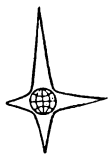




СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР



ИЗДАТЕЛЬСТВО

«М И Р»

THE SOLAR WIND

*Proceedings of a Conference
held at
The California Institute of Technology
Pasadena, California, USA, April 1—4, 1964*

Edited by R. J. Mackin, M. Neugebauer

Symposium Publications Division
Pergamon Press
Oxford — London — Edinburgh — New York
Toronto — Paris — Frankfurt
1966

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР

Под редакцией Р. Дж. Маккина и М. Нейгебауэр

Перевод с английского

И. В. Ковалевского

Под редакцией

Ю. Д. Калинина

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» • МОСКВА 1968

Солнечный ветер — это поток быстрых частиц, постоянно выбрасываемых Солнцем и заполняющий все межпланетное пространство. Этот ветер определяет условия радиосвязи с космическими кораблями, форму кометных хвостов и протяженность солнечной короны.

В книге «Солнечный ветер» нашли всестороннее освещение явления, наблюдаемые в межпланетной среде, теория межпланетной плазмы, происхождение солнечного ветра и солнечной короны, а также взаимодействие солнечного ветра с кометами, Луной и планетами.

Подробно изложены результаты, полученные на спутнике «ИМП-1» («Эксплорер-18») и космическом корабле «Маринер-2» при полете к Венере.

Книга рассчитана на специалистов по космическим исследованиям — как теоретиков, так и экспериментаторов, астрономов, радиоастрономов, геофизиков, специалистов по распространению радиоволн, дальней радиосвязи и радиолокации.

*Редакция космических исследований,
астрономии и геофизики*

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Уже более 10 лет физика космического пространства основывается на прямых измерениях, проводимых при помощи искусственных спутников Земли и межпланетных исследовательских станций. Не касаясь всех многочисленных научных и практических аспектов этой бурно развивающейся науки, надо отметить, что выводы космической физики имеют исключительно большое значение для проблемы Солнце — Земля. Научная и практическая значимость последней проблемы вряд ли нуждается в пояснениях.

Давно известно, что многие геофизические явления определяются наличием корпускулярного излучения Солнца и существованием магнитного поля у Земли. К числу этих явлений относится геомагнитная активность — геомагнитные бури, возмущения ионосферы, влияющие на распространение радиоволн, полярные сияния, различные вариации космических лучей и т. д. По данным, полученным с Земли задолго до того, как стали возможны прямые измерения в межпланетном пространстве, было установлено, что корпускулярное излучение Солнца распространяется в форме отдельных потоков. Основным доводом в пользу такого заключения послужила тенденция к 27-дневной повторяемости магнитных возмущений. Многие вопросы, при этом оставались неясными, в том числе механизм генерации потоков на Солнце; внутреннее строение потоков, в частности их состав; распределение в них концентрации, скорости и температуры; изменения, происходящие в потоках при их движении от Солнца до орбиты Земли, и т. д. Кроме того, не учитывалась роль магнитных полей активных образований на Солнце в формировании потоков и возможное влияние магнитных полей на процессы в уже сформировавшемся корпускулярном потоке.

Новая проблема возникла тогда, когда прямые измерения обнаружили непрерывное радиальное движение от Солнца

плазмы с замороженными магнитными полями — солнечный ветер. Параметры солнечного ветра, согласно современным данным, таковы: радиальная скорость $\sim 3 \cdot 10^7$ см/сек, концентрация ~ 10 см⁻³ и напряженность магнитного поля ~ 5 —8 γ ($1 \gamma = 10^{-5}$ э). Чтобы оценить значение этого открытия для геофизики, достаточно указать, что именно потому, что существует солнечный ветер, геомагнитное поле не безгранично, а заключено в сравнительно небольшом объеме околоземного космического пространства — магнитосфере. Зондирование искусственными спутниками Земли околоземного пространства позволило к настоящему времени надежно установить, что граница магнитосферы находится на расстоянии $10 R_{\oplus}$ ($R_{\oplus}$ — радиус Земли) от центра Земли по направлению к Солнцу, неопределенно далеко в противоположном направлении, а в направлениях, касательных к орбите Земли, удалена от ее центра на $\sim 15 R_{\oplus}$.

О существовании непрерывного радиального движения солнечной плазмы от Солнца подозревали давно (начиная с работы Бирмана 1951 г. по исследованию комет). По-видимому, впервые плазма и магнитное поле вне магнитосферы были измерены в сентябре 1959 г. на 2-й советской космической ракете. Однако по этим измерениям в то время не было сделано уверенного вывода о существовании в межпланетной плазме магнитного поля неземного происхождения. Поэтому первым экспериментом, данные которого надежно доказали существование межпланетного магнитного поля, считается американский эксперимент на межпланетной станции «Пионер-5», запущенной в марте 1960 г.

Вопрос о том, чем отличается солнечный ветер от солнечных корпускулярных потоков, нельзя считать выясненным до конца. Это придает проблеме солнечного ветра особенно большую актуальность.

Первым экспериментом, доставившим обширный материал для изучения солнечного ветра, был полет исследовательской станции «Маринер-2» к Венере в 1962 г. Обсуждение полученных этой станцией данных о солнечном ветре и связанных с ним геофизических явлениях, а также о взаимодействии солнечного ветра с Луной и кометами и явилось первоначальной целью конференции, созванной в апреле 1964 г. По существу, это пер-

вая и пока единственная конференция, посвященная исключительно проблеме солнечного ветра. На конференции, кроме данных «Маринера-2», были рассмотрены данные, полученные на других американских космических аппаратах: искусственных спутниках Земли «Эксплорер-12» и «Эксплорер-18» («ИМП-1»). В конференции участвовало только 80 человек, среди которых не было ни одного советского ученого. Поэтому настоящая книга дает первую возможность подробно ознакомиться с материалами конференции. Ее результаты представляют значительный интерес, несмотря на то что после полета «Маринера-2» был осуществлен ряд важных новых экспериментов и были получены данные, не известные ко времени конференции.

Состоялось всего пять заседаний, каждое из которых было посвящено одному из аспектов проблемы (экспериментальные данные, теория явлений в межпланетной плазме, происхождение солнечного ветра, солнечный ветер и магнитосфера, взаимодействие ветра с кометами и Луной). Кроме докладов, прочитанных на конференции, в книге приводятся обсуждения, сопровождавшие доклады. Своей содержательностью обращают на себя внимание обсуждения докладов Несса и Бриджа (экспериментальные данные), Дэвиса (модели межпланетных полей и движения плазмы), Паркера (проникновение галактических космических лучей в солнечную систему), Эксфорда, Данжи и Петчека (гипотезы взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой), а также докладов Лайона, Несса и Мида (фактические данные и расчеты формы границы магнитосферы и переходной области).

На конференции впервые уверенно было установлено, что солнечная плазма между орбитами Венеры и Земли имеет следующие характеристики: скорость (в направлении от Солнца) $(3-8) \cdot 10^7$ см/сек, концентрация $0,2-80$ см⁻³ (средняя $5,5$ см⁻³), температура протонов $3 \cdot 10^4-6 \cdot 10^5$ °К (средняя $1,5 \cdot 10^5$ °К), напряженность магнитного поля $1-10$ γ (средняя 4 γ), отношение концентрации α-частиц к концентрации протонов порядка $0,046$, температура α-частиц в 4 раза выше температуры протонов.

Эксперименты, осуществленные после конференции (в частности, на советских спутниках «Электрон-2» и «Электрон-4»,

«Луна-10» и др. и на американских спутниках серий «Эксплорер», «Пионер», «ОГО» и на «Маринере-4», а также на спутниках серии «Вела»), не привели к существенному изменению выводов о характере явлений, обсуждавшихся на конференции. Эти более поздние эксперименты расширили и уточнили сведения о процессах в межпланетном пространстве, в частности, позволили надежно установить секторный характер межпланетного магнитного поля (работы Уилкоккса и Несса), подтвердили существование шлейфа, или «хвоста», земной магнитосферы (теория этого вопроса обсуждалась на конференции; последние эксперименты позволяют утверждать, что длина шлейфа превышает радиус орбиты Луны). Непосредственные наблюдения зарегистрировали, что солнечный ветер распространяется за пределы земной орбиты (это следует из данных «Маринера-4»). Основные научные выводы конференции до сих пор не потеряли своей ценности.

Библиография каждой главы дополнена работами последних лет (помечены звездочками), в том числе трудами советских ученых. При переводе исправлены замеченные опечатки и ошибки оригинала.

Перевод книги будет полезен специалистам в области астрономии, космической физики и геофизики.

Ю. Д. Калинин

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРОВ

Конференция Лаборатории реактивных двигателей по солнечному ветру, которая состоялась с 1 по 4 апреля 1964 г., была первоначально организована для того, чтобы ознакомить специалистов по солнечному ветру с анализом результатов различных видов наблюдений на «Маринере-2» в межпланетном пространстве. Значение конференции чрезвычайно возросло благодаря запуску и успешному функционированию спутника «ИМП-1» («Эксплорер-18»).

Цель организаторов конференции состояла в том, чтобы содействовать подробному обсуждению различных аспектов проблемы солнечного ветра специалистами. Поэтому число участников было ограничено и количество официальных докладов сведено до минимума. На каждом заседании были представлены один-два специально подготовленных обзорных доклада. Остальные доклады (некоторые самопроизвольно возникли на конференции) были регламентированы. В результате свободная и непринужденная дискуссия стала главной характерной чертой конференции.

Участники представляли 27 различных научных институтов 4 стран. Особенно важно то, что среди них были как теоретики, так и экспериментаторы, специалисты по космической физике, астрофизике, радиоастрономии, физике Солнца, физике плазмы и аэродинамике. Один из наиболее значительных результатов конференции состоит в том, что она способствовала более глубокому пониманию физики явлений благодаря обмену мнениями между учеными, придерживающимися совершенно различных точек зрения.

Эта книга была подготовлена по стенограммам, хотя некоторые докладчики представили рукописи. Иллюстрации были приготовлены по диапозитивам, показанным на конференции, и диаграммам, начерченным на доске выступавшими. К сожалению, пришлось опустить из книги превосходное выступление Х. Зирина, и, разумеется, мы не могли воспроизвести сопровождавший его кинофильм о явлениях на поверхности Солнца. Некоторые комментарии выступавших, которые говорили неразборчиво, полностью потеряны.

В некоторых случаях материал был перестроен, чтобы он стал более ясным и логичным. Были сделаны ссылки всюду, где

они казались подходящими. Выступавшим была дана возможность просмотреть рукопись на последней стадии издания и внести новейшую информацию; существенные изменения первоначального материала указаны в сносках. Мы надеемся, что число опечаток незначительно, однако за все имеющиеся несем полную ответственность.

Главная заслуга в организации и проведении конференции принадлежит энергии и упорству Дэвиса. Конференция достигла успеха благодаря деятельности Организационного комитета. Мы благодарим членов этого комитета: Л. П. Блока (Королевский технологический институт и Лаборатория реактивных двигателей), Х. С. Бриджа (Массачусетский технологический институт), Л. Дэвиса (Калифорнийский технологический институт), Р. Люста (Институт физики и астрофизики Макса Планка), Р. Дж. Маккина (Лаборатория реактивных двигателей), Е. Н. Паркера (Чикагский университет), К. У. Снайдера (Лаборатория реактивных двигателей).

Наконец, мы хотим выразить благодарность Р. М. Ван Бюрену, который подготовил рукописи к публикации.

*Р. Дж. Маккин,
М. Нейгебауэр.*

Лаборатория реактивных двигателей,
Пасадена, Калифорния,
1 июля 1964 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ С. ЧЕПМЕНА

Конференция, результаты которой изложены в этой книге, была посвящена различным явлениям, возникающим в основном на Солнце и происходящим в межпланетном пространстве и в окрестностях Земли. Рассмотрены два типа данных: о *веществе*, которое находится в этих областях, — солнечной плазме, Луне, космических лучах, кометах — и свойствах этого вещества (например, плотность, скорость, направление движения, состав и температура солнечной плазмы); о *магнитном поле* — его напряженности, направлении (например, степень однородности или неоднородности) и его изменениях во времени. Приводятся данные наблюдений (наиболее надежные, хотя еще несовершенные и неполные), полученные приборами, установленными на таких космических аппаратах, как «Маринер-2» и спутниках серии «Эксплорер», особенно на «ИМП-1». Эти данные сравниваются с геомагнитными данными и с данными о полярных сияниях, полученными на поверхности Земли. Магнитные данные представлены либо в форме описания токовой системы полярной магнитной бури, либо в форме бартельсовских планетарных 3-часовых индексов K_p , которые являются мерой активности геомагнитных изменений, вызванных солнечным корпускулярным воздействием на Землю.

1. Солнечный ветер

Измеренные магнитные поля — это поля на Солнце (гл. 11), поля, уносимые от Солнца ионизованным газом (гл. 2, 3 и 6), или магнитное поле ядра Земли, видоизмененное волновой и корпускулярной радиацией Солнца. Внешние и внутренние поля взаимодействуют в области вокруг Земли, но механизм этого взаимодействия еще не вполне понятен.

Солнечные магнитные поля, приходящие к Земле, имеют заметную напряженность, потому что их переносит солнечная плазма. Следовательно, прежде всего надо рассматривать солнечную плазму. Это тема докладов Нейгебауэр и Снайдера (гл. 1) и Бриджа (гл. 8). Приход плазмы от Солнца обусловлен тремя совершенно разными процессами. Первый — непрерывное истечение из солнечной короны над всей поверхностью Солнца.

Я считаю, что термин *солнечный ветер* больше всего подходит к этому типу истечения. Вывод о существовании непрерывного корпускулярного излучения Солнца впервые сделал Бирман на основе исследования комет (гл. 24—26). Этот тип излучения можно назвать диссипативным потоком (*escape flow*). Хотя диссипация атмосферы была впервые предсказана Стонеем, солнечный ветер, по-видимому, имеет особый характер, теоретически интерпретированный Паркером [2*, 57*]. Наблюдения на «Маринере-2 (гл. 1) подтвердили существование этого непрерывного потока солнечной плазмы. Скарф (гл. 13) рассмотрел теории солнечного ветра, развитые Паркером [2*, 3*, 57*]¹⁾ и Чемберленом [4*, 5*], и указал на сложность некоторых еще не решенных вопросов. Влияние диффузии на состав солнечной короны и солнечного ветра рассмотрел Джокипи (гл. 14). Второй и третий типы потоков солнечной плазмы можно назвать *изверженными потоками* (*ejected flow*), хотя мы не знаем, каков механизм извержения.

2. Солнечные корпускулярные потоки

Второй тип испускания солнечной плазмы — это перемежающиеся струи ограниченного сечения, которые давно называют *солнечным (корпускулярным) потоком*. Этот вид эмиссии был постулирован более 50 лет назад на основе 27-дневной повторяемости геомагнитных возмущений. Инициаторами исследования этого явления были Маундер [6*] и Кри [7*]. Маундер дал первую убедительную интерпретацию 27-дневной повторяемости возмущений на основе солнечных потоков. Хотя эмиссия является прерывистой, однако часто она продолжается недели или месяцы, по-видимому, из одной и той же области на Солнце. Очевидность существования таких потоков уже давно была признана, несмотря на то что мы не в состоянии объяснить эмиссию [см. замечание Голда при обсуждении выступления Дэвиса (гл. 9): «В науке часто приходится разрабатывать теоретический механизм для объяснения наблюдений, даже если этот механизм нельзя проследить в деталях»]. Области, которые эмитируют потоки, названные Бартельсом [8*] *М-областями*, до сих пор не удалось отождествить с уверенностью. Примерно 35 лет назад стало ясно, что вследствие вращения Солнца такие потоки должны иметь спиральную форму. Однако значение этой формы для потоков, несущих магнитные поля, и возможное влияние потоков на космические лучи (см. гл. 4, 5 и 12) были осознаны лишь в последнее время. Эти вопросы были рассмотрены Аль-

¹⁾ См. также [56*]. — *Прим. перев.*

веном [9*, 31*, 58*], Голдом [10*, 24*], Мейером [11*], Моррисоном [12*] и Паркером. Снайдер и Нейгебауэр (гл. 2) поднимают интересные вопросы о нерадиальности излучения потоков и взаимного влияния солнечного ветра и солнечных потоков, имеющих разные скорости.

3. Излучение в солнечных вспышках: плазменные слои (plasma shells)

Излучение солнечной плазмы третьего типа наиболее сильно ограничено во времени, поскольку оно испускается солнечными вспышками, обычная продолжительность которых составляет примерно час. Иногда излучение бывает далеко не радиальным, так как некоторые вспышки обуславливают геофизические эффекты, хотя происходят близко к краю диска Солнца. Небольшая продолжительность излучения указывает, что выходящий поток ограничен по радиусу, хотя дисперсия скоростей излучения приведет в процессе движения к увеличению радиальной протяженности. Испускание частиц с поверхности Солнца может происходить в пределах некоторого конуса, имеющего порой довольно значительный телесный угол. Иногда излучение имеет вид пучков плазменных струй, образуя несколько движущихся облаков, лежащих примерно на одной сферической поверхности. Расширение может привести к слиянию плазменных облаков и образованию сферического слоя (не превышающего полусферу). Испускаемую таким образом плазму можно было бы назвать *плазменным слоем* или *солнечным слоем*. В этой связи я процитирую следующее высказывание о короне: «Среди астрономов-наблюдателей усиливается подозрение, что сама корона состоит из тонких плотных струй, не поддающихся разрешению при помощи современных инструментов, поэтому корона выглядит более или менее однородной»¹⁾. Эти вопросы затронуты в докладе Уиндхэма [гл. 7].

Хотя влияние Солнца на явления, обсуждавшиеся на конференции, очень велико, тем не менее очень мало внимания было уделено механизмам испускания плазменных потоков и слоев. Разногласия возникают даже относительно области, из которой испускается солнечная плазма. Паркер считает, что вещество вспышки, как и солнечный ветер, излучается короной. Голд

¹⁾ E. N. Parker, *Interplanetary Dynamical Processes*, Interscience Publ., a division of John Wiley and Sons, Inc., New York, 1963, p. 20. (Русский перевод: Е. Паркер, *Динамические процессы в межпланетной среде*, М., изд-во «Мир», 1965.) Эвершед указывал, что *хромосфера* ни в коем случае не является однородной оболочкой: «... она состоит из струй и миниатюрных протуберанцев», См. J. Evershed, *Observatory*, 48, 45 (1925).

придерживается мнения, что плазма испускается на различных уровнях, во всяком случае в нижней части хромосферы (см. дискуссию к гл. 9). По этому вопросу у присутствовавших специалистов (Атей, Лейтон и Зирин) не было единой точки зрения.

4. Столкновение солнечной плазмы с геомагнитным полем

Столкновение солнечных заряженных частиц с Землей впервые было исследовано экспериментально Биркеландом [13*], а позднее его последователями Брюхе [14*] и Беннетом [15*] и теоретически Штермером [16*]; при этом предполагалось, что поток солнечного газа целиком состоит из электронов. Шустер [17*] подверг резкой критике такие гипотезы солнечного воздействия, показав, что электростатическое отталкивание должно привести к рассеиванию заряженных частиц. Линдеман [18*] в 1919 г. предположил, что солнечный газ ионизован, но электрически нейтрален, т. е. по терминологии, введенной Ленгмюром [19*], представляет собой плазму. Предположение Линдемана является в настоящее время общепринятым. Оно явилось конструктивным дополнением к статье, отвергшей предложенную мной в 1918 г. несостоятельную теорию магнитных бурь [20*], которая была лишь приложением к полезным морфологическим исследованиям этих бурь.

5. Полость, магнитопауза и магнитосфера

Естественно, что при первой весьма примитивной попытке уяснить следствия набегающей солнечной плазмы на геомагнитное поле были рассмотрены наиболее простые идеализированные условия [21*], соответствовавшие состоянию знаний в то время. Таким образом, не принималось во внимание вещество межпланетного и околоземного космического пространства, где происходят основные явления. Предполагалось, что хаотическое движение в плазме соответствует температуре порядка 6000° К, но это никак не учитывалось в теории. Магнитные поля в потоках не рассматривались, слабое дипольное поле Солнца игнорировалось, а к тому времени представление о переносе магнитных полей плазмой еще не появилось. Позднее Альвен [22*] предложил совершенно иное решение проблемы, сосредоточив внимание на присутствии в плазме общего поля Солнца и электрических полей.

Исследования, выполненные на спутниках, по-видимому, подтвердили многие результаты, полученные мной и Ферраро [23*]. Наши основные выводы сводились к тому, что в плазме образуется полость вследствие того, что положительно и отрица-

тельно заряженные частицы набегающего солнечного газа отклоняются магнитным полем Земли. Геомагнитное поле оказывается ограниченным этой областью пространства, которую в настоящее время принято называть *магнитосферой* (этот термин предложил Голд [24 *]). Кроме того, сжатие поля внутри полости рассматривалось как результат наложения дополнительного поля, созданного электрическими токами, текущими по поверхности полости. Эти токи являются следствием незначительных различия в характере движения противоположно заряженных частиц. Дополнительное поле уничтожает геомагнитное поле в плазме за пределами границы полости, т. е. плазма экранируется от проникновения в нее магнитного поля Земли, исключая поверхностный слой. Внутри полости, но над поверхностью Земли напряженность магнитного поля увеличивается. Такое поведение поля позволяет объяснить первую фазу типичной магнитной бури — начальное возрастание поля, особенно горизонтальной составляющей, над большей частью земного шара. Солнечные заряженные частицы, по-видимому, не могут проникнуть внутрь полости, за исключением небольших участков вокруг двух нейтральных точек: одна к северу и другая к югу от плоскости экватора диполя, где магнитные силовые линии перпендикулярны к поверхности полости.

Были определены размеры полости, но не форма ее граничной поверхности. Не был решен вопрос относительно того, является ли полость открытой или закрытой с ночной стороны Земли. Эти вопросы гораздо позднее были рассмотрены Жигулевым и Ромишевским, Харли, Данжи, Бердом, Спрайтером и его коллегами, (Джонсоном¹⁾), а на этой конференции Мидом (гл. 23). Их результаты, которые в целом, по-видимому, подтверждаются исследованиями на спутниках, основаны на условии, введенном Мартином [26*], о равенстве давления плазмы на границе и давления магнитного поля внутри полости.

Однако все эти работы оспариваются Альвен²⁾. Большой вклад он внес в магнетику — область науки, изучающую движение заряженных частиц в магнитных и электрических полях, поэтому его взгляды заслуживают серьезного внимания³⁾. Альвен и его коллеги проводили и проводят интересные экспериментальные и теоретические исследования в этой области⁴⁾. В работе сотрудника института, руководимого Альвен²⁾,

¹⁾ Ссылки на последние работы можно найти в [25*]. — *Прим. перев.*

²⁾ Alf v é n, Space Sci Rev., 2, 862 (1963).

³⁾ Примером использования этой теории на практике может служить доклад Хоунза (гл. 20) и обсуждение этого доклада.

⁴⁾ См., например, [27*]. — *Прим. перев.*

Соннерупа (гл. 19) рассмотрен вопрос о том, является ли полость с ночной стороны Земли открытой или закрытой. Он предполагает, что возможны как тот, так и другой случай. Эксфорд (гл. 16) приходит к выводу, что магнитосфера замыкается на расстоянии, превышающем $60 R_{\oplus}$ [59*]. Интересное замечание по этому вопросу сделал Слуц при обсуждении (гл. 16—18).

6. Фронт ударной волны и переходная область

Исследования со спутников обнаружили важную особенность, которая не следовала из анализа, выполненного Ферраро и мной, поскольку мы не учитывали магнитное поле, переносимое плазмой. Эта особенность — переходная область вне полости, лежащая между границей полости и внешней границей (ударной волной). Предположение о существовании в космическом пространстве ударных волн было высказано в 1955 г. Голдом¹⁾. Эксфорд (гл. 16) дает истолкование таких понятий, как *фронт ударной волны*, *сплошная среда* и *сверхзвуковой поток*, применительно к плазме в магнитном поле. Влияние магнитного поля на свойства плазмы исследовал Келлог [29*], а также Спрейтер и Джоунс [30*] на основе аэродинамических принципов. В докладах Сонетта, Колбона и Бригса (гл. 10), Лайона (гл. 21) и Несса (гл. 22) описаны данные недавних наблюдений со спутников в переходной области и за ее пределами. Приятно отметить, что в этом разделе науки, где нас подстерегает так много тайн, обнаружено замечательное согласие между данными наблюдений (гл. 22) и результатами, предсказанными теоретически на основе аэродинамического подхода. При обсуждении (гл. 16—18) Скарф указал на существование ряда усложняющих факторов, которые следует рассмотреть в теории переходной области.

Первоначальное предположение Голда [28*] о существовании ударных волн было сделано в связи с внезапностью начала многих магнитных бурь. Соответствующее объяснение такого поведения магнитных бурь имеется и в работах, выполненных Ферраро и мной. Не ясно, связана ли внезапность с фронтом ударной волны, расположенной вне переходной области. Полость и переходная область должны существовать всегда, как и поток солнечной плазмы, но внезапное начало магнитных бурь, создаваемых солнечными вспышками, указывает на резкое усиление потока плазмы.

¹⁾ Чепмен, по-видимому, имеет в виду высказывание Голда в работе [28*]. — *Прим. перев.*

7. Магнитные бури с главной фазой; кольцевой ток

Во время многих магнитных бурь на поверхности Земли наблюдается начальное увеличение напряженности магнитного поля, указывающее на усиленный поток. Вслед за первой фазой бури следует более сильное понижение напряженности магнитного поля у поверхности. Это понижение часто является главной фазой бури. Главная фаза кончается тогда, когда напряженность поля достигает минимума. Дольше всего длится фаза восстановления магнитного поля до нормального уровня. Главная фаза означает, что вокруг Земли течет электрический ток, направленный на запад, или что имеет место усиление тока, текущего на запад. Этот ток, называемый кольцевым, впервые был рассмотрен Штермером в виде незамкнутой циркуляции потоков электронов, движущихся далеко за пределами орбиты Луны. Он ввел кольцевой ток, чтобы устранить трудности в его теории полярных сияний. Шмидт, который позднее возродил эту идею, опираясь на геомагнитные данные, не сделал предположений о том, на каком расстоянии от Земли расположен кольцевой ток. Ферраро и я поместили его внутри плазменной полости, т. е. в пределах нескольких земных радиусов. Мы безуспешно пытались объяснить его рост, как необходимое следствие движения плазмы вокруг геомагнитного поля. Позднее выяснилось, что наблюдалось много бурь с заметной первой фазой, которая не сопровождается развитием типичной главной фазы, а это позволяет сделать вывод, что плазменные потоки не обязательно сопровождаются возникновением кольцевого тока. Однако данные нескольких спутников показали, что в бурях с главной фазой кинетическая энергия, накопленная в радиационных поясах, увеличивается¹⁾. Магнионика, развитая Альвеном [31*] и Паркером [32*], показывает, что ослабление поля во время главной фазы на поверхности Земли около экватора пропорционально кинетической энергии, накопленной в поясах. Не весь ток течет на запад; ближе к Земле ток течет на восток, а в более удаленной части кольца преобладает западный ток. Акасофу и я [33*] недавно привели данные по геомагнитным бурям, интерпретированные как указание на то, что кольцевой ток иногда может частично замыкаться через ионосферу.

