плазма возвращается к Земле через центр хвоста.

А. Десслер недавно выдвинул модель, в которой хвост на больших расстояниях разделяется на две изолированные трубки магнитных силовых линий (рис. 14). Линии, выходящие из Северного полюса, направлены к Земле, а линии, выходящие из Южного полюса, направлены от Земли. Силовые линии, выходящие из зон полярных сияний, образуют границу этих трубок; таким образом плазма солнечного ветра может прямо проникать в зоны полярных сияний. Электроны солнечного ветра, ускоренные в переходной области до энергий, достаточных для возбуждения полярных сияний, могут свободно двигаться вдоль граничных силовых линий в верхние слои земной атмосферы.

В большинстве современных моделей некоторые черты являются спекулятивными, тогда как другие основаны на экспериментальных данных. Дальнейший анализ уже имеющихся данных наблюдений на спутниках, а также постановка новых экспериментов в космическом пространстве позволят заполнить ряд пробелов в наших знаниях и уменьшить выбор возможных моделей. В то же время магнитосфера продолжает оставаться уникальной лабораторией для исследования крупномасштабных взаимодействий заряженных частиц и магнитных полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. O. Hines, Science **141** (No 3576), 130 (1964).
2. James A. Van Allen, Sci. American **200** (3), 39 (1959).
3. Space Physics (ed. by Donald P. Le Galley and Alan Rosen), J. Wiley, N. Y., 1964.