- 19821 -

8. Много ли нейтральных атомов в солнечной плазме?

Было много споров относительно того, могут ли частицы, испущенные Солнцем, проникать внутрь полости. Частицы,

¹⁾ В настоящее время радиационные пояса принято называть зоной захваченной радиации. — *Прил. ред.*

вторгающиеся в атмосферу и создающие полярные сияния, приходят из магнитосферы. Прежде никто не сомневался, что эти частицы приходят от Солнца. Делались попытки показать, что некоторые такие частицы могут диффундировать через границу полости, чему, вероятно, способствуют случайные изменения параметров плазмы или магнитного поля. Эксфорд (гл. 16) считает, что в период магнитной бури дополнительная энергия привносится частицами внутрь магнитосферы извне. Однако возможность проникновения солнечных частиц в магнитосферу была поставлена под сомнение многими учеными, которые предположили, что частицы верхних слоев атмосферы каким-то путем ускоряются и увеличивают свою энергию. Эта проблема вкратце была рассмотрена на конференции [см. замечания Паркера, Блока, Эксфорда при обсуждении докладов (гл. 16—18)]. Были также упомянуты процессы, предложенные Келлоггом, Альвеном, Паркером и Голдом¹⁾.

На конференции было уделено мало внимания вопросу, почему течение плазмы в одних бурях приводит к образованию главной фазы, а в других — нет. Объяснение, предложенное Акасофу и мною [34*], состоит в том, что солнечные магнитные поля, переносимые плазмой, различны. Однако неясно, как такие различия могут способствовать или препятствовать развитию токового кольца. Совершенно другое и, возможно, более перспективное объяснение различного течения бурь было предложено Акасофу и Мак-Илвэйном [35*, 36*]. Их объяснение сводится к тому, что ионизованная компонента солнечной плазмы иногда сопровождается небольшим количеством нейтральных атомов водорода, испущенных Солнцем и движущихся с той же скоростью. Эти атомы могут беспрепятственно проникать через границу полости, где их заряженные компаньоны отражаются. Таким образом, нейтральные атомы могут внести кинетическую энергию глубоко внутрь магнитосферы²⁾. Там в результате отдачи электронов атмосферным частицам, с которыми они столкнулись, быстрые атомы водорода превратятся в энергичные протоны, которые подвергнутся влиянию магнитного поля и станут составной частью радиационных поясов. Таким образом, они могут давать вклад в кольцевой ток и главную фазу бури. Желательно, чтобы будущие спутники исследовали, содержит ли солнечная плазма нейтральные атомы и если да, то сколько.

¹⁾ Ссылки на эти работы даны в дискуссиях к гл. 16—18. — *Прим. перев.*

²⁾ В последнее время этот механизм подвергся критике [60*]. — *Прим. перев.*

9. Оптические и корпускулярные солнечные ионосферные затмения

Примерно тридцать лет назад я высказал предположение, что приходящие на Землю нейтральные атомы, как и радиоизлучение Солнца, могут давать значительный вклад в ионизацию ионосферы (безусловно, на освещенной Солнцем полусфере) [37*]. Эпплтон [38*] предположил, что солнечные затмения могут показать, верна ли эта идея. Я предсказал, что если нейтральные частицы имеют такую же скорость, что и плазма, которая вызывает магнитные бури, т. е. порядка 1000 км/сек , то должно произойти корпускулярное затмение в месте более чем на 1600 км в стороне от области оптического затмения и примерно на час раньше. Наблюдения во время солнечных затмений убедительно показали, что слой E ионосферы ионизируется электромагнитным излучением. Некоторые ученые утверждали, что наблюдали корпускулярные затмения в слое F , но эти заявления ставятся под сомнение. Ясно, что частицы, обладающие скоростью 1000 км/сек , не могли бы проникнуть до слоя E . Тот факт, что частицы, вызывающие полярные сияния, проникают в слой E и даже ниже, принимается как указание на ускорительные процессы, оказывающие воздействие на ионизованные частицы в прилегающей к Земле области. В то же время не рассматривалось возможное влияние на нейтральные частицы процесса обмена зарядом. Тогда не было известно, что атмосфера простирается довольно далеко. Теперь было бы интересно выяснить, могут ли заметно влиять на ионизацию слоя F ионосферы нейтральные частицы, которые, как полагают, дают вклад в усиление кольцевого тока, особенно в периоды сильных магнитных бурь.

Даже если это явление имеет место только выше максимума F_2 , теперь его можно наблюдать при помощи ионосферных станций типа установленных на спутниках «Алуэйт» и «Ариель». Тепловое движение атомов нейтрального водорода (совсем необязательно, чтобы оно было таким же, как у ионов плазмы) стремится смазать корпускулярное затмение. Даже в этом случае, если существует поток солнечных нейтральных атомов, путь корпускулярного затмения все же можно обнаружить при помощи надлежащим образом оснащенного космического аппарата при условии, что пересечение произойдет недалеко от Луны со стороны, обращенной к Земле.

Наконец, возможно, что некоторая часть кинетической энергии, принесенной нейтральными атомами, может превратиться в тепло в слоях (или может быть передано вниз), в которых Яккия и его сотрудники нашли вариации атмосферной температуры и плотности, тесно связанные с индексом K_p [39*].

10. Механизмы солнечного излучения

Морфология полярных сияний и магнитных бурь свидетельствует о том, что на частицы, вызывающие эти явления, оказывает воздействие геомагнитное поле. В своей первоначальной гипотезе о солнечной плазме, содержащей при выходе из Солнца нейтральную компоненту, Линдеман пытался рассчитать, какое количество газа при его движении к Земле ионизируется под действием солнечной радиации [18*]. Подобные ионизирующие эффекты позднее были более тщательно исследованы Каном [40*] в связи с попытками обнаружить плазму между Землей и Солнцем по доплеровскому смещению линий поглощения однократно ионизированного атома кальция. Акасофу распространил анализ Кана на нейтральные атомы водорода, которые движутся от Солнца [35*]. До сих пор неясно, как нейтральные атомы водорода покидают Солнце. Если плазма, подобно солнечному ветру, приходит из внешних областей солнечной короны, то поскольку на этих высотах атомы водорода отсутствуют, их не было бы и в солнечных корпускулярных потоках. Можно предположить, что во время вспышки вещество выбрасывается с большой глубины, где имеется нейтральный водород, хотя мы не знаем механизма такого выброса.

Другая возможность — это предложенный Милном [41*] механизм ускорения хромосферных частиц, таких, как ионизованный кальций и нейтральный водород, которые обуславливают сильные линии поглощения во фраунгоферовом спектре. Милн утверждал, что этот процесс мог бы обеспечить для небольшого количества поглощающих атомов скорость порядка 1000 км/сек, но мы не располагаем количественными оценками потока, создаваемого этим механизмом при различных условиях на Солнце. Эта задача, по-видимому, заслуживает внимания. Милн считал, что ионы Ca^+ , которые обуславливают две основные линии поглощения в солнечном спектре, являются наиболее обильной компонентой потока, созданного при его механизме ускорения. Он не рассматривал вопрос, связанный с переходом Ca^+ в ионы Ca^{++} за счет дальнейшей ионизации при движении этих частиц от Солнца. Позднее Кан [40*] пришел к выводу, что значительная часть ионов кальция претерпевает такой переход. Это должно изменить предельную скорость ионов кальция, достигающих Земли. Однако для нас основной интерес представляют нейтральные атомы, выброшенные за счет действия механизма Милна.

Природа солнечных вспышек до сих пор неясна. После тщательного исследования Паркер (см. прим. на стр. 12) исключил механизм взаимной аннигиляции магнитных полей как источник энергии, проявляющейся во вспышке. Петчек (гл. 15) предлагает

механизм распространения волн как новую и важную составную часть этой проблемы. Этот механизм обеспечивает более быструю скорость пересоединения силовых линий по сравнению с той, которая получалась ранее¹⁾). Интересно рассмотреть идеи, выдвигавшиеся в течение ряда лет Брюсом, о важности роли электрических разрядов в космическом пространстве и, в частности, в солнечной атмосфере²⁾). Брюс согласен с тем, что Солнце создает наибольшие трудности для его теории, поскольку электрическая проводимость солнечного вещества на всех уровнях очень высока. Любой электрический разряд в солнечной атмосфере требует исключительно быстрого и сильного способа генерации разностей электрических потенциалов. В течение нескольких лет Брюс не высказывал предположений о том, как может быть создана на Солнце такая разность потенциалов. Позднее он предположил, что на уровне солнечной атмосферы, где температура достигает минимального значения 4000°K , образуются небольшие скопления наиболее тугоплавкого вещества. Как специалист по электрическим разрядам, он утверждает, что там, где имеется пыль (раздробленное вещество) и конвекция газа, будет происходить разделение зарядов и образование электрического потенциала. Брюс считает, что электрические разряды происходят на Солнце постоянно и что именно они ответственны за плазменные струи и слои, обуславливающие магнитные бури. По моей просьбе он предоставил краткое описание своей гипотезы для моей лекции, прочитанной в Летней школе теоретической физики при Гренобльском университете в 1962 г. и опубликованной в [25*]. В настоящее время, по-видимому, трудно оценить достоинства этих идей из-за отсутствия количественных оценок некоторых факторов, которые, согласно его точке зрения, должны быть учтены. Ведь далеко не все известно о грозных разрядах, которые происходят в атмосфере Земли, всего в нескольких километрах над нашими головами.

11. Поток солнечной плазмы и космические лучи

Открытие космических лучей полвека назад позволило обнаружить частицы, энергии которых значительно превышали предполагавшиеся ранее. Это способствовало развитию ядерной физики, поскольку привело к открытию новых частиц и побудило к созданию установок, производящих высокоэнергичные частицы для контролируемых исследований. Постепенно становилось все

¹⁾ Например, Свитом и Паркером [42*—44*]. — *Прим. перев.*

²⁾ Ссылки на работы Брюса и краткое изложение его теории можно найти в обзоре Чепмена в [25*]. — *Прим. перев.*

более очевидным, что существует связь между космическими лучами и солнечными и геомагнитными явлениями, включая цикл солнечных пятен и 27-дневную тенденцию повторяемости. Открытие такой связи привело к постоянной регистрации естественных явлений, общих метеорологии и геомагнетизму, к которым часто относились пренебрежительно. Таким образом, вариации космических лучей стали рассматривать как индикатор существующих на Солнце, в его окрестности и на больших расстояниях от него условий, которые изменяют поток высокоэнергичных заряженных частиц, регистрируемых на Земле. Появление спутников увеличило значение космических лучей как таких индикаторов, поскольку расширило область космического пространства, доступную наблюдениям¹⁾.

В настоящем сборнике эти вопросы рассмотрены Андерсоном (гл. 4), Клайном и др. (гл. 5) и Паркером (гл. 12). Было предложено много теорий о связи космических лучей с солнечными и геомагнитными явлениями. Эти теории связывают космические лучи с магнитными полями, унесенными из Солнца плазмой солнечных потоков спиральной формы, а также с беспорядочными «останками» этих полей далеко за пределами земной орбиты. В гл. 5 делается вывод о том, что вариации космических лучей дают сведения о долгоживущих ограниченных плазменных потоках и о конфигурации их магнитных полей, совершенно независимые от тех исключительно важных данных о корпускулярных потоках, которые доставляет статистика геомагнитных возмущений.

Имеется некоторая неясность и высказываются различные мнения относительно непрерывности или оторванности магнитных силовых линий, вытягиваемых из солнечной атмосферы, и скорости взаимной аннигиляции смежных противоположно направленных магнитных полей. Этот вопрос, выдвинутый несколько лет назад Свитом [42*, 43*] и Паркером [44*], касается вариаций космических лучей. Механизм пересоединения магнитных полей, предложенный Петчеком (гл. 15), обеспечивает в среднем значительно более быстрый отрыв магнитных силовых линий от Солнца по сравнению с ранее полученными оценками.

Рассматриваются как галактические, так и менее энергичные космические лучи, испускаемые иногда Солнцем. Галактические космические лучи, как указал Паркер (гл. 12), связаны с явлениями, масштабы которых значительно превосходят размер солнечной системы.

¹⁾ Многие сведения о вариациях космических лучей можно найти в книге Л. И. Дормана «Вариации космических лучей и исследование космоса», М., Изд-во АН СССР, 1963. — *Прим. перев.*

Я воспользуюсь случаем и прокомментирую терминологию, используемую в этой области науки. Эта терминология излишне громоздка, до некоторой степени устарела и напоминает идеи о лучах смерти. Я предлагаю взамен следующие термины:

космические лучи — *космоны*,
галактические космические лучи — *галактоны*,
солнечные космические лучи — *гелионы*,
космические лучи туманностей — *нефелоны*,
альфа-частица — *альфон*,
бета-частица — *бетон*,
гамма-лучи — *гамон*.

Тогда, например, выражение «концентрация галактических космических лучей» звучало бы как «концентрация галактонов» или «галактонная концентрация».

12. Солнечная плазма и кометы

В гл. 24—26 рассматривается воздействие солнечной плазмы на кометы. Поскольку кометы не обладают собственными магнитными полями, взаимодействие плазмы с кометами будет существенно отличаться от взаимодействия с магнитосферой Земли. Тем не менее образование ионов вокруг ядер и хвоста (хвостов) кометы, частично за счет обмена зарядом с солнечной плазмой, создает проводящую область, которая оказывает влияние на движение магнитных полей, уносимых плазмой с Солнца. Некоторые возникающие при этом задачи магнитооптики и магнитогидродинамики рассмотрены Бердом (гл. 26). Бирман делает вывод (гл. 25), что над обращенной к Солнцу стороной кометных ядер образуются поверхности с некоторыми свойствами фронта ударной волны.

Бирман и Люст (гл. 24) подчеркивают значение комет как зондов солнечной плазмы и межпланетного пространства, особенно в областях, далеких от Земли и от плоскости эклиптики. Однако использование комет в качестве зондов возможно лишь при более глубоком понимании природы комет и их хвостов, а также действия солнечной плазмы на них.

Один важный вывод, полученный в гл. 24, состоит в том, что межпланетная плазма на расстоянии орбиты Земли не вращается вместе с Солнцем. Этот вывод согласуется с ранее выполненными исследованиями Люст и Шлютера [45*], которые пришли к выводу, что вращение общего гелиомагнитного поля может заставить плазму вплоть до расстояния 50 солнечных радиусов, т. е. 0,25 а. е., вращаться вместе с Солнцем.

Кроме того, в гл. 24 предлагается использовать в качестве зондов искусственные кометы, представляющие собой облака ионов, выброшенные со спутников.

13. Солнечная плазма и Луна

Луна представляет собой препятствие на пути потока солнечной плазмы, которое существенно отличается как от Земли, так и от комет. Наблюдения на 2-й советской космической ракете [46*] свидетельствуют о том, что верхний предел напряженности лунного магнитного поля очень низок. Это согласуется с общепринятым представлением о Луне (поставленным недавно под сомнение Ранкорном [47]) как о твердом до самого центра теле. В гл. 27 Голд рассматривает взаимодействие плазмы с Луной, основываясь на обычных представлениях и пренебрегая магнитным полем Луны любого происхождения. Он делает заключение, что магнитные силовые линии, переносимые плазмой, будут вдавливаться на некоторое расстояние в поверхность Луны на дневной стороне. Это приведет к возникновению электрических сил. Скопившиеся магнитные силовые линии на освещенной Солнцем стороне будут ограничены фронтом ударной волны. Вариации потока солнечной плазмы и переносимого им поля будут создавать значительные изменения положения фронта ударной волны. (Альвен указывал, что существует разница между воздействием Луны на плазму без магнитного поля и на хотя бы слегка намагниченную плазму; см. прим. на стр. 15.)

Один из выводов, полученных в гл. 27, сводится к тому, что магнитные измерения, выполненные на спутнике, обращающемся на небольшом расстоянии вокруг Луны, позволят исследовать историю существовавших в прошлом плазменных потоков от Солнца ¹⁾. Другой вывод состоит в том, что столкновение солнечных электронов с поверхностью Луны может создать рентгеновские лучи, представляющие опасность для космонавтов, высадившихся на Луну. Кроме того, высказывается мнение, что набегающие солнечной плазмы препятствуют созданию лунной атмосферы из газообразных продуктов радиоактивного распада, выделяющихся из недр Луны.

В работе Несса (гл. 28) сообщается о замечательных наблюдениях, которые указывают на существование с ночной стороны Луны длинного хвоста без магнитного поля ²⁾. Этот хвост можно назвать областью магнитно-корпускулярного затмения, ограниченную нерегулярным магнитным полем. Эта область, по-видимому, не смазывается хаотическим движением солнечных частиц. На возможность этого явления указывалось в разд. 9 в связи

¹⁾ Такой спутник («Луна-10») впервые был запущен в СССР. На нем были выполнены интересные измерения [61*, 62*]. — *Прим. перев.*

²⁾ Данные, полученные Нессом на «ИМП-1», интерпретируются несколько иначе К. Г. Ивановым [63*]. — *Прим. ред.*

с другой разновидностью области корпускулярного затмения. Из рис. 8 (гл. 28) следует, что область магнитного затмения обладает большой протяженностью, но будущие исследования на спутниках должны отвечать на вопрос, может ли такое затмение оказать влияние на магнитосферу и вызвать наблюдаемые изменения магнитного поля на поверхность Земли. Это явление корпускулярного затмения, если оно имеет место, наблюдалось бы чаще, чем эффекты оптических затмений, поскольку область магнитного затмения может быть значительно шире области оптической тени, и таким образом магнитно-корпускулярное затмение оказывало бы влияние на Землю, когда оптическая тень не достигает ее.

В гл. 28 также упоминаются различные точки зрения относительно воздействий Луны на Землю. Несомненно, лунные приливы влияют на некоторые метеорологические элементы (особенно на давление и ветер), а также на геомагнитное поле и космические лучи. Многие расчеты лунно-приливных эффектов были сделаны с малой вероятной ошибкой. Однако лишь очень небольшое число сообщений о зависимости метеорологических или других геофизических явлений от фазы Луны может выдержать критику. Как мне кажется, Бартельс [48] дал впечатляющую отповедь одной из последних работ, в которой утверждается, что имеется корреляция между фазой Луны и статистикой геомагнитных возмущений [49, 50].

14. Солнечная плазма, полярные сияния и магнитные бури

Наиболее обширная и самая интересная дискуссия на конференции развернулась вокруг работ Эксфорда (гл. 16), Данжи (гл. 17) и Петчека (гл. 18). В этих работах рассматриваются явления, происходящие на границе магнитосферы, около нее и внутри полости. В гл. 18 рассматривается соединение и пересоединение силовых линий межпланетной плазмы и магнитосферы. Гл. 17 также имеет дело с магнитными полями в межпланетной плазме и нейтральными точками, из которых исходят магнитные силовые линии, покрывающие все поверхности. В последней части гл. 16 описывается система циркуляции плазмы внутри магнитосферы [51*] в предположении, что эта циркуляция связана с полярной системой электрических токов. Конфигурация токовой системы в идеализированной форме (которую я построил еще в 1935 г.) представлена на рис. 1 (гл. 16). Вестин, Обаяши и др. [1*, 52*, 53*] предложили подобные схемы, основанные на более точных данных для полярной области по сравнению с теми, которые были в моем распоряжении. Токовая система обычно

имеет довольно различную ориентацию, которая меняется со временем, но в общем картина подобна представленной на рис. 1 (гл. 16).

Все эти работы основаны на данных о полярных сияниях, кольцевых токах, авроральных и полярных магнитных возмущениях, т. е. на данных о явлениях, тесно связанных с процессами внутри магнитосферы. Из всех областей, обсуждавшихся на этой конференции, магнитосфера (выше ионосферы) расположена ближе всего к Земле. Эта область чаще всего пересекалась ракетами и спутниками. Однако явления, происходящие там, настолько сложны и изменчивы, что вполне естественно, что пока еще нет общепринятой исчерпывающей теории этих явлений. Кроме того, мы не знаем всех важных особенностей этих процессов, например мы только теперь подходим к общему представлению (см. рис. 2, гл. 17) о морфологии такого важного магнитосферного явления, как авроральные возмущения [54*, 55*]. Их морфология тесно связана с полярными магнитными возмущениями и их электрическими токовыми системами.

К сожалению, я часто не в состоянии был следить за теориями, аргументами и рассуждениями, предлагаемыми по этим вопросам моими коллегами даже на настоящей конференции. Эти доводы частично представляют собой а priori развитие того, что было сделано Ферраро и мной, однако идут намного дальше. Такой подход весьма желателен, однако очень труден: он должен сочетать данные о таких явлениях, как магнитные возмущения, полярные сияния и явления в ионосфере, полученные как с поверхности Земли, так и со спутников и космических ракет. Комплексное исследование привлекло в настоящее время много очень способных ученых. Однако дебаты по этим вопросам, по-видимому, будут продолжаться в довольно оживленной форме по крайней мере еще несколько лет.

С. Чепмен

Боулдер, Колорадо
Июль 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

- 1*. Зайцев А. Н., Фельдштейн Я. И., Геомагнетизм и аэрономия, **7**, № 3, 553 (1967).
- 2*. Parker E. N., *Astrophys. J.*, **128**, 664 (1958).
- 3*. Parker E. N., *Space Astrophysics*, ed. Liller W. S., New York, McGraw-Hill, 1961. (Русский перевод в сб. «Космическая астрофизика», под ред. У. Лиллера, М., ИЛ, 1962.)
- 4*. Chamberlain J. W., *Astrophys. J.*, **131**, 47 (1961).
- 5*. Chamberlain J. W., *Astrophys. J.*, **133**, 675 (1961).
- 6* Maunder E. W., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **64**, 205 (1904); **65**, 2, 538, 666 (1905); **76**, 63 (1916).

- 7*. Chree C., Phil. Trans. Roy. Soc., **A208**, 205 (1908), **A212**, 75 (1912); **A213**, 245 (1913).
- 8*. Bartels J., Terr. Magnetism and Atmos. Elec., **37**, 1 (1932).
- 9*. Alfvén H., Phys. Rev., **75**, 1732 (1949).
- 10*. Gold T., J. Phys. Soc. Japan, **17**, A-II, 607 (1962).
- 11*. Meyer, P. Res. in Geophys., **1**, 147 (1964).
- 12*. Morrison P., Phys. Rev., **109**, 1874 (1958).
- 13*. Birkeland Kr., Arch. Sci., phys., **1**, 497 (1896).
- 14*. Brüche E., Naturwiss., **18**, 1085 (1930); Terr. Mag. and Atmosph. Elec., **36**, 41 (1931); Phys. Zs., **31**, 1011 (1930); **32**, 31 (1931); Zs. Astrophys., **2**, 30 (1931).
- 15*. Bennett W. J., Electromagnetic phenomena in cosmical physics, ed. Lennert B., Cambridge, 1958, p. 446.
- 16*. Stormer C., The Polar Aurora, Oxford, 1955.
- 17*. Shuster A., Proc. Roy. Soc., **A85**, 44 (1911).
- 18*. Lindemann F. A., Phil. Mag., **38**, 669 (1919).
- 19*. Langmuir I., Phys. Rev., **33**, 954 (1929).
- 20*. Chapman S., Proc. Roy. Soc., **A95**, 61 (1918).
- 21*. Chapman S., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **89**, 456 (1929).
- 22*. Alfvén H., Kungl. Sve. Vetenskaps Akad. Handl. Stockholm, III, **18**, № 9 (1940).
- 23*. Chapman S., Bartels J., Geomagnetism, Oxford, Clarendon Press, 1940.
- 24*. Gold T., J. Geophys. Res., **64**, 1219 (1959).
- 25*. Geophysics. The Earth's Environment, eds. Le Witt C., Hieblot J., Lebeau A., Gordon and Breach, New York, 1963. (Русский перевод в сб. «Геофизика. Околоземное космическое пространство», М., изд-во «Мир», 1964.)
- 26*. Martyn D. F., Nature, **167**, 92 (1951).
- 27*. Alfvén H., Danielsson L., Fälthammar C.-G., Lindberg L., Proceedings of the plasma space science symposium, eds. Cahng C. C., Huang S. S., Amsterdam, 1965.
- 28*. Gold T., Gas dynamics of cosmic clouds, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1955, p. 103.
- 29*. Kellogg P. J., J. Geophys. Res., **67**, 3805 (1962).
- 30*. Spreiter J. R., Jones W. P., J. Geophys. Res., **68**, № 12, 3555 (1963).
- 31*. Alfvén H., Fälthammar C.-G., Cosmical Electrodynamics, 2nd ed., Oxford Univ. Press, 1963. (Русский перевод: Г. Альвен, К.-Г. Фельтхаммар, Космическая электродинамика, 2-е изд., М., изд-во «Мир», 1967.)
- 32*. Parker E. N., Phys. Rev., **107**, № 4, 924 (1957).
- 33*. Akasofu S.-I., Chapman S., Planet. Space Sci., **12**, № 6, 607 (1964).
- 34*. Akasofu S.-I., Chapman S., J. Geophys. Res., **68**, 125 (1963).
- 35*. Akasofu S.-I., Planet. Space Sci., **12**, № 10, 905 (1964).
- 36*. Akasofu S.-I., McIlwain C. E., Trans. Amer. Geophys. Union, **44**, 883 (1963).
- 37*. Chapman S., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., London, **92**, 413 (1932).
- 38*. Appleton E. V., Chapman S., Proc. Inst. Radio Eng., New York, **23**, 658 (1935).
- 39*. Jacchia L. G., Slowey J., J. Geophys. Res., **69**, 4145 (1964).
- 40*. Kahn F. D., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **109**, 324 (1949).
- 41*. Milne E. A., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **86**, 459 (1926).
- 42*. Sweet P. A., Proceedings of the International Astronomical Union, Symposium on Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics, № 6 (Stockholm, 1956), 1958, p. 123.
- 43*. Sweet P. A., Nuovo Cimento, Suppl., **8**, Ser. X, 188 (1958).
- 44*. Parker E. N., Astrophys. J., Suppl., Ser. 77, **8**, 177 (1963).

- 45*. Lüst R., Schlüter A., Zs. I. Astrophys., **38**, 190 (1955).
- 46*. Долгинов Ш. Ш., Ерошенко Е. Г., Жузгов Л. Н., Пушков Н. В., Геомагнетизм и аэрномия, **1**, № 1, 21 (1961).
47. Runcorn S. K., Tech. Rept. № 32-529, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 1963.
48. Bartels J., Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen, II Mathematisch-physikalische Klasse, № 23, 1963.
49. Bigg E. K., J. Geophys. Res., **68**, 1409 (1963).
50. Bigg E. K., J. Geophys. Res., **69**, 4099 (1963).
- 51*. Axford W. I., Hines C. O., Canadian J. Phys., **39**, 1433 (1961).
- 52*. Vestine E. H., Physics of the Upper Atmosphere, ed. J. A. Ratcliffe, Academic Press, New York, 1960. (Русский перевод в сб. «Физика верхней атмосферы» под ред. Дж. А. Ратклиффа, М., Физматгиз, 1963.)
- 53*. Fairfield D. H., J. Geophys. Res., **68**, № 12, 3589 (1963).
- 54*. Akasofu S.-I., Planet. Space Sci., **12**, 272 (1964).
- 55*. Akasofu S.-I., Space Sci. Rev., **4**, № 4, 498 (1965).
- 56*. Parker E. N., Space Sci. Rev., **4**, № 5/6, 666 (1965).
- 57*. Parker E. N., Astrophys. J., **132**, № 3, 821 (1960).
- 58*. Alfvén H., Tellus, **6**, 232 (1954).
- 59*. Ness N. F., Scarce C. S., Cantarano S. C., GSFC, Rept. X-612-67-183, 1967.
- 60*. Brandt J. C., Hunten D. M., Planet. Space Sci., **14**, 95 (1966).
- 61*. Грингауз К. И., Безруких В. В., Хохлов М. З., Застенкер А. Б., Ремизов А. П., Мусатов Л. С., Космические исследования, **4**, № 6, 851 (1966).
- 62*. Жузгов Л. Н., Долгинов Ш. Ш., Ерошенко Е. Г., Космические исследования, **4**, № 6, 880 (1966).
- 63*. Иванов К. Г., Геомагнетизм и аэрномия, **5**, № 4, 751 (1965).

Часть I

ЯВЛЕНИЯ,
НАБЛЮДАЕМЫЕ
В МЕЖПЛАНЕТНОМ
ПРОСТРАНСТВЕ

Глава 1

ИЗМЕРЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА «МАРИНЕРЕ-2»

М. Нейгебауэр и К. У. Снайдер

Первая статья об измерениях плазмы на «Маринере-2» содержала предварительные данные, представленные Нейгебауэр и Снайдером [1]¹⁾. Снайдер, Нейгебауэр и Рао [2] указали, что существует корреляция между скоростью плазмы и геомагнитной активностью. Я лишь кратко повторяю те места из [1, 2], которые имеют непосредственное отношение к тому, о чем я буду говорить.

Большинству из вас известно, что на «Маринере-2» был установлен сферический электростатический анализатор, который был всегда направлен на центр солнечного диска. На рис. 1 приведена функция разрешения анализатора (доля частиц, достигающих коллектора, в зависимости от энергии и угла падения частицы). Аберрация, обусловленная движением космического аппарата, была в пределах $2-6^\circ$. Площадь под кривой, соответствующей 6° , составляет одну треть площади под кривой, соответствующей 0° . Плазма регистрировалась прибором все время, но иногда приходилось делать большие поправки для учета эффектов аберрации.

Во всех десяти каналах спектрометра космический аппарат передавал число, пропорциональное логарифму тока, измеряемого в данном диапазоне энергий частиц на единицу заряда. Каналы сканировались последовательно, отсчет производился через 18,5 сек, так что на получение полного спектра требовалось от 37 до 111 сек (в зависимости от ширины спектра). Два последовательных спектра были разделены интервалом времени 3,7 мин, что и являлось временем разрешения при измерениях свойств плазмы.

Метод расчета скорости и температуры

На рис. 2 приведен один из таких спектров. Логарифм измеряемого тока I дается для каждого энергетического канала на

¹⁾ Более подробные и точные данные о плазме, полученные на «Маринере-2», можно найти в [3*]. — *Прим. перев.*

единицу заряда Q . В логарифмической шкале каналы располагаются через одинаковые интервалы. Многие спектры имеют два максимума. Если нет четко выраженного второго максимума, то на его месте часто виден выступ. Левый максимум мы

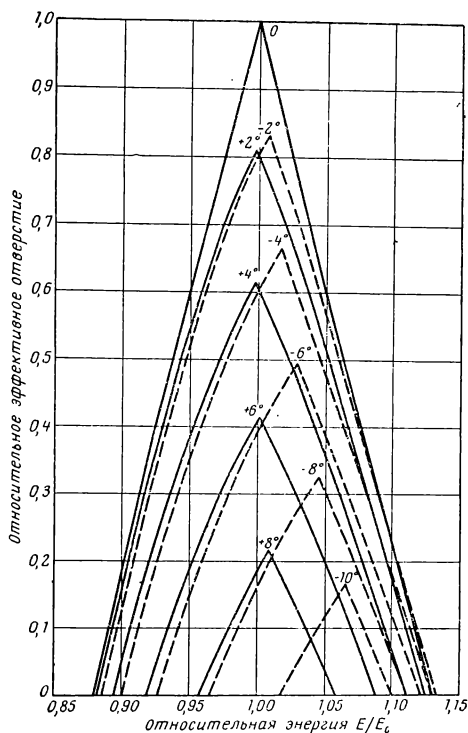


Рис. 1. Функция разрешения электростатического анализатора, установленного на «Маринере-2», или относительное количество ионов параллельного пучка, достигающих коллектора, в зависимости от энергии и угла падения ионов.

приписали протонам, а правый — α -частицам, хотя гакже могут присутствовать и более тяжелые ядра. Если скорость движения α -частиц и протонов от Солнца одинакова, то энергия α -частиц на единицу заряда в два раза больше энергии протона, что на самом деле и наблюдается. Позднее я буду говорить об α -частицах, но сначала мне хотелось бы описать метод, которым пользовались для определения скорости, температуры и концентрации по полученным данным.

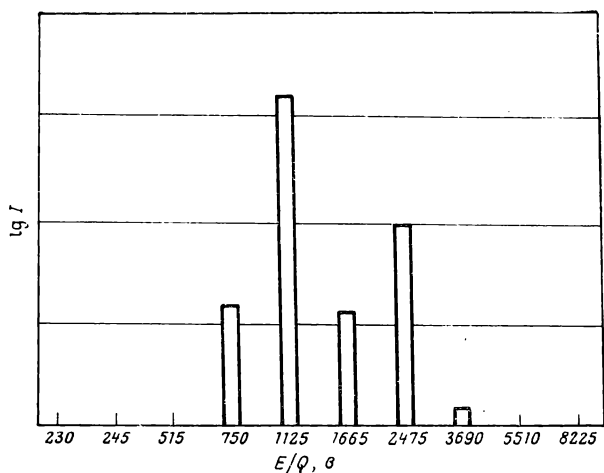


Рис. 2. Образец спектра, полученного на «Маринере-2» при помощи плазменного спектрометра.

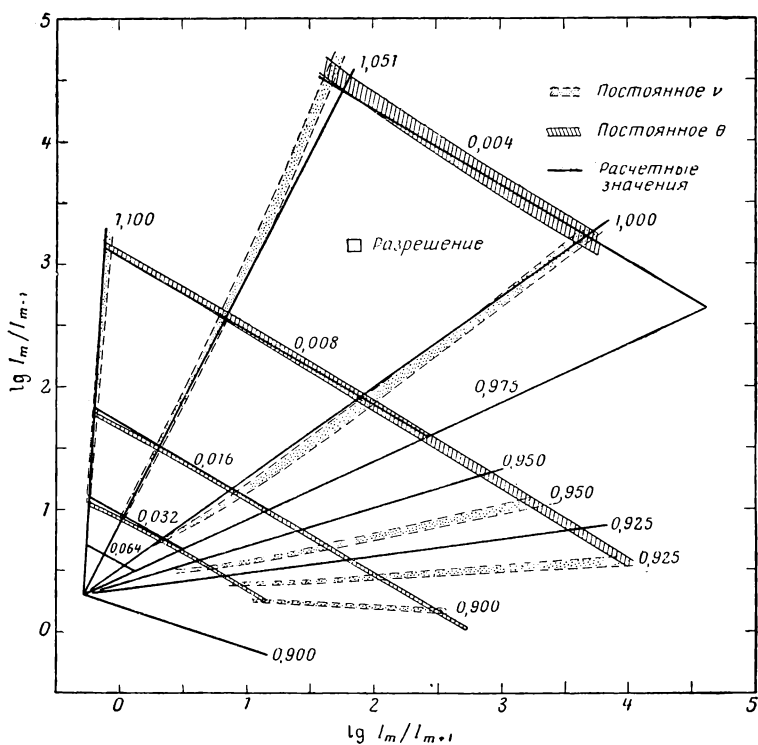


Рис. 3. Изолинии ν и θ как функции токов в каналах $m-1$, m и $m+1$ в предположении, что α -частицы не дают никакого вклада.

При первом расчете мы предполагали, что ток в канале, в котором наблюдается максимум, и в соседних с ним каналах целиком обусловлен протонами с изотропным распределением Максвелла — Больцмана в движущейся вместе с плазмой системе координат. Мы определили параметр ν как отношение

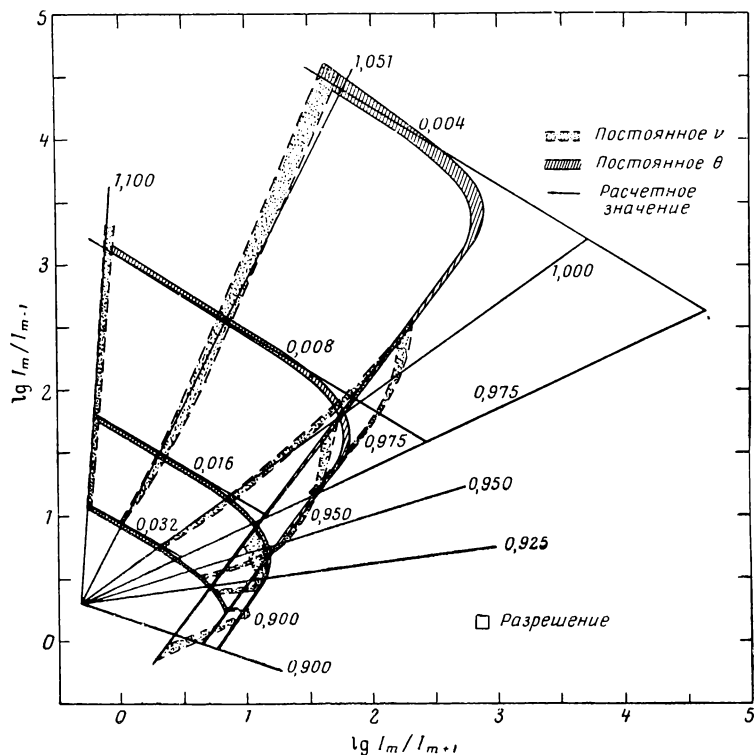


Рис. 4. Изолинии ν и θ в предположении, что на сто протонов приходится пять α -частиц ($\nu_\alpha = \nu_p$, $\theta_\alpha = \theta_p$).

скорости потока плазмы v к скорости v_m , соответствующей центральной части канала, в котором наблюдается максимум тока, а параметр θ — как отношение тепловой энергии kT к энергии направленного движения плазмы $mv^2/2$. Токи каналов ниже максимума, в максимуме и выше его соответственно обозначены как I_{m-1} , I_m и I_{m+1} . Для определенного значения угла аберрации плазмы, набегающей со скоростью v_m , и угла атаки (угол между вектором скорости космического аппарата и плоскостью анализатора) мы интегрировали распределение протонов в пре-

делах функции разрешения, приведенной на рис. 1. Это интегрирование дает однозначную взаимосвязь между парой измеряемых параметров (I_m/I_{m-1} и I_m/I_{m+1}) и парой параметров (v и θ), описывающих протонную плазму. Пример такой связи для нескольких значений параметров v и θ представлен на рис. 3. Покрытые точками и заштрихованные области, по сути дела, являются огибающими различных значений углов aberrации и атаки при постоянном значении v или θ . Чтобы показать приближенную точность рассчитываемых параметров, на рис. 3 также иллюстрируется влияние потенцирования логарифма тока.

Для определения v и θ из наблюдаемых отношений I_m/I_{m-1} и I_m/I_{m+1} мы использовали прямые линии, аппроксимирующие покрытые точками и заштрихованные области. Может несколько озадачить то обстоятельство, что некоторые линии, например $v=0,925$, проходят довольно далеко от соответствующей области. Это смещение было сделано в надежде внести поправку на α -частицы. Скажем, если предположить, что на каждые сто протонов приходится пять α -частиц, то α -частицы дадут значительный вклад в ток, регистрируемый в канале $m+1$ при $v < 1$. Таким образом, кривые рис. 3 будут искажены, и мы получим кривые, представленные на рис. 4.

Чтобы вычислить все значения v , а также θ при $v > 1,000$, были использованы прямые линии на рис. 3 и 4. Различие между кривыми рис. 3 и 4 указывает на то, что мы лишены всякой надежды рассчитать θ , а следовательно, и температуру, этим простым методом, если имеется значительная примесь α -частиц в канале $m+1$.

Я также хочу обратить внимание на то, что если поток от Солнца не является строго радиальным, то это можно учесть введением разных эффективных углов aberrации и атаки, которые изменяют v и θ на величину, приближенно определяемую размерами покрытой точками и заштрихованной областей. Таким образом, при определении скорости и температуры тот факт, что солнечный ветер распространяется не точно по радиусу, не имеет большого значения — величина скорости может измениться примерно на 1%.

Зависимость скорости, температуры и концентрации протонов от времени

На рис. 5 представлен график зависимости скорости и температуры от времени. 1 декабря 1962 г. принимается за 1-й день. В большинстве случаев верхняя кривая — это кривая скорости. Каждая точка представляет собой 3-часовое среднее значение. Друг под другом помещены части графиков с временным

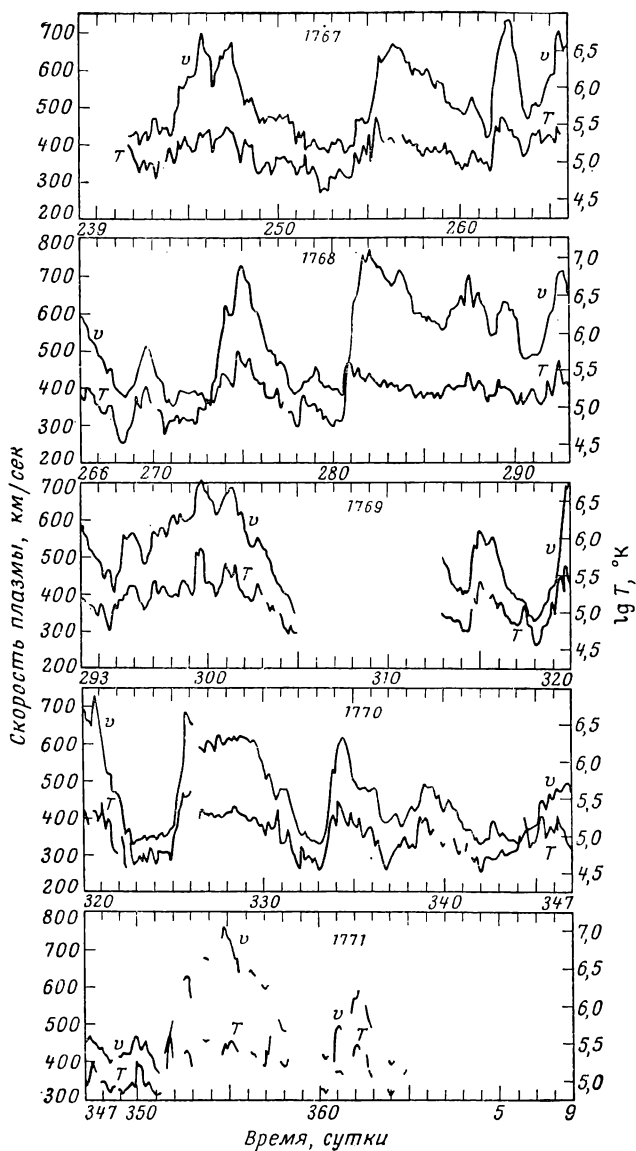


Рис. 5. Вычисленные 3-часовые средние значения скорости и температуры протонов. (Солнечные обороты с № 1767 по № 1771.)

сдвигом в 27 суток, так что можно видеть повторяющиеся максимумы, соответствующие быстрой горячей плазме. Скорость плазмы изменялась в пределах от ~ 320 до ~ 770 км/сек при среднем значении за весь период измерений 505 км/сек. Температура изменялась от $3 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^5$ °К. Средняя температура протонов составляла $1,5 \cdot 10^5$ °К. Как видите, характер изменения температуры более или менее совпадает с характером изменения скорости; если скорость возрастает, то, как правило, повышается и температура.

Температура вычислялась по ширине, а скорость — по энергии на единицу заряда в максимуме протонного спектра. Затем для расчета концентрации протонов мы использовали величину измеряемого тока и углы аберрации и атаки, а также данные по калибровке бортового электрометра. Предположение о радикальном истечении солнечной плазмы при вычислении концентрации сильно сказывается на получаемой величине.

На рис. 6 жирными линиями показана скорость, приведенная на рис. 5. Тонкими линиями обозначена концентрация, ее шкала дается справа. Видно, что самая высокая концентрация обычно наблюдается между струями, движущимися с большой скоростью или на ведущем краю потока. Например, в 280-й день быстрая плазма нагоняет медленную плазму, поэтому на поверхности раздела концентрация увеличивается. Кроме того, многократно наблюдалось, что в центральных частях струй концентрация была довольно низкой при высокой скорости плазмы. 3-часовые средние значения концентрации изменялись от $\sim 0,2$ до 70 *протон/см³*.

На рис. 7 представлены графики одновременной регистрации скорости, температуры и концентрации на ведущем краю потока, соответствующего магнитной буре 7 октября 1962 г. (280-й день). Условия в межпланетном пространстве были довольно спокойными вплоть до 15 час. 47 мин. вс. вр., когда наблюдалось внезапное увеличение скорости. Увеличение скорости продолжалось в течение примерно 2 суток, пока она не достигла 800 км/сек. На рис. 7 видно, что данных о температуре и концентрации значительно меньше, чем данных о скорости, поскольку температура и концентрация не рассчитывались, если нельзя было пренебречь влиянием α -частиц.

Иногда наблюдаются одновременные внезапные скачки скорости и температуры. Под «внезапностью» подразумевается любое изменение за время меньше 3,7 мин. Пример такого скачка имел место в 07 час. 37 мин. вс. вр. на 281-й день. Большой скачок скорости наблюдался также в 280-й день в 15 час. 47 мин. вс. вр., хотя температура не изменилась очень сильно.

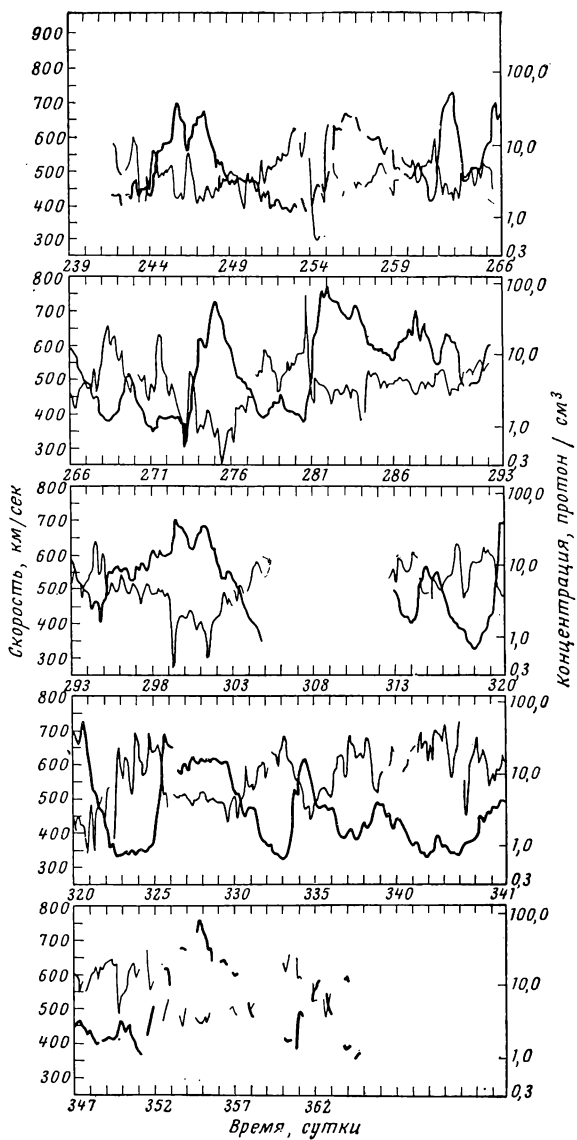
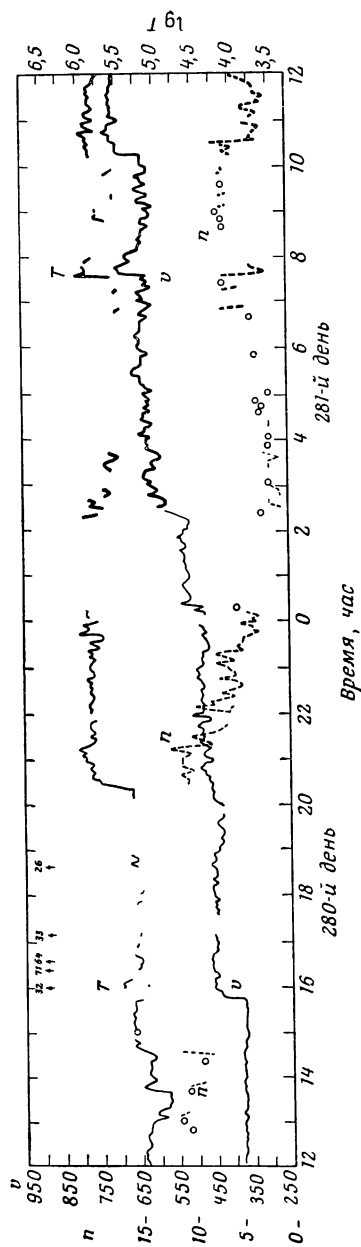


Рис. 6. Вычисленные 3-часовые средние значения скорости (жирные линии) и концентрации (тонкие линии) протонов.



Р и с. 7. Скорость протонов (v , км/сек), температура (T , °К), и концентрация (n , см⁻³) за 24-часовой период, начавшийся в 12 час. 00 мин. вс. вр. 7 октября 1962 г. Передний край потока, позднее вызвавшего геомагнитную бурю, измерен в 15 час. 47 мин. вс. вр. 7 октября 1962 г. (280-й день).

В 280-й день наблюдавшийся скачок скорости около 20 час. 00 мин. вс. вр. на 24 мин опережал скачок температуры.

Концентрация, по-видимому, начала увеличиваться за час до прихода фронта ударной волны и достигла значения 77 *протон/см³*. Это самая высокая зарегистрированная концентрация. Затем концентрация понизилась и оставалась на низком уровне до тех пор, пока быстрый поток не прошел полностью.

Изменения с расстоянием от Солнца

На рис. 6 можно заметить, что в конце полета концентрация была выше, чем в начале. На рис. 8 показано примерное изменение концентрации с расстоянием от Солнца. По оси абсцисс отложен логарифм расстояния от Солнца. Каждая ступенька представляет собой среднее значение за полный оборот Солнца; усреднение производилось для того, чтобы исключить влияние солнечной активности. Видно, что концентрация уменьшается приблизительно как $1/r^2$, а может быть, немного быстрее.

Аналогичные расчеты были выполнены для потока плазмы $J = nv$. На рис. 9 видно, что изменение потока гораздо лучше соответствует закономерности $1/r^2$, чем изменение концентрации. Однако, когда мы построили аналогичные графики средних значений скорости и температуры, явной зависимости от расстояния от Солнца не обнаружилось.

Связь с индексом K_p

В статье [2] мы пришли к выводу, что наблюдается хорошая связь между индексом K_p , используемым в качестве меры геомагнитной активности, и скоростью плазмы. На рис. 10 и 11 верхние кривые представляют среднесуточные значения скорости плазмы, а кривые в центре — суточные суммы индексов K_p за соответствующий день. Характер изменения обеих величин почти совпадает.

Ранее предполагалось, что зависимость геомагнитной активности от солнечного ветра главным образом обусловлена плотностью энергии или давлением плазмы. Нижние кривые на рис. 10 и 11 представляют среднесуточные значения плотности энергии направленного движения плазмы. Видно, что плотность энергии обычно самая высокая на ведущем краю потока, где отмечается высокая ионная концентрация.

Температура α -частиц

Вернемся к обсуждению части спектра, соответствующей α -частицам. Чтобы вычислить концентрацию протонов, скорость направленного движения плазмы и температуры протонов, мы до

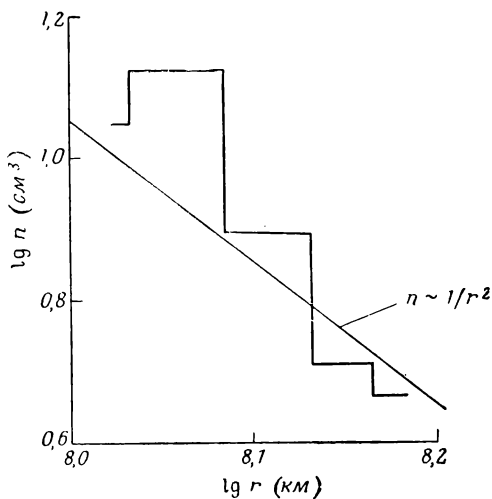


Рис. 8. График зависимости логарифма протонной концентрации от логарифма расстояния от Солнца. Концентрация усреднялась за полный оборот Солнца.

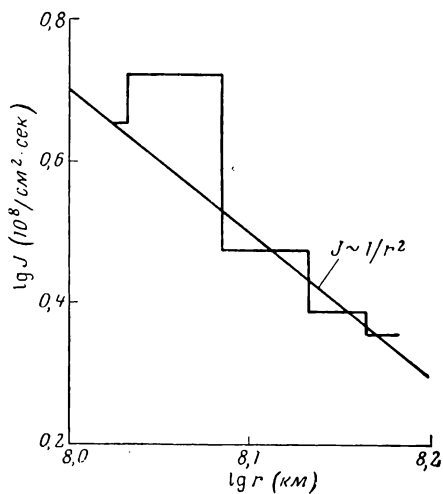


Рис. 9. График зависимости логарифма потока протонов от логарифма расстояния от Солнца. Поток усреднялся за полный оборот Солнца.

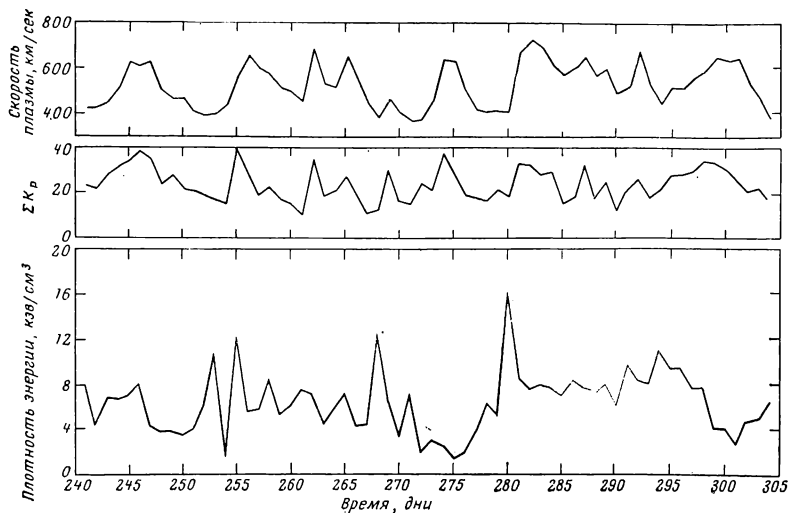


Рис. 10. Среднесуточные значения скорости плазмы; сумма 8 значений индекса K_p за каждые сутки; плотность энергии направленного движения протонов за период с 29 августа по 31 октября 1962 г. (с 241-го по 304-й день).

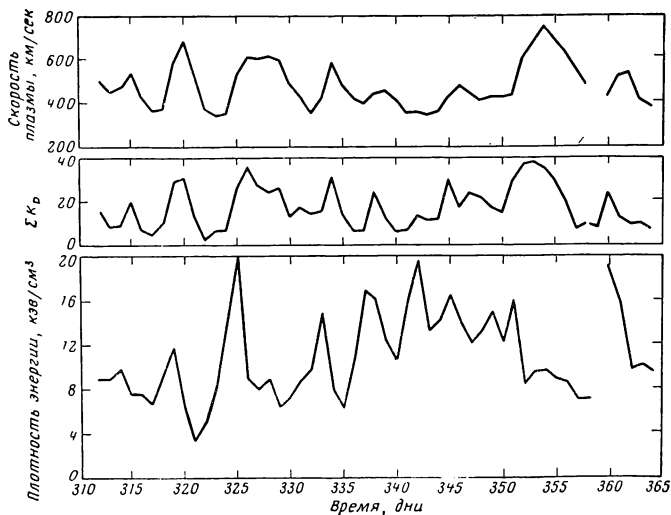


Рис. 11. Среднесуточные значения скорости плазмы; сумма 8 значений индекса K_p за каждые сутки; плотность энергии объемного движения протонов за период с 8 ноября по 30 декабря 1962 г. (с 312-го по 364-й день).

сих пор использовали лишь токи трех последовательных каналов: ток канала, в котором наблюдался максимум I_m , и токи I_{m-1} и I_{m+1} в двух соседних каналах. Используя эти три параметра, а также величину тока в канале $m+2$ и предполагая, что скорость направленного движения и температура α -частиц и протонов одинакова, мы вычислили отношение n_α/n_p , представляющее собой относительную концентрацию α -частиц.

Чтобы выяснить, насколько хороша эта модель, мы проверили справедливость сделанных предположений. Используя вычисленные значения скорости, температуры и концентрации протонов и α -частиц, мы вычисляли ток в канале $m+3$ и сравнивали полученное значение с измеренным. При выполнении этого расчета пришлось немного поступиться строгостью. Мы рассматривали лишь спектры, для которых v было примерно 1,051. При v , равном этому магическому числу, максимум α -частиц должен приходиться на канал $m+2$ (четвертая точка в спектре). Это позволяет более точно определить n_α/n_p по сравнению с тем, что можно было бы получить, если бы спектр α -частиц в этом канале был крутым. Кроме того, вклад α -частиц в первые три канала незначителен при $v=1,051$. Поэтому для наблюдавшихся температур предположение, что в первых трех каналах регистрировались лишь протоны, использованное нами при определении n_p , v и T , справедливо.

На рис. 12 представлены две гистограммы отношения измеренного тока в пятом канале к вычисленному значению. Если бы модель была приемлемой, то верхняя гистограмма должна была бы центрироваться около 1. Заштрихованная площадь представляет спектры, для которых нельзя было вычислить отношение; все, что можно было сделать, — это получить лишь нижний предел. Таким образом, точки, представляемые двойной штриховкой, должны располагаться значительно правее. Очевидно, что наблюдавшийся ток в канале $m+3$ на три порядка, а то и более превосходит расчетное значение. Мы сделали вывод, что принятая модель не вполне хороша.

Расчеты были повторены в предположении, что α -частицы в 4 раза горячее протонов. Это означает, что ионы обоих типов имеют одинаковые тепловые скорости, а не температуру. Результаты этого расчета представлены на нижней гистограмме рис. 12. Модель все еще не совершенна, но она отклоняется от хорошей всего лишь в 2—3 раза, а не на 3 порядка.

Существует несколько моделей, которые лучше соответствуют измеренным спектрам. Одна из них: $v_\alpha = v_p$, а $T_\alpha > 4T_p$. Поскольку трудно подвести какую-либо физическую основу под такую модель, то вряд ли стоит беспокоиться о том, насколько T_α должно превосходить $4T_p$. Другая модель требует равенства

тепловых скоростей обоих сортов ионов, при этом скорость направленного движения α -частиц от Солнца должна быть несколько выше скорости протонов. И для этой модели трудно подыскать физическое объяснение.

Дэвис высказал мнение, что полученную гистограмму можно было бы сдвинуть немного влево, если предположить, что космический аппарат имеет большой положительный заряд. Можно

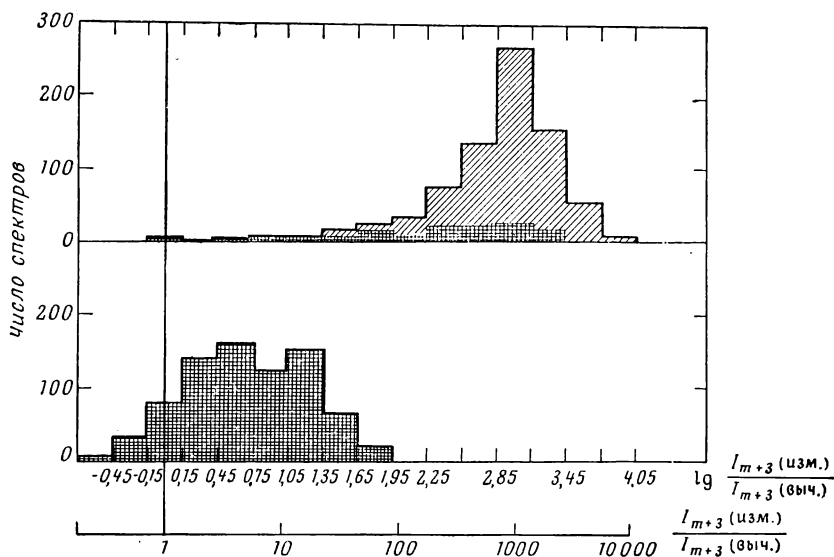


Рис. 12. Гистограммы отношения измеренного тока к вычисленному в канале $m+3$ в предположении, что протоны и α -частицы имеют одинаковую температуру (вверху) или одинаковые тепловые скорости (внизу).

было бы сместить верхнюю гистограмму до правильного положения, если допустить, что космический аппарат был заряжен до $\sim 100\text{--}200$ в. Но при разумных допущениях о заряде аппарата на это нет никакой надежды.

Мы считаем, что действительно слабым местом нашей модели является предположение об изотропном максвелло-большцмановском распределении ионов¹⁾. Однако в измеряемых спектрах нет достаточного количества точек, чтобы рассчитать в деталях сложную модель.

¹⁾ Более совершенные измерения при помощи электростатического анализатора на «Пионере-6» позволили установить наличие анизотропии температуры по отношению к магнитному полю. Температура вдоль поля в 2—5 раз превосходит температуру поперек поля [4*]. — *Прим. перев.*

Отношение числа α -частиц к числу протонов

Мы взяли на нижней гистограмме точки, для которых $\lg [I_{m+3}(\text{изм.})/I_{m+3}(\text{выч.})]$ был заключен в пределах от $-0,2$ до $+0,2$, и определили n_α/n_p для этих спектров, лучше всего соответствующих модели, в которой предполагается равенство тепловых скоростей. На рис. 13 дается зависимость отношения n_α/n_p от m (номер канала, в котором наблюдается максимум; это число пропорционально логарифму скорости).

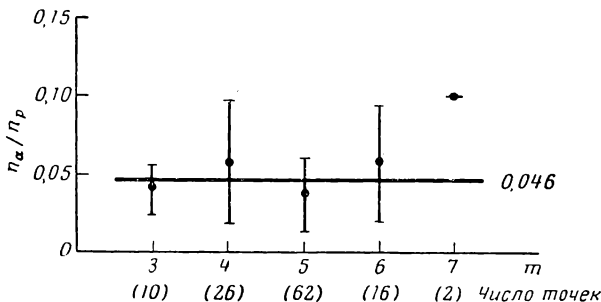


Рис. 13. Отношение концентрации α -частиц к концентрации протонов для спектров, удовлетворяющих модели одинаковой тепловой скорости, в зависимости от m , т. е. номера канала, где наблюдался максимум. m пропорционально логарифму скорости плазмы.

Среднее значение отношения концентрации α -частиц к концентрации протонов составляло $\sim 0,046$. Эта величина несколько ниже предсказанной. По-видимому, нет какой-либо четкой зависимости этого отношения от энергии.

Зависимость температуры от магнитного поля

Выше было показано, что температура α -частиц, вероятно, примерно в 4 раза выше температуры протонов или что оба сорта ионов имеют одинаковые тепловые скорости. Интересен также тот факт, что эти тепловые скорости приблизительно равны альвеновской скорости. Мы изучили 212 спектров, для которых были известны как концентрация, так и магнитное поле, и установили, что отношение тепловой скорости к альвеновской составляет $1,2 \pm 0,5$. Это отношение представляет собой квадратный корень из отношения плотности кинетической энергии теплового движения nkT к плотности энергии магнитного поля $B^2/8\pi$. Таким образом, утверждение, что альвеновская скорость приблизительно равна тепловой, равносильно утверждению, что энергия

теплового движения и магнитного поля соизмеримы, с чего, по-видимому, следовало начинать, как предвидели некоторые.

Я полагаю, что этот результат указывает на то, что хаотическое движение частиц солнечного ветра обусловлено не нагреванием их около Солнца и последующим охлаждением вследствие адиабатического расширения, а взаимодействием

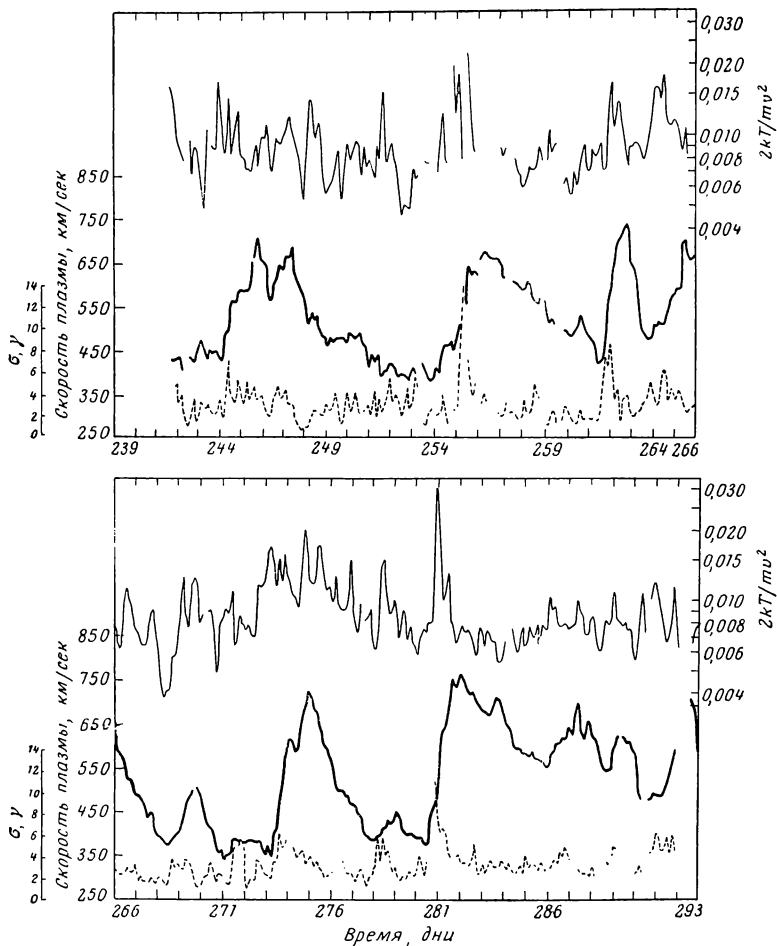
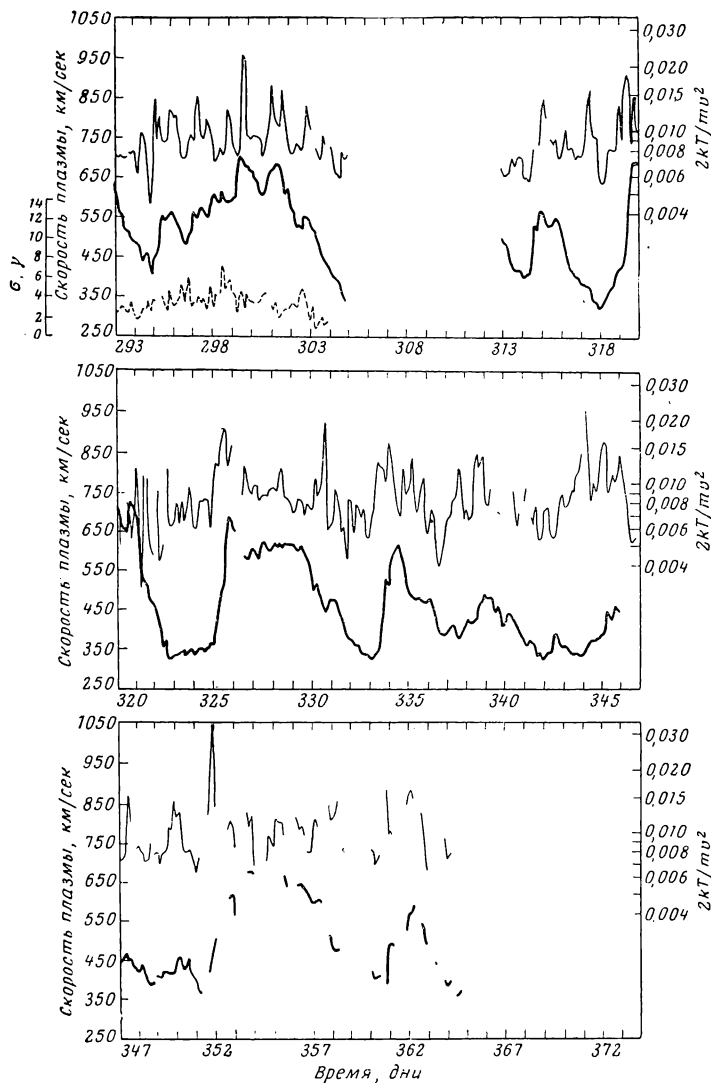


Рис. 14. Отношение энергии теплового движения протонов к энергии направленного движения плазмы $2kT/mv^2$ (тонкая линия) и среднеквадратичное отклонение магнитного поля (пунктирная линия) за период с 29 августа по 19 октября 1962 г. (с 241-го по 292-й день). Жирная линия — скорость плазмы.



Р и с. 15. Отношение энергии теплового движения протонов к энергии направленного движения плазмы $2kT/mv^2$ (тонкая линия), среднее квадратичное отклонение магнитного поля (пунктирная линия) и скорость плазмы (жирная линия) за период с 20 октября по 30 декабря 1962 г. (с 293-го по 364-й день)

ионов с возмущениями магнитного поля. Плазма является турбулентной, через нее движутся магнитогидродинамические ударные волны. Ионы отражаются от ударной волны со скоростью того же порядка, что и скорость движения ударной волны.

Это предположение в какой-то степени подтверждается графиками рис. 14, на которых жирные линии обозначают 3-часовые средние значения скорости. Пунктирной линией показаны вариации магнитного поля, или среднеквадратичное отклонение относительно 3-часового среднего значения. Вариации магнитного поля были самыми сильными на ведущем краю потока, особенно в 255-й, 261-й и 280-й дни. Поле возмущено значительно сильнее в тех местах, где следует ожидать существования турбулентности, т. е. где потоки, движущиеся с большой скоростью, догоняют более медленно движущуюся плазму. Верхняя кривая рис. 14 — это отношение плотности тепловой энергии к плотности энергии направленного движения, т. е. рассматривавшийся ранее параметр θ .

Рис. 14 показывает, что когда наблюдается сильное магнитное возмущение (в плазме распространяются ударные волны), θ обычно велико. Иными словами, когда космический аппарат обгоняется потоком горячей быстрой плазмы, температура увеличивается быстрее, чем скорость. Как правило, наблюдается хорошая связь между θ и дисперсией магнитного поля. На рис. 15 приведены аналогичные данные для 3 последних оборотов Солнца в период полета «Маринера-2». Видно, что θ увеличилось, а затем уменьшилось вновь к тому времени, когда скорость достигла своего максимального значения. Хорошим примером является день 351-й.

Как мы полагаем, нам удалось доказать, что температура плазмы в солнечном ветре не просто связана с температурой основания короны и что процесс нагревания плазмы за счет ударных волн, возможно, играет важную роль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neugebauer M., Snyder C. W., Science, **138**, 1095 (1962).
2. Snyder C. W., Neugebauer M., Rao U. R., Geophys. Res., **68**, 6361 (1963).
- 3*. Neugebauer M., Snyder C. W., J. Geophys. Res., **71**, № 19, 4469 (1966).
- 4*. Scarf F. L., Wolfe J. H., Silva R. W., J. Geophys. Res., **72**, № 3, 993 (1967).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА НЕЙГЕБАУЭР

Бирман. Вы не провели различия между температурой и турбулентностью. Поскольку турбулентности присуща довольно высокая частота, я полагаю, соответствующий вывод состоит в том, что вы по существу имеете

сонизмеримые энергии турбулентности и флуктуаций магнитного поля. Я не могу привести убедительных доводов в пользу связи этих флуктуаций с температурой.

Нейгебауэр. Вполне возможно, что тепловое движение невелико и что наблюдалось лишь турбулентное движение. Я думаю, что мы не в состоянии разделить эти величины до тех пор, пока не получим спектры со значительно большим числом точек.

Паркер. Какова продолжительность замеров в различных каналах?

Нейгебауэр. Замер длится секунду или чуть меньше. Я не думаю, что мы наблюдаем огибающую существующих в плазме магнитогидродинатических волн, поскольку циклотронный период протона равен ~ 10 сек.

Паркер. Если вы наблюдаете турбулентность, то ее частота равна 1 гц, чтобы получить то, что вы называете температурой. Правильно я вас понял?

Нейгебауэр. Да.

Несс. В отношении заявления Паркера: разве время, которое затрачивается на сканирование одного спектра (3,7 мин), менее существенно, чем время, которое затрачивается на один замер?

Нейгебауэр. Не совсем так. Для проведения полного цикла наблюдений необходимо 3,7 мин. Каждое отдельное измерение тока требует немногим меньше 1 сек. Если бы существовали вихри с периодами от 1 сек до 3,7 мин, не было бы такой высокой повторяемости результатов измерений. За весь период полета лишь в одном интервале наблюдалось очень резкое изменение значения скорости и концентрации между двумя последовательными 3,7-минутными циклами. За исключением этого единственного интервала в несколько часов, плазма была довольно устойчивой.

Снайдер. Весьма характерно то, что во всех 10 каналах регистрировались одинаковые токи в течение 20 последовательных измерений. Я полагаю, это исключает мысль о том, что мы наблюдали лишь турбулентность.

Бридж. Нет оснований ожидать когерентности между фазой флуктуаций и периодом ваших измерений. Иными словами, я согласен с тем, что если поток плазмы устойчив, то ваш временной масштаб уменьшается от 3,7 мин до ~ 1 сек — продолжительности одного замера.

Петчек. Сравнима ли энергия флуктуаций магнитного поля с энергией усредненного магнитного поля?

Дэвис. Это зависит от частоты флуктуаций. Если вы спрашиваете о флуктуациях с периодом 5—7 мин, то большую часть времени энергия флуктуаций не так велика, как энергия в усредненном поле. Если же вы имеете в виду флуктуации с периодом один день, то энергия флуктуаций довольно велика.

Петчек. Но если сопоставить более короткие интервалы времени, как это было сделано, то очевидно, что тепловая энергия будет больше энергии магнитных флуктуаций. Поэтому наблюдаемый разброс скоростей частиц не может быть простым отражением гидромагнитной турбулентности.

Люст. В каком соотношении находятся постоянные времени плазменного спектрометра и магнитометра?

Нейгебауэр. За время, необходимое для измерения полного спектра плазмы, магнитометр производит 6 полных измерений магнитного поля. Обои приборам для проведения одного измерения требуется ~ 1 сек.

Несс. Проводили ли вы спектральный анализ магнитных флуктуаций для определения формы спектра? ¹⁾ Из ваших пояснений я сделал вывод, что

¹⁾ Результаты спектрального анализа магнитных вариаций по данным «Маринера-2» изложены в недавно опубликованной работе Колемана [P. J. Coleman, J. Geophys. Res., 71, № 23, 5509 (1966)]. — Прим. перев.

очень много энергии содержится в низкочастотных флуктуациях и сравнительно мало в высокочастотных.

Дэвис. Низкие частоты содержат значительно больше энергии, чем высокие¹⁾.

Дейч. А что если значительное количество частиц, которые в настоящее время мы считаем α -частицами, в действительности являются однократно ионизованными атомами гелия?

Нейгебауэр. Однократно ионизованный гелий должен иметь энергию на единицу заряда в четыре раза больше энергии протона, поэтому он не должен наблюдаться в той же области спектра, что и α -частицы. Поскольку мы не обнаружили максимума при соответствующем значении энергии на единицу заряда, то по порядку величины наблюдаемые данные, вероятно, соответствуют больше дважды, а не однократно ионизованному гелию.

Однако небольшая примесь однократно ионизованного гелия сместила бы немного влево нижнюю гистограмму (см. рис. 12) и, следовательно, привела бы к лучшему согласию между измеренным спектром и моделью.

Чемпен. Существует ли трудность с отношением концентрации протонов к концентрации гелия или же его можно объяснить представлением о солнечном ветре?

Паркер. Если вы спрашиваете, обладает ли расширяющаяся солнечная корона таким же относительным содержанием элементов, как и Солнце, то, безусловно, надо учесть, что более тяжелые элементы могут осесть. Если вы оцените скорость оседания гелия и сравните ее со скоростью расширения короны, то скорости окажутся примерно равными и вы будете колебаться между двумя решениями.

Я думаю, что состав солнечной короны соответствует составу Солнца. Решить эту проблему можно лишь, измеряя день за днем относительное содержание гелия в солнечном ветре. И если вы обнаружите, что оно будет всегда одинаковым, то можете сделать вывод, что наблюдаемое значение является истинным относительным содержанием гелия на Солнце²⁾.

Нейгебауэр. Наблюдавшиеся нами отношения концентраций α -частиц к протонам изменялись в довольно широких пределах, примерно от 0,01 до 0,30.

Джонкипи. Недавно я довольно подробно исследовал относительное содержание α -частиц, и, как мне кажется, существуют две возможности. Либо α -частицы не осаждаются из короны достаточно быстро, и тогда их относительное содержание в короне увеличивается, либо они оседают достаточно быстро, и в этом случае их относительное содержание в солнечном ветре уменьшается. В действительности, по-видимому, сочетаются оба случая³⁾.

¹⁾ См. гл. 3.

²⁾ См. E. N. Parker. The Solar Corona, ed. J. W. Evans, Academic Press, New York, 1963, p. 11.

³⁾ См. гл. 14.

Г л а в а 2

СВЯЗЬ ДАННЫХ «МАРИНЕРА-2» О ПЛАЗМЕ С ЯВЛЕНИЯМИ НА СОЛНЦЕ

К. У. Снайдер и М. Нейгебауэр

Мы обнаружили тесную корреляцию между скоростью солнечной плазмы, измерявшейся на «Маринере-2», и интенсивностью магнитных возмущений на Земле. Но что можно сказать о связи между скоростью солнечного ветра и явлениями, происходящими на Солнце? Я пробовал идти различными путями, но пока положение остается запутанным. Казалось бы, можно и не выступать, однако мне хочется сделать некоторые замечания.

Метод экстраполяции

Предполагая, что скорость солнечного ветра постоянна на всем пути его движения от Солнца до места наблюдения, можно точно рассчитать место на Солнце, откуда была испущена плазма. На этом предположении основана модель магнитного поля в виде спирали Архимеда. Спиральная силовая линия поля соединяет космический аппарат с источником. Простейшее уравнение спирали Архимеда имеет вид $r = v(\varphi_0 - \varphi)/\Omega$, где Ω — угловая скорость вращения Солнца на гелиографической широте, с которой выброшены частицы. Когда скорость плазмы увеличивается, то спираль может догонять силовые линии, расположенные впереди, однако всю эту картину довольно трудно изобразить. Поскольку уравнение спирали линейное (пусть $r = y$, $\varphi = x$), эти наложившиеся спирали становятся прямыми линиями и их гораздо легче представить.

На рис. 1 изображены спиральные магнитные силовые линии в прямоугольной системе координат. Верхняя линия E — это орбита Земли; по горизонтали отложены дни. Горизонтальная шкала дает нам положение Земли в системе координат, вращающейся вместе с Солнцем. Нижняя прямая S соответствует поверхности Солнца. На ней отложены дни с учетом «отставания» Земли. Шкалы подгоняются таким образом, что наклонные линии, представляющие магнитные силовые линии, имеют угол наклона, соответствующий спирали Архимеда вблизи Земли, и

эти силовые линии представляют наблюдения скорости в 12-часовых интервалах.

В верхней части рис. 1 изображен случай, когда область между точками A и B на Солнце излучает плазму, распространяющуюся со скоростью 300 км/сек. Между B и C скорость постепенно увеличивается за 8 суток до 900 км/сек, а затем в интервале от D до E вновь уменьшается до 300 км/сек (опять за 8 суток). Если рассмотреть эту картину с точки зрения земного

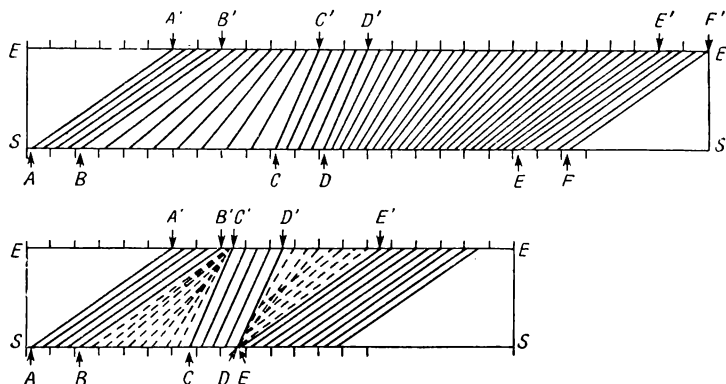


Рис. 1. Представление спирали Архимеда $r(\varphi)$ в прямоугольной системе координат, показывающее влияние изменения скорости солнечного ветра.

наблюдателя (соответствующие буквы помечены штрихами), то увеличение скорости происходило всего лишь 4 суток, а последующее уменьшение заняло 12 суток.

В нижней части рисунка изображен пример, часто наблюдавшийся в период измерений на «Маринере-2». (Обозначения те же, что и выше.) Увеличение скорости в данном случае имеет место в довольно узкой области на Солнце (между B и C), что соответствует разности 4,5 суток между прохождениями через центральный меридиан. Быстро движущаяся плазма выметает медленно движущуюся впереди нее плазму, так что первая магнитная силовая линия с большим наклоном достигает Земли меньше чем через 12 час после того, как наблюдалась последняя силовая линия с малым наклоном. На этом рисунке промежуточные линии показаны пунктиром. Однако на картах, которые будут показаны позднее, они опущены, и в результате мы увидим треугольник, основание которого будет лежать на нижней кривой. Картина между D' и E' еще более запутанна, поскольку в данном случае уменьшение скорости на расстоянии орбиты Земли длится 4 суток, а наблюдаемые в период уменьшения

скорости магнитные силовые линии экстраполируются на Солнце левее линии $D - D'$. Если в этом случае убрать с карты пунктирные линии, то мы получим треугольник, основание которого лежит на верхней кривой. Такие быстрые падения скорости, наблюдавшиеся на «Маринере-2» более 12 раз, свидетельствуют о том, что по крайней мере в такие моменты простая спиральная модель поля не соответствует действительности.

Общая корреляция

Рис. 2 представляет хорошо известную картину одного из индексов магнитной активности C9 [1]. Примерно с 6-го по 10-й день каждого солнечного оборота наблюдалось устойчивое магнитное возмущение, которое повторялось в каждом обороте в течение года. Оно началось во время солнечного оборота № 1766, т. е. за месяц до запуска «Маринера-2». Аналогично наиболее устойчивый поток быстрой плазмы, наблюдавшийся на «Маринере-2», регистрировался именно в те моменты, когда мы могли его наблюдать, и имел место с 6-го по 10-й день в каждом солнечном обороте. Вследствие уникальности этого потока и уникальности данной последовательности магнитных возмущений, а также потому, что в соответствующей области на Солнце наблюдалась серия кальциевых флоккулов, возникших и существовавших в течение этого периода, весьма соблазнительно сделать вывод, что есть некоторая причинная связь между этими явлениями.

Однако если вы попытаетесь определить эту связь более детально, то оказывается, что все страшно запутанно.

Детальная корреляция

В верхней части рис. 3 нанесены 3-часовые средние значения скорости плазмы для солнечного оборота № 1767 из [2]. Прямые линии сверху указывают периоды магнитных бурь, это самые сильные бури года. Числа с 239 по 268 обозначают номера дней наблюдений, начиная с 1-го дня — 1 января 1962 г.

В средней части рис. 3 прямыми линиями представлены спиральные магнитные силовые линии. Эта часть графика в сущности точно воспроизводит рис. 1, только наклон линий соответствует скоростям, измеренным не на Земле, а на «Маринере-2». Орбита космического аппарата представлена линией M и совпадает с орбитой Земли E в течение нескольких первых недель.

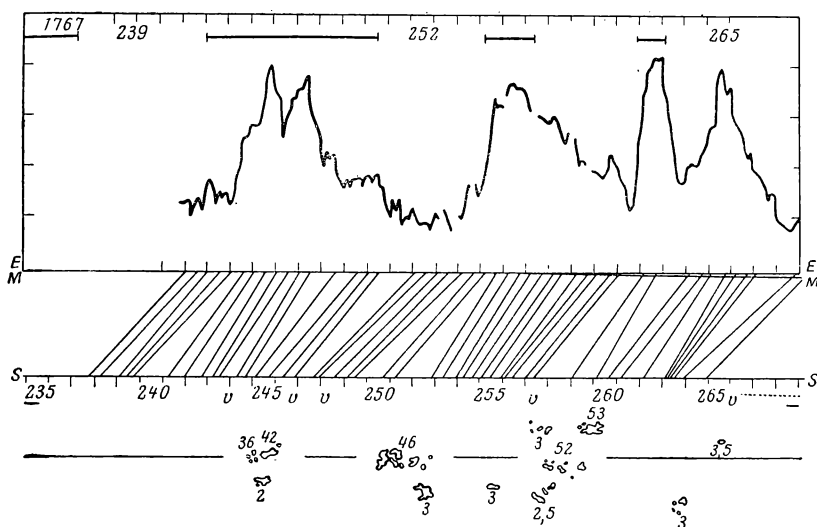
Характерные особенности на солнечной карте, представленной на нижней части рис. 3, соответствуют моменту их прохождения через центральный солнечный меридиан (если смотреть

R	Rot-Nr.	1st day	C9
665 532 122	19	J 23	... 23 12 ... 51 51 ... 35 443 64 ... 2432
677 643 112	F 19		... 2432 244 ... 22 2462 ... 33 421 ... 2434
665 332 213	62	M 18	2434 112 ... 2 ... 3 243 676 652 ... 22 232
655 433 433	1762	A 14	... 22 232 356 3 3 322 ... 12 21 ... 52 ... 2 3442
322 454 632	63	M 11	... 3 442 3 ... 3 ... 52 ... 322 2 542
333 543 333	64	J 7	... 5 42 123 ... 3 36 ... 25 644 222 543 23
222 222 211	65	J 4	543 23 222 32 ... 343 224 476 52 ... 363 312
... 24 332	66	J 31	363 312 556 53 ... 555 54 ... 64 542 ... 4466
35 564 422	67	A 27	... 4 466 676 454 433 275 342 2 6435 4 ... 622
464 223 553	68	S 23	4 ... 622 547 533 343 665 623 635 246 345 566
333 221 224	69	O 20	345 566 665 342 244 5 5 42 ... 3 ... 6 62 5
531 213 431	1770	N 16	62 ... 5 654 5 2 216 2 42 ... 63 433 67
213 211 231	71	O 13	433 677 65 3 ... 4 ... 3 ... 66
223 211 223	19	J 9	... 66 665 45 ... 12 32 ... 674 ... 27
321 112 211	63	F 5	... 27 556 52 ... 211 ... 212 ... 265
232 211 211	M 4		... 65 753 2 ... 21 ... 31 ... 3 ... 56
224 444 31	1775	M 31	3 ... 56 542 2 ... 234 4 ... 422 32 ... 2 566
222 454 553	76	A 27	2 ... 566 452 213 445 252 ... 12 ... 22 245
223 225 642	77	M 24	2 ... 245 323 3 ... 47 32 ... 12 252 32 ... 5
122 221 112	78	J 20	32 ... 5 643 23 ... 4553 343 ... 42 ... 63
122 144 421	79	J 17	42 ... 63 563 44 ... 65 442 333 222 ... 226
233 422	1780	A 13	... 2 6676 252 224 643 453 433 32 325

Symbol	1	2	3	4	5	6	7	8	■
R = 0	1	16	31	46	61	81	101	121	171
	15	30	45	60	80	100	120	170	
C9 = 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cp = 0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5		2.0
	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4	1.8	2.5
Ap = 0	5	8	11	14	18	25	41	92	141
	4	7	10	13	17	24	40	91	140

Рис. 2. Геомагнитные индексы C9 и числа солнечных пятен R для солнечных оборотов № 1759—1780.

с Земли). Эта карта построена с сохранением масштаба и формы солнечных образований и включает все флоккульные области балла 3 и более, или площадью 1000 или более миллионных долей солнечного диска. Флоккулы, составляющие долгоживущие последовательности, обозначаются двумя последними цифрами их номера по данным обсерватории Мак-Мас — Халберт.



через центральный меридиан с наблюдаемым максимумом скорости.

Это не всегда имеет место, но тенденция к этому существует: источники струй, движущихся с большой скоростью, примерно на день не совпадают с местами предполагаемого положения источников. Этот вывод подтверждает мнение, что М-области не видны на поверхности Солнца. Это заявление не содержит ничего нового, но оно менее голословно, чем предыдущие.

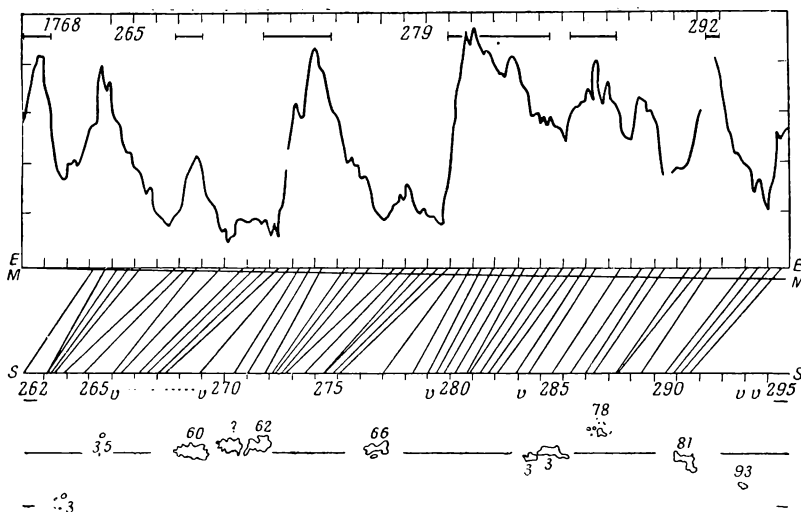


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для оборота № 1768.

На рис. 3 строчной буквой *v* отмечено предполагаемое положение источников, вызывающих увеличение интенсивности потока энергичных заряженных частиц, регистрировавшихся на «Маринере-2» счетчиком Гейгера типа 213. Регистрируемые частицы — это либо протоны с энергией выше 0,5 Мэв, либо электроны с энергией выше 40 кэв. В общей сложности наблюдалось 13 таких всплесков, которые так же довольно трудно связать с какими-либо видимыми образованиями на Солнце.

На рис. 4 представлены данные для следующего солнечного оборота. Магнитная силовая линия, которая ассоциируется со слабым максимумом скорости в начале 274-го дня, все же связана с флэккульной областью, обозначенной знаком вопроса. Следующий максимум, наблюдавшийся в конце 274-го дня и в начале 275-го дня, вероятно, связан с флоккульной областью 62. Если бы наблюдались лишь такие случаи, то можно было

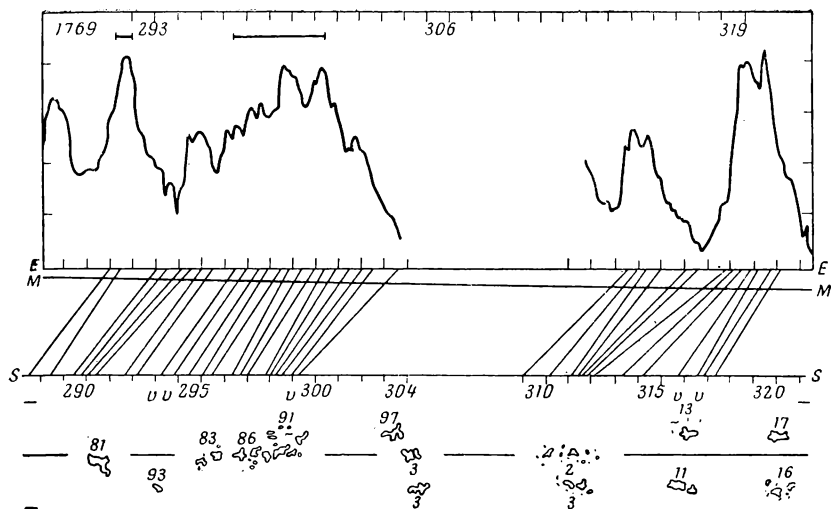


Рис. 5. То же, что на рис. 3, для оборота № 1769.

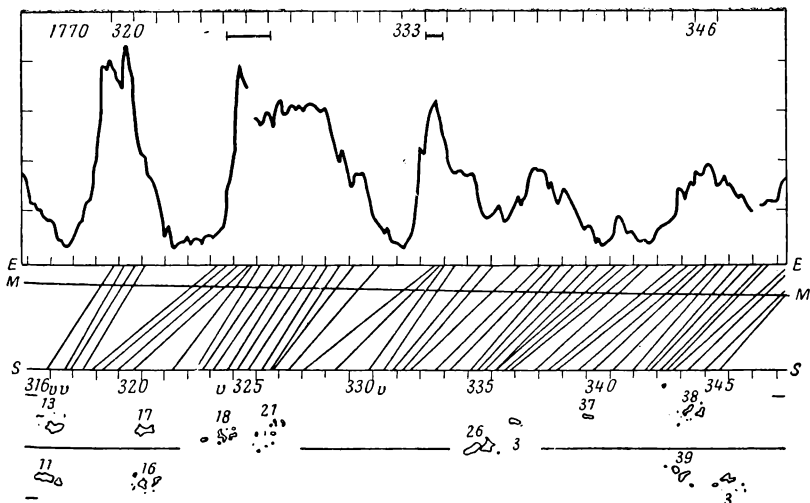


Рис. 6. То же, что на рис. 3, для оборота № 1770.

ся максимумом скорости, заканчивается на Солнце в довольно спокойной области, расположенной между двумя флоккульными областями, которые можно было бы считать источниками.

На рис. 7 приведены данные для оборота Солнца № 1771 — последнего, во время которого производились измерения на «Маринере-2». И опять «путешествие» вдоль силовой линии от максимума 354-го дня приводит в сравнительно спокойную область на Солнце. Правда, значительно южнее проекции космического аппарата все же есть слабая активная область (не показанная на рисунке).

Данные, по-видимому, указывают на то, что не существует хорошей связи между флоккульными областями и солнечными потоками¹⁾, если только не предположить, что либо скорость не постоянна, либо быстрая плазма выбрасывается Солнцем не по радиусам, так что простая модель спиралей Архимеда неверна²⁾.

ЛИТЕРАТУРА

1. Central Radio Propagation Laboratory, Compilations of Solar Geophysical Data, abstracted from CRPL-F Part B, U. S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, October, 1963.
2. Lincoln V. J., Geophys. Res., **68**, № 2, 4, 6 (1963).
- 3*. Афанасьева В. И., Геомагнетизм и аэрномия, **4**, № 1, 34 (1964).
- 4*. Иванов К. Г., Геомагнетизм и аэрномия, **6**, № 2, 190 (1966).
- 5*. Ness N. F., Wilcox J. M., Phys. Rev. Letters, **13**, № 15, 461 (1964)

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА СНАЙДЕРА

Брандт. Не пытались ли вы установить корреляцию между скоростью плазмы и данными о короне?

Снайдер. Не настолько подробно, чтобы дать уверенный ответ. Однако я полагаю, что ответ будет таким же, как и для флоккульных областей.

Дэвис. Я полагаю, что напряженность магнитного поля около Солнца достаточно велика, чтобы заметно влиять на солнечный ветер. Для меня нет ничего удивительного в том, что ветер по данным «Маринера-2» и активные области на Солнце не совпадают на день или на два.

Атей. Была проделана большая работа в надежде найти корреляцию между магнитными бурями, связанными с *M*-областями, и явлениями на поверхности Солнца. Мустель³⁾ обнаружил, что если учесть все активные области за день или за два до и после прохождения через центральный мери-

¹⁾ В. И. Афанасьева [3*] и К. Г. Иванов [4*] на основе анализа данных «Маринера-2» высказывают мнение, что источниками струй были кальциевые флоккулы и что всем случаям вхождения космического аппарата в струю предшествовали прохождения кальциевых флоккулов через центральный меридиан. — *Прим. ред.*

²⁾ Напротив, данные измерений межпланетного магнитного поля на спутнике «ИМП-1» подтверждают спиральность магнитных силовых линий [5*]. — *Прим. перев.*

³⁾ Э. Р. Мустель, Астрон. ж., **43**, вып. 6, 1121 (1966). — *Прим. перев.*

диан, то фактически можно связать большинство магнитных бурь M -областей с активными областями на Солнце. Однако это еще не доказывает, что корреляция имеет физическое значение.

Если рассматривать поверхность Солнца с большим увеличением, то очень часто видно, что в активной области вещество быстро движется, причем преимущественно в одном, а не во всех квадрантах. Таким образом, вполне возможно, что вытекающее из Солнца вещество движется нерадиально.

Уилкерсон. Наблюдалась ли корреляция между отношением концентрации гелия к водороду и вращением Солнца?

Снайдер. Я не думаю, чтобы мы могли что-то заметить. Информация об относительном содержании гелия и водорода была довольно скудной.

Блок. Насколько убедительны доводы для предположения, что скорость постоянна на всем протяжении от Солнца до Земли?

Предположим, что плотность энергии магнитного поля обратно пропорциональна четвертой степени расстояния по радиусу и что концентрация, согласно данным Нейгебауэр¹⁾, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния, так что плотность кинетической энергии убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Это означает, что около Солнца плотность энергии магнитного поля несколько больше плотности кинетической энергии, следовательно, при своем движении от Солнца плазма должна производить некоторую работу против магнитного поля, а это приведет к ее замедлению.

Снайдер. Однако для более тесной корреляции необходимо ускорение.

Дейч. Какова продолжительность движения потока? При отсутствии магнитного поля движение потока описывается одним из критических решений Паркера и становится радиальным сверхзвуковым. Нельзя ли при таком подходе изменить время движения на день или два, как это необходимо.

Паркер. Это зависит от того, с какого момента вы начнете отсчитывать время. Если отсчитывать время, когда расстояние $2R_{\odot}$ от центра Солнца, то в этом случае продолжительность увеличится лишь примерно на сутки. Если же начать отсчет с верхней части фотосферы, то придется прибавить несколько месяцев, так как газу требуется столько времени, чтобы попасть из фотосферы в корону.

Дейч. Итак, обычное газовое давление даже в отсутствие магнитного поля может объяснить запаздывание, которое обнаруживают данные?

Паркер. Да. Я не вижу, чтобы магнитные поля играли значительную роль в этом процессе. Они имеют более или менее постоянную энергию.

Дейч. Нам говорили, что течение нельзя рассматривать как просто адиабатическое расширение. Однако я считаю, что как профиль скоростей, так и профиль температуры довольно хорошо соответствует такой модели.

Паркер. Вряд ли стоит ожидать, что течение является адиабатическим. Но температура за пределами $20-30 R_{\odot}$ не связана с конечными значениями скоростей солнечного ветра. Однако для упрощения математических расчетов очень часто течение на больших расстояниях от Солнца считают адиабатическим. Если вас не интересует температура газа на расстоянии 1 а. е., то вы вполне можете считать течение адиабатическим. Если же вы хотите знать температуру, то это совсем другая задача²⁾.

Дейч. Так, может быть, это простая случайность, что мы наблюдаем температуру, соответствующую адиабатическому течению?

Паркер. Наблюдаемые температуры, по-видимому, выше тех значений, которые следует ожидать при адиабатическом расширении. Если вспомнить

¹⁾ См. гл. 1, стр. 40. — *Прим. перев.*

²⁾ См., например, E. N. Parker, *Interplanetary Dynamical Processes*, Interscience Publ., a division of John Wiley and Sons., Inc., New York, 1963.

графики, показанные Нейгебауэр, то из них следует, что иногда наблюдалась температура около миллиона градусов, которая соответствует температуре почти изотермического процесса.

Слуц. Дают ли данные наблюдений информацию о направлении и о скорости потока? Если да, то должны быть экспериментальные данные, подтверждающие некоторые из этих предположений.

Снайдер. Нет абсолютно никаких данных о направлении скорости, поскольку прибор был ориентирован всегда на центр Солнца.

Ясно, что две основные характеристики плазмы — относительное содержание α -частиц и направление движения плазмы — были определены недостаточно хорошо. Я могу добавить, что ни на одном из последних космических аппаратов не проводилось определений этих характеристик. Эти данные, по-видимому, будут получены в будущем ¹⁾.

Нейгебауэр. Поскольку поток плазмы наблюдался все время, то мы наверняка знаем, что отклонение направления потока от радиального не превышало 10° .

Снайдер. Да, я полагаю, что это очень важный момент. Хотя возможно, что поток никогда не приходил прямо от Солнца, тем не менее его направление никогда сильно не отличалось от радиального.

Зирин. У меня есть два замечания. Во-первых, что касается флоккульных областей, я не вижу ничего таинственного в прохождении через центральный меридиан, хотя это очень удобное положение на Солнце. Активность этих областей очень сильно меняется; в некоторые дни она очень высока, а в другие — очень низка. Совсем не обязательно, чтобы прохождение области через центральный меридиан совпадало с тем днем, когда активность этой области наибольшая.

Во-вторых, вы меня убедили в том, что, измеряя индекс K_p , мы тем самым измеряем скорость солнечной плазмы. Мы имеем данные за 50 лет, к которым можно применить подобный анализ.

Снайдер. Измерения плазмы на «Маринере-2» впервые дали точные сведения о скорости, позволившие провести такой анализ. Мы должны были бы указать с точностью до $1-2^\circ$ области на Солнце, с которыми связано увеличение скорости, но мы не смогли этого сделать. Скорости, которые можно вычислить на основе индексов K_p за последние 50 лет, будут значительно менее точными.

¹⁾ Наиболее точные сведения получены на космических аппаратах «Пионер-6» и «Вела-3» [см. F. L. Scarf, J. H. Wolfe, R. W. Silva, J. Geophys. Res., 72, № 3, 993 (1967); A. J. Hundhausen, J. R. Asbridge, S. I. Bame, H. E. Gilbert, I. B. Strong, J. Geophys. Res., 72, № 1, 87 (1967)]. — *Прим. перев.*

МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ
В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Л. Дэвис, Э. Дж. Смит, П. Дж. Колеман, К. П. Сонетт

Магнитометрические измерения на «Маринере-2»

Среди приборов, установленных на «Маринере-2», был трехкомпонентный феррозондовый магнитометр [1] с датчиками, расположенными вдоль трех осей (X , Y , Z) прямоугольной системы координат, фиксированной по отношению к космическому аппарату. Интервал времени между последовательными измерениями компонент магнитного поля составлял 1,9 сек. Полная серия измерений всех трех составляющих передавалась на Землю через каждые 36,96 сек. Хотя точность каждого отсчета составляла $\sim 0,5\gamma$ ($1\gamma = 10^{-5}$ гс), тем не менее наблюдаемое поле фактически было векторной суммой межпланетного поля и почти постоянного магнитного поля космического аппарата, так что эта точность относится лишь к вариациям межпланетного поля. Чтобы получить истинное значение межпланетного магнитного поля, необходимо из общего наблюдаемого поля вычесть поле космического аппарата. Однако определение поля космического аппарата, или «смещающего поля», зависит от определенных предположений. Поэтому смещающее поле может быть известно со значительно меньшей точностью, чем $0,5\gamma$. Описываемые в этой статье данные были получены в межпланетном пространстве в конце 1962 г. достаточно далеко от Земли, так что ее магнитное поле не оказывало влияния на результаты измерений. Геомагнитное поле и поля внутри переходной области не измерялись.

Ориентация космического аппарата, а следовательно, и магнитометра была такой, что положительная ось Z (приблизительно ось симметрии космического аппарата) была направлена от Солнца. Ориентация двух других осей X и Y зависела от режима работы космического аппарата. С 29 августа по 3 сентября космический аппарат вращался вокруг оси Z . С 3 сентября ориентация космического аппарата была стабилизирована таким образом, что ось Y располагалась в плоскости, проходящей через Солнце, Землю и аппарат, а ось X была почти параллельна направлению на северный полюс эклиптики.

Изменение составляющих X и Y в период, предшествовавший стабилизации космического аппарата, было обусловлено главным образом вращением аппарата. Вклад спокойного межпланетного магнитного поля, перпендикулярного к плоскости эклиптики, должен равняться нулю при усреднении за много оборотов. Таким образом, средние значения наблюдаемого поля представляют составляющие X и Y собственного поля космического аппарата. К счастью, в этот период межпланетное магнитное поле было относительно невозмущенным, что позволило точно определить эти составляющие. Амплитуда изменений составляющих X и Y в период вращения дает поперечную компоненту межпланетного магнитного поля.

Предварительный анализ данных «Маринера-2» позволил установить существование крупномасштабного межпланетного поля с параметрами, близкими к предсказанным теоретически. Поле (в среднем) лежало в плоскости эклиптики, а угол между радиальным направлением и направлением магнитной силовой линии соответствовал расчетному углу спирали Архимеда. Однако не следует столь поспешно интерпретировать эти данные. Дело в том, что измерения поля не были абсолютно точными. На точность измерений сильно влияло собственное магнитное поле космического аппарата, которое изменялось как в период запуска, так и позднее. Сразу же после запуска было обнаружено, что собственное поле аппарата значительно превосходило значение, которое было измерено непосредственно перед запуском. Мы полагаем, что все составляющие немного менялись в период полета.

Следовательно, чтобы получить характеристики межпланетного магнитного поля, необходимо попытаться построить модель, которая согласовывалась бы с наблюдениями. Предварительный анализ данных показал, что общепринятая модель межпланетного магнитного поля соответствует действительности. Поэтому было решено использовать эту модель и данные наблюдений для определения составляющих собственного поля космического аппарата с разумной степенью точности. Этот метод имеет важное значение не только для исследования крупномасштабных полей и их характеристик, но и для исследования мелкомасштабных флуктуаций поля.

Предварительные результаты

Я начну с обзора некоторых предварительных результатов [1]. Этот обзор покажет, что метод определения собственного поля космического аппарата был не совсем произвольный. При рассмотрении данных мы будем пользоваться либо магнитоме-

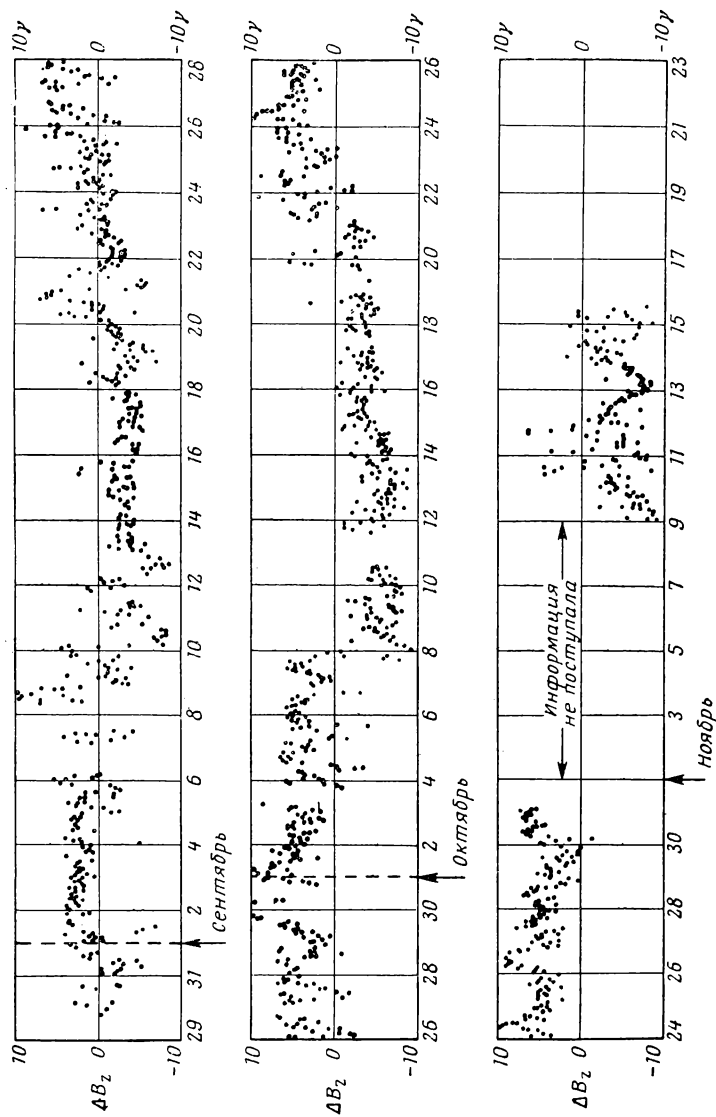


Рис. 1. Изменения радиальной составляющей магнитного поля, наблюдавшиеся на «Маринере-2» (не исправлено за собственное поле космического аппарата).

трической системой координат (X, Y, Z) , либо системой (R, T, N) , приближенно связанной с эклиптикой, где R направлено радиально от Солнца, T направлено по азимуту (положительное в направлении движения планеты), а N — приблизительно к северному полюсу эклиптики (см. рис. 2 гл. 9).

На рис. 1 показана измеренная вариация радиальной составляющей магнитного поля ($\Delta B_R = \Delta B_Z$), не исправленная за поле космического аппарата. Каждая точка соответствует среднечасовому значению, данные охватывают период с конца августа до середины ноября. Отметим две интересные особенности. Во-первых, наблюдается сильный разброс данных, который, как это будет видно из дальнейшего анализа, обусловлен иррегулярностями межпланетного поля, т. е. «шероховатостью» поля или возмущенностью его спиральной структуры. Во-вторых, обнаруживаются периодические вариации, совпадающие с 27-дневным периодом обращения Солнца. Эта особенность наблюдается лишь у двух из трех составляющих магнитного поля.

На рис. 2 приведены данные лишь для оборота Солнца № 1767. Данные за более ранний период были получены, когда космический аппарат вращался. Как показано выше, в этот период можно было определить две составляющие собственного поля космического аппарата, перпендикулярные направлению космический аппарат — Солнце. Усредняя поле за несколько дней, в течение которых космический аппарат вращался, мы получаем компоненты поля с довольно высокой точностью ($\pm 0,25\gamma$).

Структура поля, наблюдавшаяся после 9 октября, интересна тем, что одновременно с изменением радиальной составляющей ΔB_Z перпендикулярная составляющая магнитного поля ΔB_Y стремится изменить свое направление на противоположное. Именно такого поведения поля следует ожидать на основе спиральной модели. Эта связь выявляется несколько лучше, если построить график зависимости одной составляющей от другой (рис. 3). На рис. 3 плоскость эклиптики лежит в плоскости чертежа.

Каждая точка соответствует «сглаженному» среднечасовому среднему за 5 последовательных часов. Несмотря на усреднение, нельзя не удивляться разбросу этих измерений.

Система координат была выбрана таким образом, что пунктирная линия, представляющая предсказанное направление спирального поля, по-видимому, достаточно хорошо соответствует данным наблюдений. Значение компоненты Y собственного магнитного поля аппарата при таком выборе начала отсчета довольно хорошо — в пределах 5γ — согласуется со значением, полученным в период вращения космического аппарата. Таким

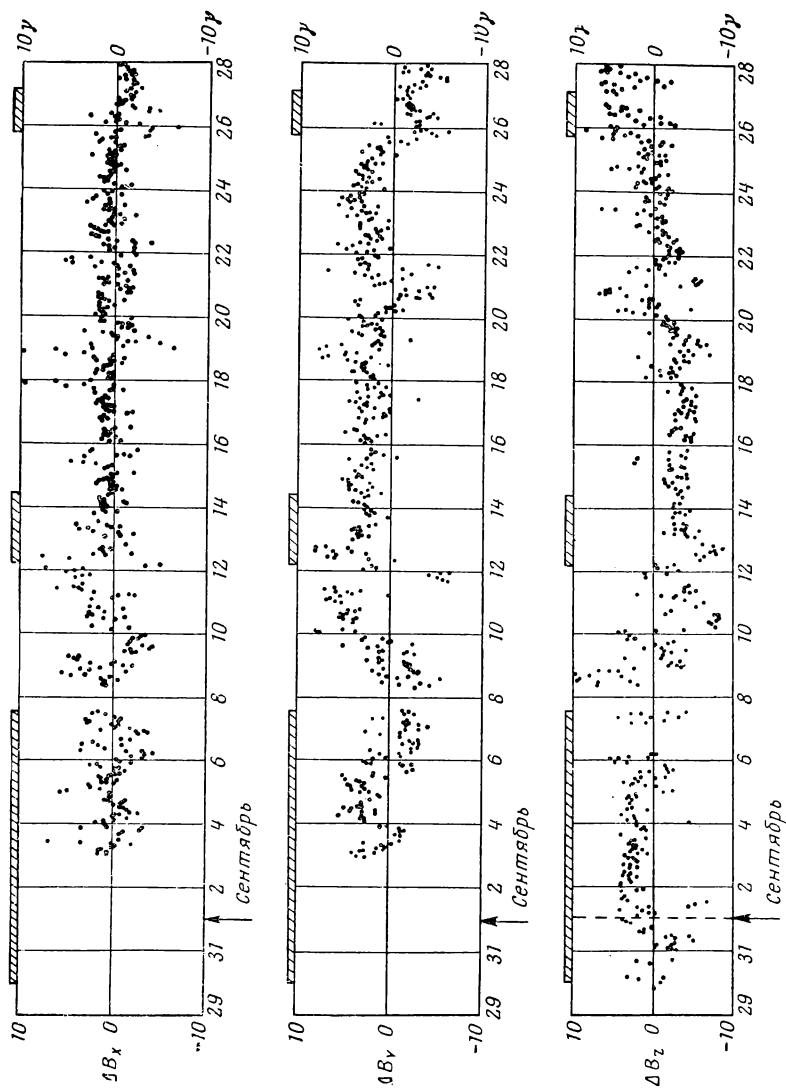


Рис. 2. Изменения трех составляющих магнитного поля (не исправлены) в системе координат, связанной со спутником.

образом, точки на графике представляют концы векторов лишь межпланетного магнитного поля. Где бы ни располагалось истинное начало, этот рисунок показывает движение конца вектора, и можно сказать, что у точек, соответствующих концу вектора, существует тенденция группироваться в первом и третьем

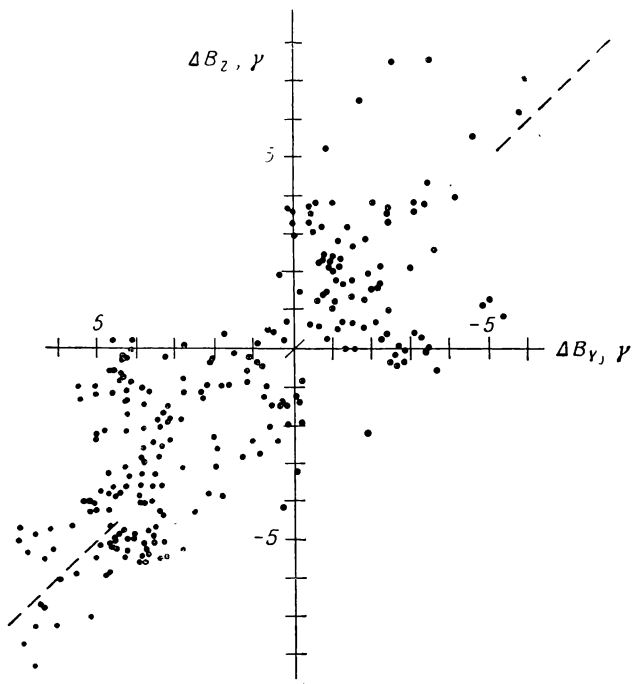


Рис. 3. Корреляция между ΔB_z и ΔB_y (не исправлены). Пунктирная линия показывает ожидаемое среднее направление силовых линий спирального магнитного поля Солнца.

квадрантах. По-видимому, имеется предпочтительное направление межпланетного поля, которое составляет угол $\sim 45^\circ$ с радиальным направлением от Солнца. Таким образом, полученный результат довольно хорошо согласуется с моделью спирального поля.

Поправка на собственное поле космического аппарата и смещение нуля

Теперь опишем вкратце то, что можно назвать вторым приближением к межпланетному магнитному полю. — попытку вывести и вычесть все составляющие собственного поля

космического аппарата за весь период полета. Поскольку предварительные данные указывают на то, что среднее гелиомагнитное поле действительно лежит в плоскости эклиптики и имеет предсказанную форму спирали, то для любого момента полета можно получить составляющие собственного магнитного поля космического аппарата на основе следующих трех предположений. Первое предположение состоит в том, что собственное магнитное поле аппарата вдоль осей X и Y известно в начале периода, за который имеются данные. Эти данные были получены, когда аппарат вращался вокруг своей оси. Второе предположение состоит в том, что эклиптические компоненты, усредненные за несколько дней, располагаются под углом к радиусу-вектору, соответствующему углу спирали Архимеда, который определяется по скорости солнечного ветра, измеренной в эксперименте с плазмой. Третье предположение заключается в том, что составляющая Z собственного поля космического аппарата оставалась постоянной вплоть до момента, когда возникли нарушения в работе откидной панели с солнечными батареями 31 октября. Предварительный анализ данных показал, что последнее предположение справедливо и результаты согласуются с ним. По-видимому, составляющая Z значительно менее чувствительна к изменениям по сравнению с двумя другими составляющими.

Если для каждого дня рассчитать значения составляющих X и Y собственного магнитного поля аппарата, которые должны существовать при условии, что усредненное межпланетное поле в этот день удовлетворяло идеальной модели спирального поля, то мы получим довольно неправильную структуру, накладывающуюся на медленный дрейф. Эта неправильная структура, по-видимому, связана с отклонением межпланетного поля от спирального. Однако медленные вариации, полученные усреднением за несколько дней, вероятно, можно объяснить изменением поля самого космического аппарата.

На рис. 4 представлены результаты подобных вычислений для первых 60 дней полета. Сплошные линии представляют необходимые поправки, т. е. предполагаемое собственное поле космического аппарата. Видно, что поле космического аппарата испытывает не только постепенные изменения, но иногда наблюдаются довольно резкие скачки. Важно заметить, что эти изменения не имеют ничего общего с упоминавшейся выше корреляцией между поведением составляющих Y и Z (или составляющих поля T и R). На основе наиболее достоверных, хотя и не окончательных данных можно предположить, что эти изменения были вызваны токами, текущими в космическом аппарате: либо токами системы питания, замкнутыми на обшивку самого аппарата, либо термоэлектрическими токами.

Пунктирные кривые C_T и C_N дают поправки к солнечно-эклиптическим координатам. С 280-го по 300-й день космический аппарат повернулся примерно на 90° при обгоне Земли по гелиографической долготе. Этот поворот помог определению его поля.

Как видно на рис. 4, основная особенность состоит в том, что в течение первых 6 недель собственное поле космического аппарата было очень устойчивым. Изменения поля вдоль обеих осей,

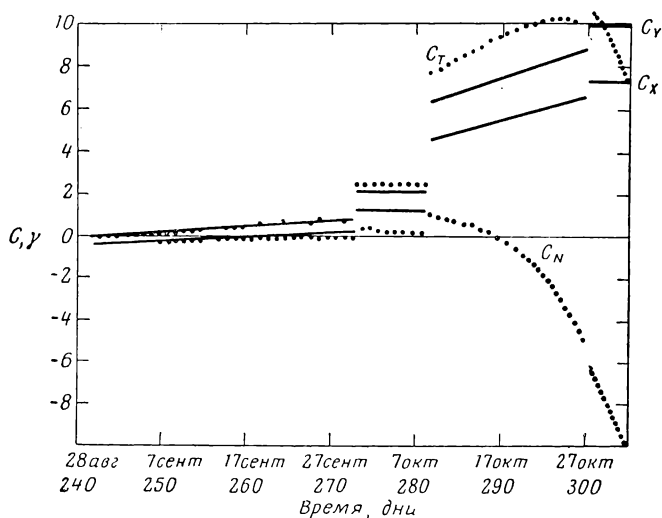


Рис. 4. Вычисленные поправки на собственное магнитное поле «Маринера-2».

по-видимому, не превышали 1γ . Затем наблюдались как внезапные скачки, так и периоды плавного изменения. Максимальная поправка составляла $\sim 10 \gamma$.

Трудно сказать, насколько точны эти поправки. Если учесть точность измерений и точность, связанную с преобразованием данных в цифровые значения, и если сделать поправку на нерегулярность межпланетного поля и т. д., то есть основание полагать, что собственное поле космического аппарата можно определить с точностью до 1γ , — возможно, что это слишком оптимистическое заявление.

Исправленные данные

На последующих рисунках приведены исправленные данные «Маринера-2» за период продолжительностью ~ 60 дней. Этот период предшествовал моменту, когда на космическом аппарате

произошла авария: 31 октября одна из откидных панелей с солнечными элементами закоротилась. В это время прекратилась подача энергии от панелей с солнечными элементами, и имело место очень сильное, но точно не известное изменение собственного поля космического аппарата. Напряженность поля была

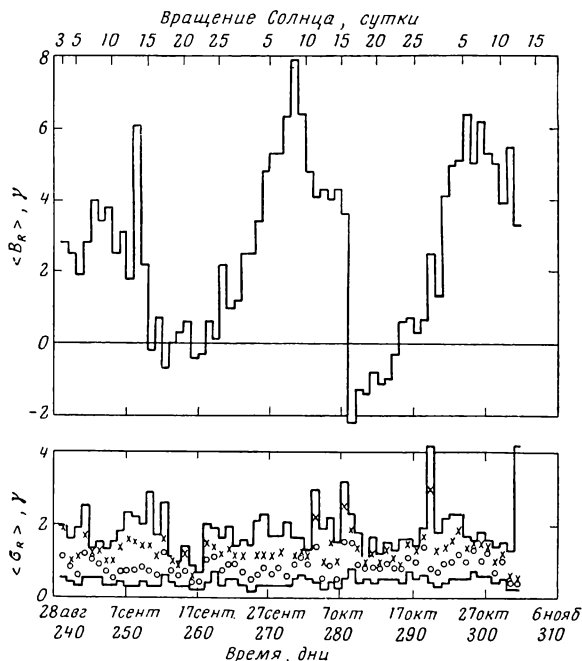


Рис. 5. Исправленное межпланетное магнитное поле, радиальная составляющая, среднесуточные значения.

Внизу — среднеквадратичные отклонения для интервалов различной продолжительности: 3,7 мин (нижняя кривая), 30 мин (кружки), 3 час (крестики), сутки (верхняя кривая).

настолько велика, что магнитометр переключился на грубую шкалу и давал менее интересную информацию. Когда панель с солнечными батареями возобновила подачу энергии, поле аппарата восстановилось до нормального значения, а магнитометр стал работать в прежнем диапазоне. Неделию спустя произошло второе повреждение.

В верхней части рис. 5 дана радиальная составляющая межпланетного магнитного поля; каждый горизонтальный отрезок представляет его среднесуточное значение. Примечательной осо-

бенностью графика является то, что радиальная составляющая обнаруживает очень четкую периодическую вариацию, связанную с вращением Солнца. (Шкала вращения Солнца в днях приведена вверху.)

Невольно напрашивается вывод о следующей конфигурации солнечного магнитного поля: на одной стороне магнитные силовые линии выходят из Солнца, тогда как на другой стороне общий поток поля, направленного от Солнца, по существу равен нулю. Однако поскольку приведенные на рис. 5 величины известны с точностью $\sim 1\gamma$, то подобные заключения следует делать с большой осторожностью.

Уилкокс. Уровень, от которого велся отсчет, одинаков на обоих рисунках?

Смит. Да.

Уилкокс. Базисная линия на последнем рисунке более точная?

Смит. Да, она более точная. Этот чертеж получен в результате тщательного анализа данных. На предыдущем рисунке нулевая линия была проведена более или менее произвольно по середине чертежа таким образом, что на одной стороне Солнца поле, как нам кажется, направлено от Солнца, а на другой стороне — к Солнцу.

На нижней части рис. 5 приводятся среднеквадратичные отклонения поля. Различные обозначения представляют среднеквадратичное отклонение для различных по продолжительности периодов. Самая нижняя кривая соответствует периоду 3,7 мин, в течение которого делается шесть измерений поля. Кружочки относятся к получасовому интервалу. Разница между кружочками и нижней кривой дает нам представление о флуктуациях: поля с периодом от 3,7 до 30 мин. Крестики соответствуют 3-часовому периоду, тогда как верхняя кривая соответствует целым суткам. Данные показывают, что наблюдался относительно широкий спектр частот.

Сравнение амплитуды флуктуаций с амплитудой поля дает количественную характеристику дисперсии, показанную на рис. 3. Типичное значение поля составляло $\sim 4\gamma$. Среднеквадратичное отклонение флуктуаций поля за сутки составляло 2γ или немного больше.

Несс. Как уровень шумов связан с преобразованием данных в цифровые значения?

Смит. Он соответствует среднеквадратичному отклонению $\sim 1/4\gamma$. Кроме того, в приборе был некоторый уровень электрических шумов, примерно аналогичный шумам, связанным с преобразованием данных в цифровые значения. Шаг между целыми числами двоичного кода равнялся $\sim 1/3\gamma$ [преобразование данных в цифровые значения не должно сильно увеличивать среднее

значение среднеквадратичного отклонения; скорее оно приведет к его уменьшению]¹⁾.

Несс. Согласуется ли нижняя кривая с уровнем шумов при цифровом преобразовании данных?

Смит. Очень близко. Некоторые значения равны $1/2\gamma$. Вероятно, некоторые малые значения имели место, когда флуктуации межпланетного поля нельзя было отличить от шумов прибора. В некоторые периоды (хотя и немногочисленные), длившиеся по нескольку часов, не наблюдалось изменений поля (в любой составляющей), превышающих шаг при цифровой кодировке. Таким образом, иногда поле было чрезвычайно спокойно. Такие периоды использовались для оценки шумов прибора. Полученные при этом значения хорошо согласуются со значениями, определенными на Земле.

На рис. 6 приведена тангенциальная составляющая межпланетного магнитного поля, которая положительна в направлении движения планеты. Наблюдается 27-дневная вариация. Этот рисунок существенно отличается от рис. 2, на котором приведены значения ΔB_T , не только из-за перехода в другую систему координат, но и вследствие того, что из наблюдаемых данных было вычтено значительное собственное магнитное поле космического аппарата. Рассмотрение этого и предыдущего рисунков показывает, что на Солнце существовал отдельный очень сильный источник, который превосходил другие возмущенные области.

В нижней части рисунка представлены среднеквадратичные отклонения в прежних обозначениях, причем они значительно больше, чем на рис. 5. Для рис. 5 типичным значением было 2γ ; среднеквадратичное отклонение лишь дважды превышало 4γ и то при суточном усреднении. Из рис. 6 следует, что тангенциальная составляющая была более возмущенной, чем радиальная.

Аналогичная особенность наблюдается также на рис. 7, на котором представлена нормальная составляющая B_N , перпендикулярная плоскости эклиптики. Среднеквадратичное отклонение было примерно в 2 раза больше среднеквадратичного отклонения радиальной составляющей. На этом рисунке видны еще две важные особенности. Во-первых, эта составляющая не подвержена сильному воздействию вращения Солнца. Из этого факта вытекает, что вычисленные значения собственного поля космического аппарата были довольно точными. По крайней мере, следовало ожидать, что после учета собственного поля космического аппарата не должно наблюдаться эффектов, связанных с вращением Солнца.

¹⁾ Здесь и далее текст, добавленный в рукописи, заключен в квадратные скобки.

Во-вторых, хотя за весь рассматриваемый период 60 дней средняя величина B_N равнялась примерно нулю, наблюдался период, длившийся немного больше месяца, когда вполне определенно наблюдалась составляющая вне плоскости эклиптики.

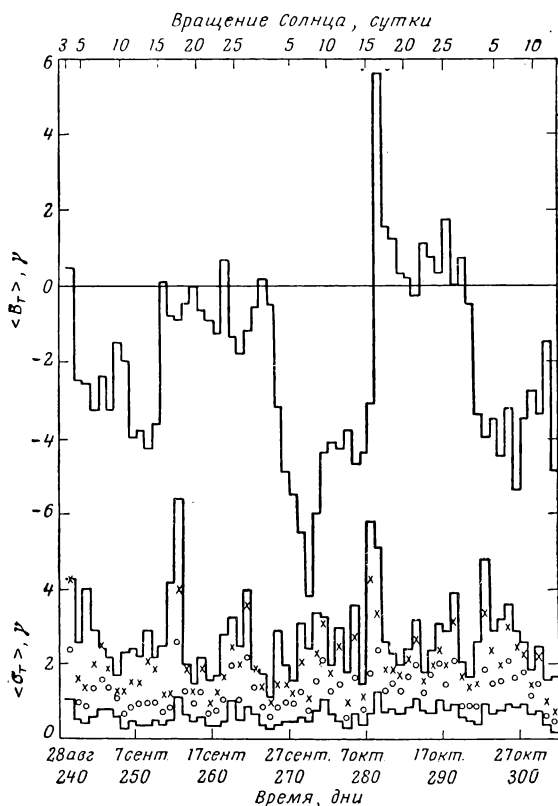


Рис. 6. Исправленное межпланетное магнитное поле, тангенциальная составляющая, среднесуточные значения. (Обозначения те же, что на рис. 5.)

Ее величина достигала 1 γ . Эта составляющая была отрицательной, т. е. была направлена от северного полюса эклиптики. Предполагается, что нулевой уровень за этот период времени, который начался сразу же после того, как аппарат перестал вращаться, был определен очень точно. Позднее эта составляющая поля, направленная к южному полюсу эклиптики, постепенно исчезла.

Уилкокс. При коррекции вы приравнивали нулю среднее значение B_N ?

Дэвис. Да, поправки могли бы легко объяснить стремление B_N к нулю во второй половине диаграммы.

Колбон. Как связан ваш анализ данных в период вращения космического аппарата с предположением, что спиральное магнитное поле в это время лежало в основном в плоскости эклиптики?

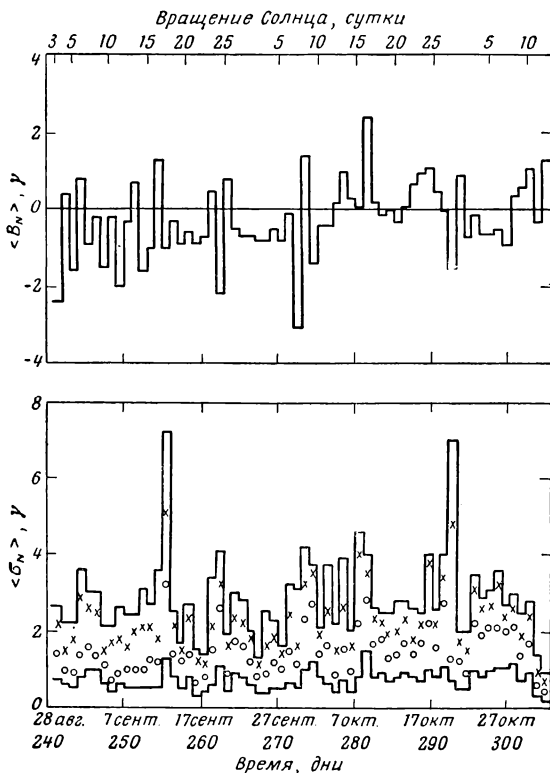


Рис. 7. Исправленное межпланетное магнитное поле, нормальная составляющая, среднесуточные значения. (Обозначения те же, что на рис. 5.)

Дэвис. Необходимо лишь допустить, что в течение 4 суток не существовало вариаций межпланетного магнитного поля, коррелирующих с вращением космического аппарата.

Смит. Оказалось, что в течение этих 4 суток средние значения собственного поля космического аппарата за каждые полдня совпадали в пределах $1/4\gamma$. Поле аппарата не изменялось в это время.

Голд. Какой был угол между космическим аппаратом и плоскостью солнечного экватора в этот период?

Снайдер. Гелиографическая широта аппарата была сравнительно постоянной в течение первой половины полета, когда данные магнитометра были наиболее надежными. Сначала гелиографическая широта равнялась

7°,1 с. ш. Во второй половине сентября она достигла максимума 7°,8, а затем гелиографическая широта начала уменьшаться со все увеличивающейся скоростью. 1 ноября (305-й день) она равнялась 6°, а 7 декабря (341-й день) 0°,0.

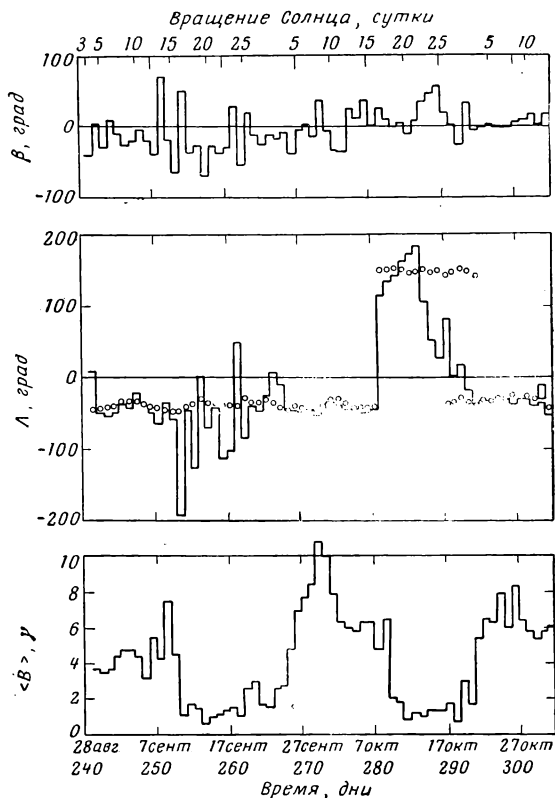


Рис. 8. Исправленное межпланетное магнитное поле в полярной системе координат, среднесуточные значения.

Λ — азимутальный угол, отсчитываемый от радиуса-вектора (кружки — теоретические значения); β — полярный угол, отсчитываемый от плоскости эклиптики; $\langle B \rangle$ — полная напряженность магнитного поля.

Смит. То, что можно было ожидать для неэкваториальных широт, качественно не согласуется с данными. Если направление нормальной и радиальной составляющих поля определяется общим солнечным полем, то положительная нормальная составляющая поля должна соответствовать положительной радиальной составляющей. Однако нормальная составляющая была отрицательной, а не положительной.

На рис. 8 показано межпланетное магнитное поле в полярной системе координат. Помимо напряженности поля B , на рисунке

показаны углы β и Λ , определяемые так:

$$\langle B_N \rangle = \langle B \rangle \sin \beta,$$

$$\langle B_R \rangle = \langle B \rangle \cos \beta \cos \Lambda,$$

$$\langle B_T \rangle = \langle B \rangle \cos \beta \sin \Lambda.$$

Таким образом, Λ — это азимут проекции поля $\langle B \rangle$ на плоскость эклиптики, β — эклиптический полярный угол вектора поля.

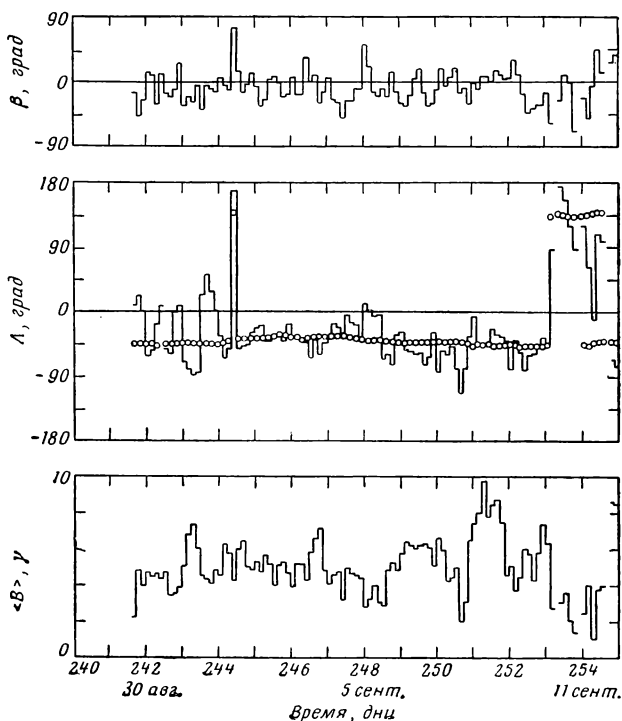


Рис. 9. Исправленное межпланетное магнитное поле в полярной системе координат, 3-часовые средние значения. (Обозначения те же, что и на рис. 8.)

Азимутальный угол Λ сравним с теоретическим углом спирали, определяющим ее форму:

$$\Lambda_{\text{поток}} = -\arctg\left(\frac{r\Omega_s}{v}\right).$$

Теоретические значения этого угла показаны на рис. 8 кружками. Вы, должно быть, помните, что хорошее согласие — это одно из предположений, используемых для исключения соб-

ственного поля космического аппарата. Однако видно, что существовали периоды даже после сглаживания, в течение которых угол Λ сильно отличался от теоретического угла спирали.

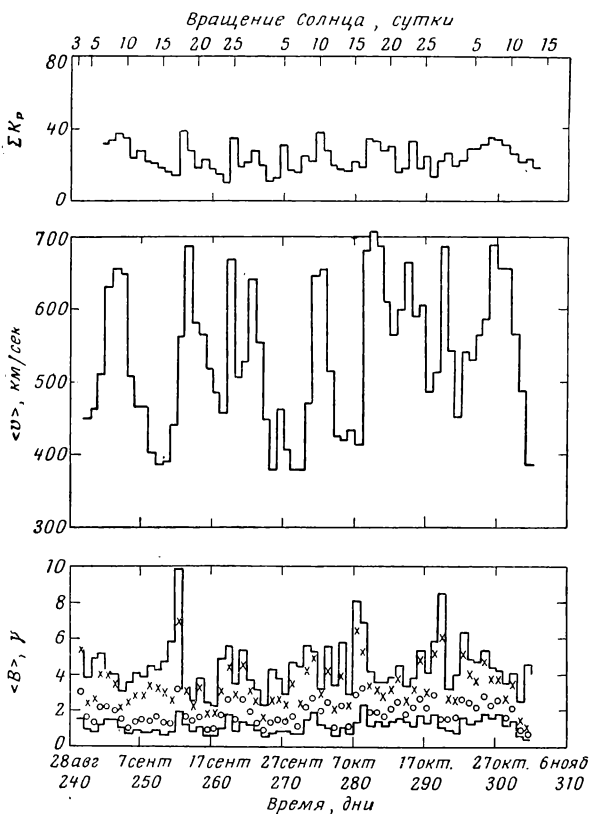


Рис. 10. Солнечный ветер и флуктуации магнитного поля. Верхняя кривая — индекс ΣK_p геомагнитной активности; в центре — среднесуточные значения скорости $\langle v \rangle$ солнечного ветра; внизу — среднеквадратичные отклонения полной напряженности межпланетного магнитного поля $\langle \sigma_B \rangle$ для интервалов времени различной продолжительности.

Нижняя часть рис. 8 дает относительно ясное представление о характере изменения поля за этот период. Среднее значение поля $\sim 4 \gamma$ кажется вполне приемлемым, но за рассматриваемый период вариации составляли от ~ 1 до $\sim 10 \gamma$. За весь период поле ни разу не было равно нулю, хотя временной интервал усреднения был слишком велик.

На рис. 9 представлены 3-часовые средние значения за период примерно 2 недели. В данном случае среднее значение напряженности магнитного поля составляло $\sim 5\gamma$. Нет указаний на то, чтобы в течение 3 час поле равнялось нулю. Итак, сравнив данные наблюдений с вычисленными значениями угла спирали, можно увидеть, что поле «шероховато». Кроме того, в отдельные периоды, длившиеся несколько часов, полный вектор поля находился вне плоскости эклиптики.

На рис. 10 показаны флуктуации полной напряженности поля, скорость солнечного ветра и индекс K_p геомагнитной активности (см. гл. 1, 2). Приведенное здесь среднеквадратичное отклонение дается для векторного поля (корень квадратный из суммы квадратов средних квадратичных отклонений трех составляющих поля); обозначения те же, что и на рис. 5—7. Как видно, вариации полной величины напряженности магнитного поля обладали довольно широким частотным спектром. Хотя имеются довольно четко выраженные пики как в суточных, так и в 3-часовых среднеквадратичных отклонениях, тем не менее нет прямой связи между этими пиками и скоростью солнечного ветра. Пики флуктуаций межпланетного магнитного поля, по-видимому, лучше коррелируют с периодами быстрого увеличения скорости солнечного ветра. Это довольно последовательный результат и по крайней мере кажется физически возможным, поскольку в такие периоды следует ожидать, что быстро движущаяся плазма обгоняет более медленную. Неясно, существует ли корреляция между индексом K_p и скоростью солнечной плазмы¹⁾.

ЛИТЕРАТУРА

1. Coleman P. J., Davis L., Smith E. J., Sonett C. P., Science, **138**, 1099 (1962); **139**, 909 (1963).
- 2*. Wilcox J. M., Schatten K. H., Ness N. F., J. Geophys. Res., **72**, № 1, 19 (1967).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА СМИТА

Несс. Я думаю, что сделанные допущения несколько ограничивают ваши результаты. Особенно слабым я считаю предположение, что теоретический угол спирального магнитного поля определяется или выводится по скорости солнечного ветра. Мне кажется, все, что вы получаете из ваших полярных диаграмм, по существу то же самое, что вы предположили в самом начале.

¹⁾ Измерения на спутнике «ИМП-1» в межпланетном пространстве не только подтвердили наличие связи между индексом K_p и скоростью солнечной плазмы, но позволили установить прямую связь между индексом K_p и величиной напряженности межпланетного магнитного поля [2*]. — *Прим. перев.*

В частности, данные точно соответствуют углу спирали, но это было вашим исходным предположением.

Другое неудачное предположение — постоянство радиальной составляющей собственного магнитного поля космического аппарата. Наконец, вы совершенно опустили вопрос о смещении нуля прибора. Я полагаю, что общие выводы из ваших данных менее существенны из-за физики, которую вы вложили при попытке решить вопрос о собственном магнитном поле космического аппарата.

Дэвис. Согласен, что совпадение с моделью спирального поля является в большей части результатом исходных предположений. Несомненно, было бы лучше, если бы мы не делали никаких предположений. Тем не менее справедливо, что измерения на «Мариннере-2» осенью 1962 г. свидетельствуют в пользу существования в межпланетном пространстве спирального поля.

Но есть одно «но», на которое не обратил внимания доктор Смит: в наших предположениях мы не использовали три степени свободы. По существу использовалась лишь одна степень свободы, поскольку предполагалось, что любое изменение собственного магнитного поля космического аппарата будет проявляться лишь вдоль осей Y и X в отношении 9:7. Для объяснения причин, заставивших нас принять такое предположение, потребуется десять минут, и я не совсем уверен в его правильности. Однако в нескольких случаях наблюдались изменения именно в такой пропорции, а предположение было сделано для того, чтобы не быть слишком голословными. Это означает, что если вы хотите допустить некоторый произвол в отношении тангенциальной составляющей, то можете это сделать совершенно свободно. В таком случае вы столкнетесь с изменением нормальной составляющей. Если вы допускаете произвол в нормальной составляющей, то изменится тангенциальная составляющая. Таким образом, мы смогли найти собственное поле космического аппарата, для которого обе составляющие достаточно хорошо согласовались со спиральной моделью.

Другое ваше замечание касалось того, что мы не в состоянии сказать, связаны ли эти трудности с прибором или с собственным магнитным полем космического аппарата. Я с этим также согласен. Однако в действительности несущественно, смещается ли нуль прибора или нуль магнитного поля самого аппарата: в обоих случаях искажаются данные о межпланетном магнитном поле. Мы пытались устранить эту помеху независимо от ее источника. Как член магнитометрической группы, не желающий, чтобы все недостатки сваливали на магнитометр, я думаю (хотя разницы по существу нет), что помехи вызваны собственным магнитным полем космического аппарата, а не магнитометром.

Не знаю, послужит ли это уроком экспериментаторам, у которых установлены магнитометры на космических аппаратах, но ясно, что неполадки в откидных панелях, несущих солнечные элементы, частично создавали помехи. Когда с панелями возникали неполадки, то мы наблюдали огромные смещения поля. Когда же работа их налаживалась, поле восстанавливалось. Я надеюсь, что больше никому панели не доставят столько неприятностей.

Зирин. Интересно, нет ли связи между преобладающим положительным знаком радиальной составляющей магнитного поля и тем, что в этот период (фактически в течение последних двух лет) активные области были сосредоточены в основном в северной полусфере Солнца.

Дэвис. Я думаю, что такая связь есть. Это возвращает нас к модели, согласно которой газ поднимается от поверхности Солнца, проникает в солнечную корону и в конце концов образуется солнечный ветер, дующий в космическое пространство. Я должен предположить, что газ с поверхности Солнца не может всюду подниматься одинаково из-за существования магнитных полей в некоторых областях. Если вы хотите сказать мне, что солнечный ветер приходит в основном с северной полусферы, то я буду очень рад.

Уилкокс. Что касается правильности полярности, то можно сказать, что пики имели место на десятом дне солнечного оборота и, по-видимому, были связаны с рекуррентной активной областью, которая, как было показано, существовала в течение многих оборотов. К тому же на Солнце в северном полушарии, как вы упоминали, наблюдалась большая униполярная область, прохождение которой через центральный меридиан совпадало с этими пиками. Но здесь есть некоторое разногласие относительно знака, так как униполярная область в северном полушарии образовалась из восточной части биполярной области, которая является отрицательной, тогда как вами были зарегистрированы положительные поля. Поле было бы положительным лишь в том случае, если бы плазма выбрасывалась этой униполярной областью, а магнитное поле, увлекаемое солнечным ветром, приходило из какой-либо другой области.

Дэвис. Я разговаривал с Говардом, располагающим магнитограммами Солнца, которые могут оказаться очень полезными при обсуждении этого вопроса. Однако данные было не так легко интерпретировать, поскольку в то время, когда изучались магнитограммы, он находился в Крыму и мы были лишены возможности получить подробную квалифицированную консультацию.

Четко выраженная отрицательная униполярная область была расположена так, что позволяла объяснить явления, которые мы наблюдали, хотя она отстояла от необходимого места на полнедели.

Говард говорит, что непосредственно перед этим периодом (в начале года) на Солнце наблюдалась большая положительная униполярная область. К сожалению, он не помнит ее точное положение. К сентябрю эта большая положительная область исчезла. Исчезая, область расширялась и становилась слабее. Хотя поток поля нелегко было обнаружить, совсем не обязательно считать, что он полностью исчез. Поэтому вполне возможно, что эта область являлась источником наблюдавшегося нами положительного потока.

Голд. Я не совсем понимаю, почему должна быть корреляция между космическим пространством и знаком униполярной области или знаком любого пятна. Ведь если истечение потока плазмы имеет место с довольно небольшой области на Солнце, заполняя значительную область космического пространства (а я думаю, что во многих случаях так оно и есть), то, безусловно, плазма будет деформировать магнитные силовые линии, уносимые с Солнца, что приведет к возникновению радиальных компонент обоих знаков. Это как раз тот случай, который определяет, какая из этих составляющих наблюдается в заданный отрезок времени. Я не думаю, что униполярная область может заполнить все космическое пространство: быстрая плазма, вытекающая из какой-либо области, должна уносить магнитные силовые линии с любой стороны области; таким образом, магнитные силовые линии будут выходить из области и обратно возвращаться в нее.

Поэтому мне кажется, что неправильный знак не противоречит данным наблюдений. Если бы вы находились в плоскости эклиптики или немного выше или ниже ее или в другом месте, то вы бы увидели другой знак поля.

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫМИ
ЧАСТИЦАМИ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ
И СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМОЙ¹⁾

Х. Р. Андерсон

Введение

На «Маринере-2» были установлены ионизационная камера и два счетчика Гейгера — Мюллера. При помощи этих приборов производились измерения полной ионизации в аргоне и среднего потока всей радиации, приходящей со всех направлений и способной проникнуть через экран толщиной 0,2 г. Такая экранировка соответствует порогу обрезания 10 Мэв для протонов или 0,5 Мэв для электронов. Более подробное описание экспериментов, выполненных при помощи этих приборов, дано в работах [1, 2]. Измерения энергичных частиц были выполнены на «Маринере-2» Ван Алленом и Фрэнком [3, 4]. Они использовали тонкостенный счетчик Гейгера — Мюллера, чувствительный к электронам с энергией выше 40 кэв и к протонам с энергией выше 0,5 Мэв.

Хорошо известно, что плотность кинетической энергии галактического космического излучения порядка 1 эв/см^3 — величина очень малая по сравнению с плотностью кинетической энергии солнечного ветра. Она мала и по сравнению с плотностью энергии межпланетного магнитного поля (за исключением лишь некоторых периодов, когда в межпланетном пространстве наблюдается увеличение радиации в результате выброса частиц Солнцем). Хотя столь сильные различия плотности разных видов энергии существуют не всегда, тем не менее они преобладали в период измерений на «Маринере-2». Поэтому предположение, что движение энергичных частиц всецело определялось существующим магнитным полем и что присутствие энергичных частиц не очень сильно влияет на магнитное поле, довольно обоснованно.

Действие магнитного поля на излучение, измеряемое на «Маринере-2», можно разделить на две категории: 1) оно

¹⁾ См. также гл. 12 и примечания к ней. — *Прим. перев.*

модулирует галактическое космическое излучение (эта модуляция, как нам кажется, сводится к тому, что магнитное поле «регулирует» количество радиации, достигающей данного места в солнечной системе); 2) определяет характер распространения и накопление заряженных частиц, инжектируемых Солнцем в межпланетную среду.

Модуляция галактического космического излучения

За 120 дней своего полета космический аппарат приблизился к Солнцу с 1 а.е. до 0,72 а.е., удалившись при этом от Земли на максимальное расстояние 81 000 000 км. Сравнивая излучение, измеренное на космическом аппарате, с излучением, измеренным одновременно в околоземном космическом пространстве, можно определить так называемый градиент интенсивности космических лучей в солнечной системе¹⁾ — любое систематическое изменение интенсивности излучения по мере приближения космического аппарата к Солнцу. Кроме того, можно наблюдать корреляцию короткопериодических вариаций уровня излучения (за периоды в несколько дней) и посмотреть, зависит ли степень корреляции от взаимного удаления двух точек наблюдения.

В идеальном случае измерения около Земли должны выполняться со станции, расположенной за пределами магнитосферы, с использованием аппаратуры такой же чувствительности, как и приборы, установленные на «Маринере-2». Но поскольку в то время это было невозможно, мы воспользовались двумя типами измерений, производимых с Земли: 1) измерениями скорости счета нейтронного монитора в Дип-Ривере с учетом барометрического эффекта; поскольку скорость счета велика, эти данные обладают высокой статистической точностью и 2) измерениями скорости ионизации, выполненными Неером в Туле при толщине атмосферы 10 г/см^2 и на магнитной широте 90° . Эти баллонные измерения производились лишь раз в год. Я хочу упомянуть здесь о двух сериях измерений, выполненных в июле и августе 1962 и 1963 гг.

Идея сводится к нахождению корреляции между вариациями скорости счета нейтронной компоненты и вариациями скорости ионизации в межпланетном пространстве. Это осуществлялось сравнением скорости счета нейтронной компоненты со скоростью

¹⁾ В работе В. Л. Гинзбурга и др. [7*], где рассмотрены задачи и перспективы исследования первичных космических лучей, указывается на то, что как на «Маринере-2», так и на межпланетной станции «Марс-1» [8*], летевшей к Марсу, не получены вполне достоверные сведения о градиенте полной интенсивности. — *Прим. ред.*

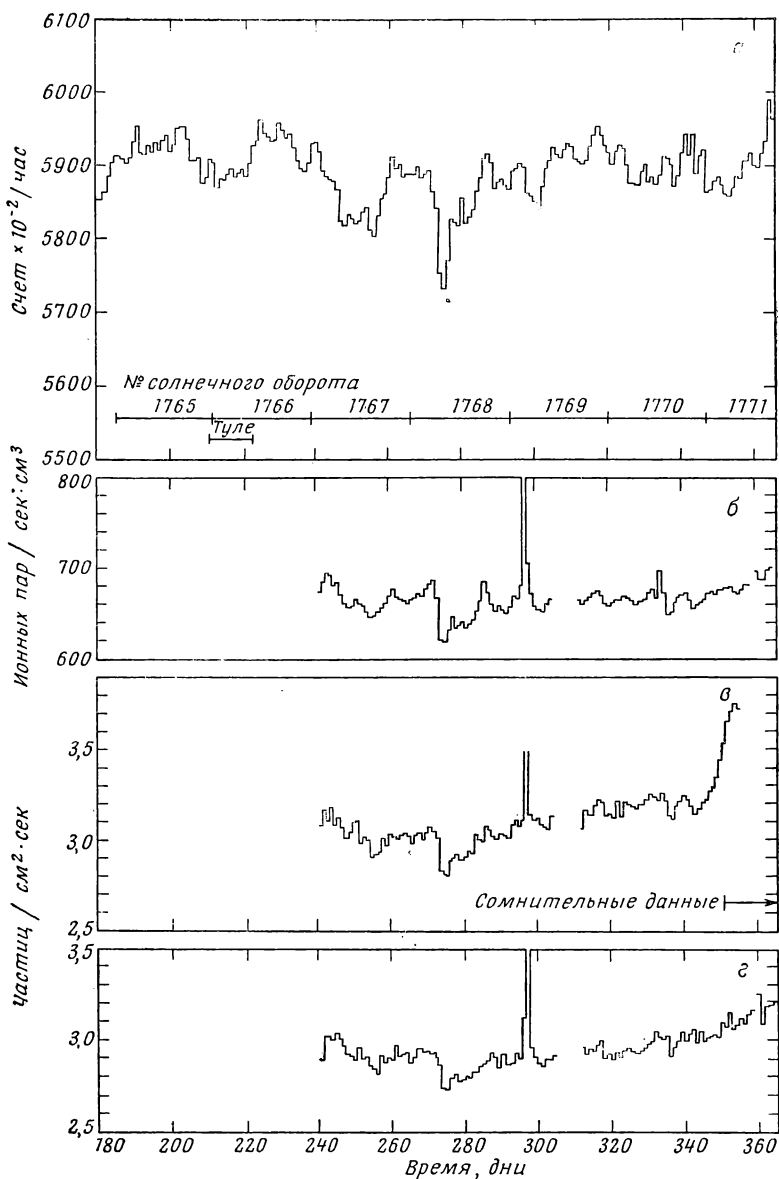


Рис. 1. Вариации космических лучей в период полета «Маринера-2» (средне-суточные значения).

а — показания нейтронного монитора; б — данные ионизационной камеры, установленной на «Маринере-2»; в и г — данные счетчиков Гейгера — Мюллера «Маринера-2».

ионизации, измеренной на «Маринере-2» в самом начале полета, когда он находился близко к Земле, а затем сравнением скорости счета нейтронной компоненты с измерениями, выполненными в Туле. В таком случае можно использовать последующие данные, полученные в Дип-Ривере, для вычисления скорости ионизации, ожидаемой в околоземном космическом пространстве, для сравнения с данными «Маринера-2», полученными в конце

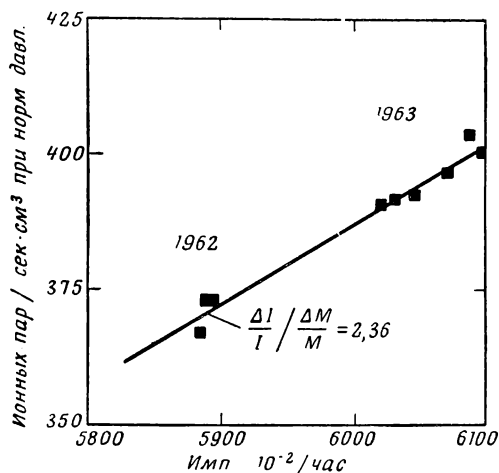


Рис. 2. Сравнение данных одновременной регистрации ионизационной камеры, поднятой на баллонах над Туле, и нейтронного монитора в Дип-Ривере.

По оси ординат — скорость ионизации над Туле на атмосферной глубине 10 г/см^2 , по оси абсцисс — показания нейтронного монитора. Квадратиками обозначена скорость в 1 час, усредненная за сутки.

его полезной жизни, когда космический аппарат находился далеко от Земли. (Я подчеркиваю: скорость ионизации за счет потока со всех направлений, поскольку ионизационная камера на «Маринере-2» была более устойчивой и точной по сравнению со счетчиками Гейгера — Мюллера.)

На рис. 1, а приведены часовые значения скорости счета нейтронного монитора в Дип-Ривере, усредненные за каждые сутки. Вдоль оси абсцисс отложены номера солнечных оборотов и отмечены интервалы, в течение которых производились измерения в Туле. Время отсчитывается от 1 января 1962 г. Эта дата принята за 1-й день. Кроме того, на рис. 1, б приведены среднесуточные значения скорости ионизации, измеренной на «Маринере-2» и приведенной к стандартной атмосфере. На рис. 1, в и г

даны графики скоростей счета двух счетчиков Гейгера — Мюллера, деленные на их фактор направленности.

За исключением возрастания скорости счета в 296-й день и после 350-го дня, средняя скорость ионизации довольно посто-

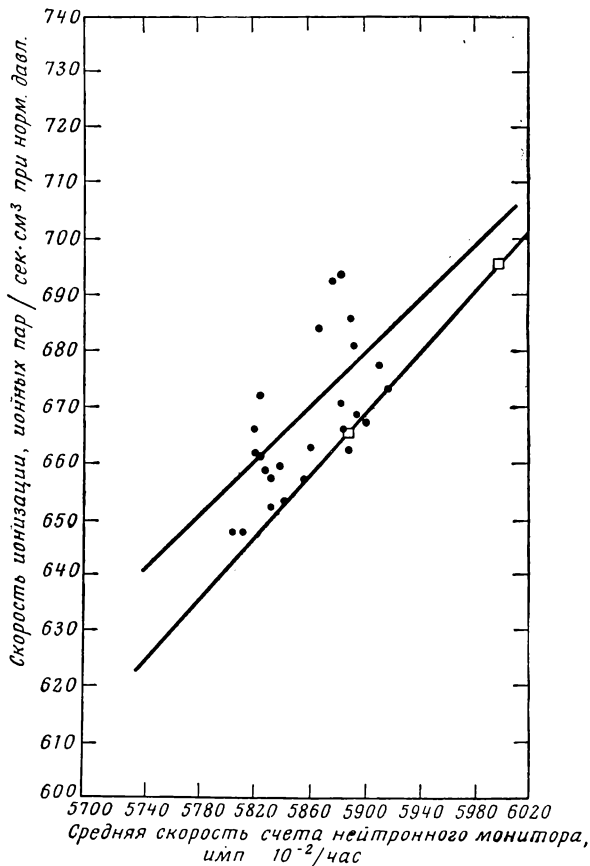


Рис. 3. Сопоставление среднесуточных значений скорости ионизации, наблюдавшейся на «Маринере-2», со скоростью счета нейтронного монитора в Дип-Ривере для солнечного оборота № 1767 (с 239-го по 265-й день); расстояние от Земли изменялось от 0 до $6,9 \cdot 10^6$ км. Верхняя линия построена методом наименьших квадратов, нижняя — по данным Туле. Квадратиками отмечены нормированные точки.

янна. Поток возрастал постепенно. Создается такое впечатление, что возрастание потока, измеренное счетчиком, экранированным бериллием, после 350-го дня является инструментальным

эффектом из-за увеличения температуры по мере приближения к Солнцу. Большое возрастание 23 октября (296-й день) будет рассмотрено в следующем разделе.

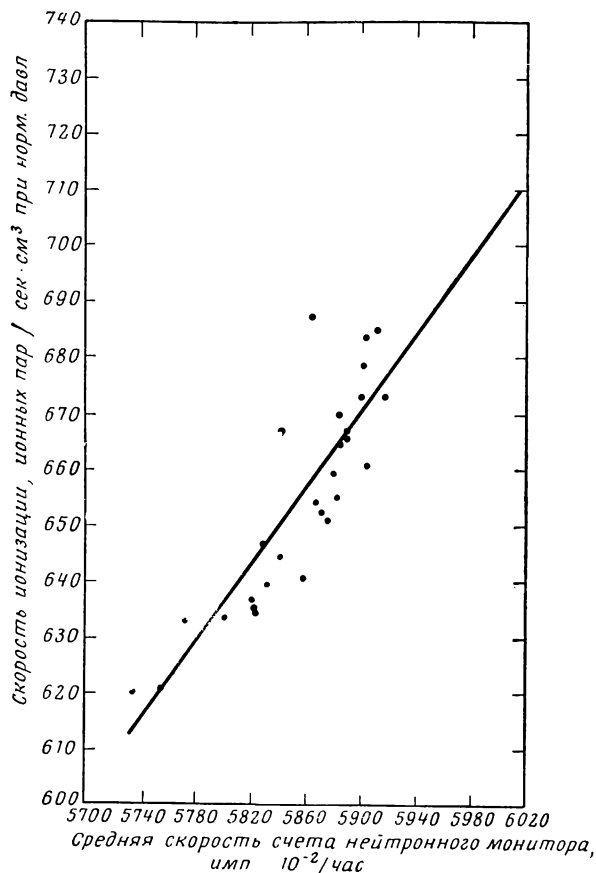


Рис. 4. Сопоставление среднесуточных значений скорости ионизации, наблюдавшейся на «Маринере-2», со скоростью счета нейтронного монитора в Дип-Ривере для солнечного оборота № 1768 с 266-го по 292-й день; расстояние от Земли изменялось в пределах $(6,9-14,4) \cdot 10^6$ км.

Беглый просмотр данных о скорости ионизации, полученной на «Маринере-2», указывает на то, что эта величина достаточно хорошо коррелирует со скоростью счета нейтронной компоненты. Рассмотрим взаимосвязь между скоростью счета нейтронной компоненты и измерениями, выполненными в Туле (рис. 2). Данные измерений в Туле заимствованы из работы Неера и

Андерсона [2]. Отношение вариаций двух скоростей счета составляет 2,36 для этого периода измерений, что несколько меньше величины, полученной Неруркаром и Веббером [5]. Как мне

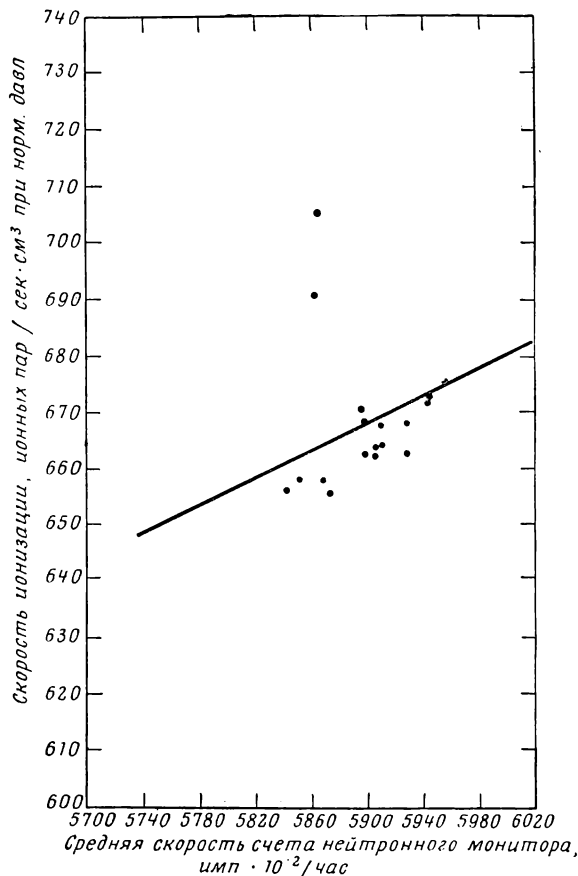


Рис. 5. Сопоставление среднесуточных значений скорости ионизации, полученных на «Маринере-2», со скоростью счета нейтронного монитора в Дип-Ривере для оборота Солнца № 1769 с 293-го по 319-й день; расстояние от Земли изменялось в пределах $(14,4—28,3) \cdot 10^6$ км.

кажется, эта разница обусловлена тем, что мы имеем дело с данными для различных периодов цикла солнечной активности.

На рис. 3 представлена зависимость ионизации, измеренной на «Маринере-2», от скорости счета нейтронной компоненты. Кроме того, показан наклон кривой предыдущего рисунка, приведенной к точке, обозначенной светлым квадратиком. Линия

регрессии, построенная по методу наименьших квадратов, имеет такой же наклон, что и линия, построенная по данным измерений в Туле. Действительно, тангенс угла наклона линии, построенной по методу наименьших квадратов, немного больше 2, а

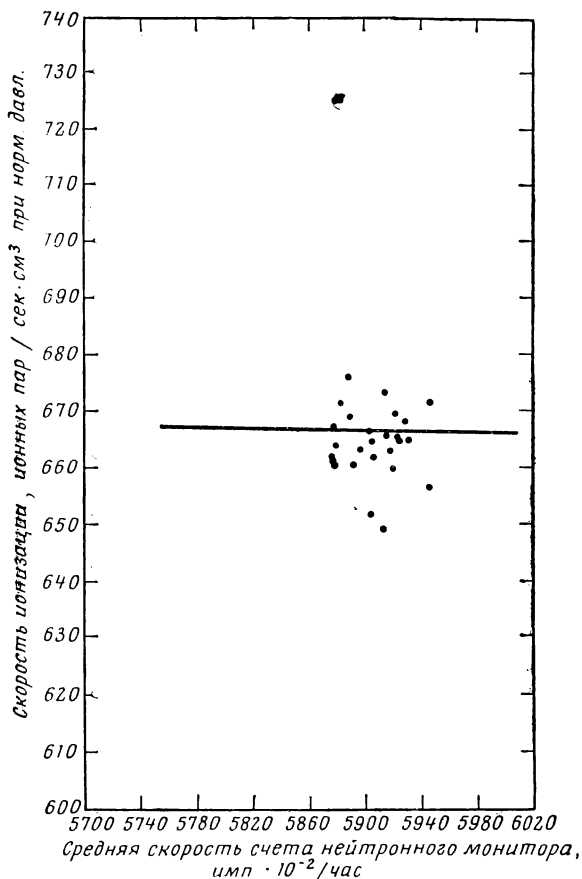


Рис. 6. Сопоставление среднесуточных значений скорости ионизации, полученных на «Маринере-2», со скоростью счета нейтронного монитора в Дип-Ривере для оборота Солнца № 1770 с 320-го по 346-й день; расстояние от Земли изменялось в пределах $(28,3—55,4) \cdot 10^6$ км.

для данных, полученных в Туле, 2,4. Из этого рисунка следует предварительный вывод о линейной связи между измерениями в Туле и на «Маринере-2» — вывод, который не является слишком неожиданным.

На рис. 4 представлен аналогичный график для следующего солнечного оборота. Здесь линия, построенная методом наименьших квадратов, имеет более крутой наклон. Одна из причин хорошей корреляции в этот период — эффект Форбуша, вызвавший большой разброс интенсивностей, с которыми можно работать.

На рис. 5 и 6 приведены графики для третьего и четвертого солнечных оборотов в период полета «Маринера-2». Для этих двух временных интервалов наклон линии уменьшился, а корреляция ухудшилась. Скорость счета нейтронного монитора увеличилась на 1%, тогда как в среднем скорость ионизации оставалась постоянной. На рис. 6 корреляция настолько плоха, что наклон прямой вряд ли имеет какой-либо смысл. Для последнего оборота, представленного на рис. 7, наклон линии вернулся приблизительно к значению, характерному для начала полета, тогда как скорость ионизации возросла примерно на 2%.

Когда я приступил к исследованию, я надеялся показать, что по мере удаления космического аппарата от Земли корреляция между измерениями должна уменьшиться. Полученные результаты приведены в таблице.

Таблица

Сравнение скорости ионизации в космическом пространстве с данными нейтронного монитора в Дип-Ривере

Оборот Солнца	Расстояние от Земли, 10^6 км	Расстояние от Солнца, а. е.	Средняя скорость счета нейтронного монитора, 10^{-2} имп/час	Средняя скорость ионизации на «Маринере-2», $\text{см}^{-3} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$	ρ
1767	0,0—6,9	1,0—0,975	5861,7	666,9	0,639
1768	6,9—14,4	0,975—0,91	5857,1	655,4	0,849
1769	14,4—28,3	0,91—0,81	5901,7	665,0	0,668
1770	28,3—55,4	0,81—0,73	5905,6	664,2	—0,022
1771	55,4—81,4	0,73—0,71	5895,7	680,7	0,802

ρ — это коэффициент корреляции, определяемый выражением

$$\rho = \frac{\sum_{k=1}^K (\delta I_k \delta M_k)}{(K-1) \sigma_I \sigma_M},$$

где I — скорость ионизации, а M — скорость счета нейтронного монитора. Если корреляции нет, то $\rho=0$, а если корреляция идеальна, то $\rho=\pm 1$.

Из табл. 1 видно, что ρ более или менее понижается в течение первых четырех оборотов. В частности, обратите внимание, что средняя интенсивность ионизации в космическом пространстве около «Маринера-2», по-видимому, почти постоянна, хотя

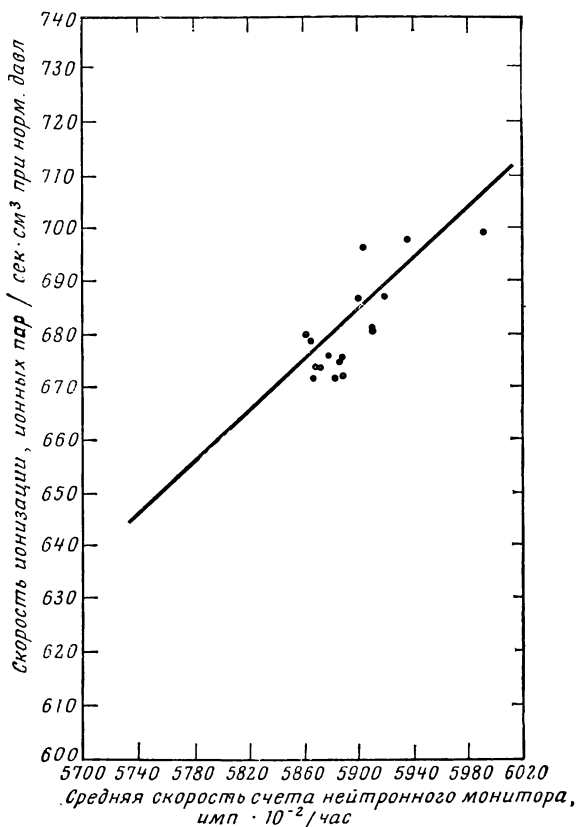


Рис. 7. Сопоставление среднесуточных значений скорости ионизации, полученных на «Маринере-2», со скоростью счета нейтронного монитора для оборота Солнца № 1771 с 347-го по 364-й день; расстояние от Земли изменялось в пределах от $55,4 \cdot 10^6$ до $80,2 \cdot 10^6$ км.

«Маринер-2» приближался к Солнцу, тогда как средняя скорость счета нейтронной компоненты увеличилась на 0,75%. Следовательно, в соответствии с нашими предположениями, скорость ионизации в околоземном космическом пространстве возросла на 1,7%. Разность скоростей ионизации между двумя областями составляла 14,2 ионной пары в $1 \text{ сек} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{атм}$, что

соответствует градиенту $+9,3\%$ на 1 а.е. Этот результат рассматривался Неером на конференции в Джайпуре прошлой осенью [6].

Явление, наблюдавшееся в течение солнечного оборота № 1771, можно объяснить тем, что область космического пространства около «Маринера-2» и область около Земли каким-то образом были связаны магнитным полем. В результате корреляция возросла. В течение этого оборота Солнца уровень излучения космических лучей увеличился, так что градиент составлял $-2,6\%$ на 1 а.е.

Эти результаты указывают на то, что для этих пределов расстояний зависимость среднего потока от расстояния до Солнца, а также зависимость корреляции от взаимного удаления точек наблюдений являются в одинаковой мере как функцией времени, так и функцией положения в космическом пространстве. По-видимому, эта зависимость нарушается, когда расстояние между точками наблюдения велико, но это может оказаться неверным для других периодов цикла солнечной активности. Нам, по-видимому, удалось показать, что может существовать систематическая зависимость от расстояния до Солнца вплоть до 0,3 а.е. в течение этого периода цикла солнечной активности.

Модуляция солнечных энергичных частиц

Теперь я хотел бы остановиться на втором типе модуляции, наблюдавшейся на «Маринере-2». Сильные возрастания ионизации и скоростей счета наблюдались 23 октября (296-й день, см. рис. 1). Полное развитие всего этого явления было довольно характерным для солнечных явлений. На рис. 8 представлены избыточный поток F (фон, равный 2,90, исключен), избыточная скорость ионизации и обратное отношение этих двух величин, которое представляет собой среднюю удельную ионизацию частиц, наблюдаемых в период этого явления.

Начальное увеличение произошло между 18-й и 30-й минутами после вспышки балла 2 в западной части Солнца. Мы предположили, что вспышка была причиной этого возрастания. Время возрастания составляло ~ 142 мин. На рис. 8 показаны также постоянные экспоненциального спада $1/e$, которые меняются время от времени.

Наиболее интересной особенностью этой вспышки был ряд больших колебаний, приведенных на рис. 9 и представляющих часть фазы возрастания этого события. Зарегистрировано около 12 таких колебаний со средним периодом ~ 18 мин. В общей сложности эти колебания продолжались немногим более 220 мин. Представленный на рис. 9 период иллюстрирует максимальную

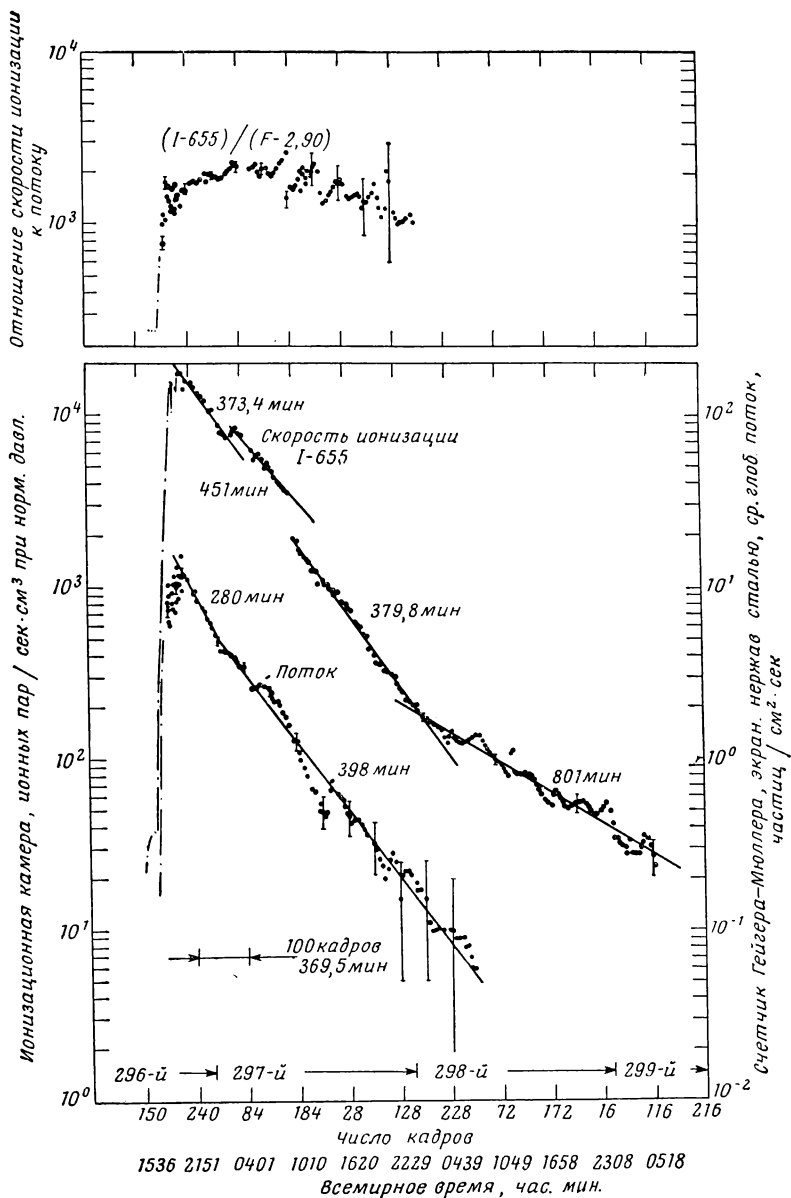


Рис. 8. Связанная со вспышкой активность, наблюдавшаяся на «Маринере-2» с 296-го по 299-й день (23—26 октября 1962 г.).

амплитуду колебания с возрастанием в 2 раза. Затем колебания постепенно прекратились.

Существуют по крайней мере три возможных объяснения генерации таких вариаций. Первое объяснение сводится к тому, что на Солнце неоднократно имела место импульсная инжекция. При помощи наших детекторов мы наблюдали результирующие изменения. Справедливость этого объяснения подкрепляется тем, что время распространения излучения от вспышки ненамного превосходило время, необходимое для распространения по прямолинейной траектории. Однако, чтобы сохранялись образовавшиеся сгустки инжектируемых импульсами частиц, должен существовать максимально допустимый разброс энергий или скоростей и длин свободных пробегов частиц, достигающих космического аппарата. Удельная ионизация, которая наблюдалась в период максимума, согласуется с фактом обнаружения протонов с энергией ~ 12 Мэв, скорость которых составляет приблизительно 0,1 скорости света. Зная эту скорость и то, что «Маринер-2» находился на расстоянии 0,9 а.е. от Солнца, в то время когда наблюдались эти частицы, я подсчитал, что для того, чтобы сгустки частиц не рассеялись полностью на пути от Солнца, частицы должны инжектироваться с энергиями от 0,25 до 2,25 от значения средней энергии. Принимая во внимание порог обрезания прибора, можно сказать, что энергии регистрируемых частиц должны лежать в пределах от 12,5 до 27 Мэв для сохранения сгустков частиц, возникающих на Солнце. И наоборот, если бы все частицы обладали одинаковой энергией 12,5 Мэв, то проходимое ими расстояние между точкой инжекции и космическим аппаратом могло бы измениться менее чем на 0,18 а.е. на пути 0,9 а.е.

Второе объяснение сводится к тому, что мы наблюдали один и тот же сгусток частиц, которые испытывали колебания в своего рода ловушке, и что они регистрировались всякий раз, когда проносились мимо космического аппарата. Если длина области захвата не превышает 0,34 а.е., то для сохранения сгустка в течение 8 колебаний после максимума разброс энергии не должен превышать $\pm 1,5$ Мэв относительно 12,5 Мэв. Следует отметить, что максимальная чувствительность ионизационной камеры приходится на энергетический диапазон 12—20 Мэв, так что крутой энергетический спектр может привести к тем же следствиям, что и почти моноэнергичный поток.

Оба эти объяснения неявно подразумевают, что конфигурация магнитного поля была статической. Третье объяснение основано на том, что магнитное поле не было статическим, а образование сгустка частиц в какой-то степени обусловлено существующими в магнитном поле волнообразными явлениями.

Поскольку первые два объяснения требуют выполнения довольно жестких условий, хотелось бы узнать, какова вероятность динамического образования сгустков частиц.

Подобного типа колебание, но с большим периодом, можно увидеть на рис. 8 в течение фазы затухания. Скорость ионизации, по-видимому, возрастает каждые 180—360 мин, а затем затухает с постоянной времени 380 мин. На рис. 8 можно обнаружить по крайней мере пять таких возрастных.

Хотя детали физических процессов не ясны, тем не менее мне удалось, на мой взгляд, показать, что магнитное поле солнечного ветра все же модулирует галактическое космическое излучение в пределах орбиты Земли и что оно оказывает существенное влияние на распространение частиц от Солнца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson H. R., Science, **139**, 42 (1963).
2. Neher H. V., Anderson H. R., J. Geophys. Res., **69**, 807 (1964).
3. Van Allen J. A., Frank L. A., Science, **138**, 1097 (1962).
4. Frank L. A., Van Allen J. A., Hills H. K., Science, **139**, 905 (1963).
5. Nerurkar N., Webber W. R., J. Geophys. Res., **69**, 815 (1964).
6. Neher H. V., Anderson H. R., J. Geophys. Res., **69**, 1911 (1964).
- 7*. Гинзбург В. Л., Курносова Л. В., Разоренов Л. А., Сыроватский С. И., Фрадкин М. И., Исследование космического пространства, М., изд-во «Наука», 1965, стр. 486.
- 8*. Вакулов П. В., Вернов С. Н., Горчаков Е. Б., Логачев Ю. И., Чарахчян А. Н., Чарахчян Т. Н., Чудаков А. Б., Space Res., **4**, 26 (1964).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА АНДЕРСОНА

Паркер. Когда Солнце, космический аппарат и Земля находятся на одной прямой, магнитные поля, плазма и т. д., приходящие от Солнца, сначала должны пройти мимо космического аппарата, а затем мимо Земли. Тогда можно ожидать корреляции между галактическими космическими лучами, зарегистрированными на космическом аппарате и около Земли. Поскольку космический аппарат движется вокруг Солнца быстрее, чем Земля, наступит такой момент, когда следует ожидать корреляции между солнечными частицами, зарегистрированными на космическом аппарате и около Земли. В последнем случае Земля и космический аппарат находятся на одной и той же силовой трубке спирального магнитного поля.

Насколько эти идеи укладываются в ваши результаты?

Андерсон. Из представленного мною анализа трудно провести различие между возрастанием допустимого числа галактических космических лучей и возрастанием частиц при небольших солнечных выбросах. Если бы увеличение на космическом аппарате и на Земле произошло в течение временного интервала, за который производилось усреднение данных (что составляло сутки), то существовала бы корреляция в обоих случаях.

Рассматривая более детально развитие события во времени, в некоторых случаях можно увидеть более быстрое временное нарастание данных, зарегистрированных на космическом аппарате, по сравнению с нарастанием на

Земле или другие особенности. Однако, поскольку очень чувствительные измерения спектра не производились, довольно трудно получить определенные результаты.

Паркер. Когда космический аппарат пересекал спираль?

Андерсон. К сожалению, я не вычислил этого. Космический аппарат пересекал линию Солнце — Земля в самом начале солнечного оборота № 1769.

Снайдер. Я полагаю, что он пересекал спираль магнитного поля много раз, поскольку форма спирали менялась.

Нейгебауэр. В нашей недавно опубликованной работе¹⁾ был построен график функции τ (предполагаемого времени запаздывания событий на Земле относительно космического аппарата). При $\tau=0$ «Маринер-2» и Земля находятся на одной спирали. [τ обращалось в нуль в 334, 335 и 345-й дни и было близко к нулю в течение 338, 339 и 340-го дней.]

Бирман. Наблюдались ли флуктуации магнитного поля, совпадающие с вариациями энергичных частиц?

Смит. Да. Был один период, в течение которого магнитное поле было сильно возмущено. Этот период длился по крайней мере сутки, предшествующие вспышке балла 2, которая к тому же сопровождалась радиовсплеском IV типа. Очевидно, эти частицы проходили через довольно возмущенное межпланетное магнитное поле и плазму. Однако нам не удалось убедиться, что имела ли какая-либо прямая связь между потоком частиц и изменениями магнитного поля.

Мы пытались проанализировать спектр мощности вариаций межпланетного магнитного поля, но пока не получено каких-либо результатов²⁾. Для данного временного интервала был выполнен довольно грубый анализ, который заключался в поисках характерных периодов путем измерения временных интервалов между двумя последующими максимумами. Гистограмма свидетельствует о том, что чаще всего период в магнитном поле равнялся 2—3 мин. Андерсон получил 18 мин. Характерные размеры флуктуаций с периодом 3 мин равны 10^6 км.

Бирман. Период 2—3 мин представляет интерес, поскольку эти флуктуации могут быть непосредственно связаны с турбулентностью и колебаниями на поверхности Солнца, которые имеют характерные периоды в этом диапазоне.

Бридж. Не предполагаете ли вы, что пересечение космическим аппаратом распространяющейся ударной волны продлится около 1 мин? Такое время наблюдалось для ударной волны у Земли. Мне кажется, что временные масштабы прихода частиц к космическому аппарату должны быть порядка минут, а поэтому неясно, имеет ли явление хаотический характер. Измерения в космическом пространстве производятся с недостаточным временным разрешением, чтобы можно было изучить явление в деталях.

Смит. В магнитных данных мы не обнаружили ничего похожего на ударную волну или переход от сравнительно спокойного состояния к возмущенному. В течение примерно всего дня напряженность магнитного поля была высокой и изменялась нерегулярно.

Фогт. Следовало бы ожидать, что в период ваших наблюдений временные вариации, обусловленные солнечной модуляцией, наиболее четко выражены для малоэнергичных частиц. Ваша ионизационная камера наиболее чув-

¹⁾ C. W. Snyder, M. Neugebauer, U. R. Rao, J. Geophys. Res., 68, 6361 (1963).

²⁾ Недавно опубликованы две работы Колемана, где изложены результаты исследования вариаций межпланетных магнитных полей, измеренных на «Маринере-2», и их воздействие на солнечные космические лучи [P. J. Coleman, Planet Space Sci., 15, № 6, 953, 975 (1967); J. Geophys. Res., 71, № 23, 5509 (1967)]. — *Прим. перев.*

ствительна к этим малоэнергичным частицам, тогда как нейтронные мониторы по существу нечувствительны к протонам с энергией ниже ~ 1 Бэв. Учитывая, что вы использовали данные нейтронного монитора для исправления за временные вариации, и несовершенство введения поправки на временные вариации, какую точность вы приписываете вашим результатам?

Андерсон. Это зависит от принятого энергетического спектра. Я не делал численных оценок. То, что вы говорите, справедливо, но я сомневаюсь, что можно разрешить эту проблему без идентичного детектора на Земле.

Клайн. Что касается нормировки малоэнергичных частиц, зарегистрированных на «Маринере-2», то я предлагаю сравнить данные «Маринера-2» с данными «Эксплорера-14», который был запущен в то же время. На борту «Эксплорера-14» находился дифференциальный энергетический анализатор с таким же энергетическим диапазоном, и мы могли бы сравнить данные «Маринера-2», полученные на большом удалении от Земли, с данными «Эксплорера-14», полученными около Земли. В таком случае ценность данных возрастет.

НАБЛЮДЕНИЯ НА СПУТНИКАХ ЧАСТИЦ С ЭНЕРГИЯМИ НЕСКОЛЬКО МЕГАЭЛЕКТРОНВОЛЬТ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

НАБЛЮДЕНИЯ НА «ЭКСПЛОРЕРЕ-12»

Д. А. Брайант, Т. Л. Клайн, У. Д. Дизей, Ф. Б. Мак-Дональд

Вопросы, которые я хочу обсудить, имеют непосредственное отношение к конференции по солнечному ветру. Они касаются наблюдений частиц в диапазоне энергий от нескольких мегаэлектронвольт до нескольких десятков мегаэлектронвольт. В этом сообщении представлены некоторые новые результаты и дан краткий обзор недавно опубликованных результатов [1, 2], полученных на «Эксплорере-12».

Периодические флуктуации солнечных протонов

Периодическая модуляция интенсивности солнечных протонов обсуждалась Андерсоном (см. гл. 4) в связи с наблюдениями, выполненными на «Маринере-2» на большом расстоянии от Земли. «Эксплорер-12» с апогеем 83 000 км проводил большую часть времени за пределами магнитосферы, но внутри фронта ударной волны, т. е. измерения не были совсем свободны от влияния Земли.

На рис. 1 представлены данные вспышки солнечных протонов, наблюдавшейся на «Эксплорере-12» 10 сентября 1961 г. Вверху в линейном масштабе построены графики относительных интенсивностей двух компонент. На этих графиках обнаруживается модуляция, имеющая приблизительно периодический характер. Если выразить эти флуктуации в отклонениях от скользящих средних значений в процентах, то получим кривые, приведенные внизу. Эти дифференциальные энергетические компоненты от 5 до ~ 100 Мэв охватывают широкую область скоростей. Через равные промежутки времени наблюдаются минимумы, которые находятся в фазе для всех графиков.

Эти флуктуации, по-видимому, больше статистических. Они появляются одновременно в слишком широких пределах скоро-

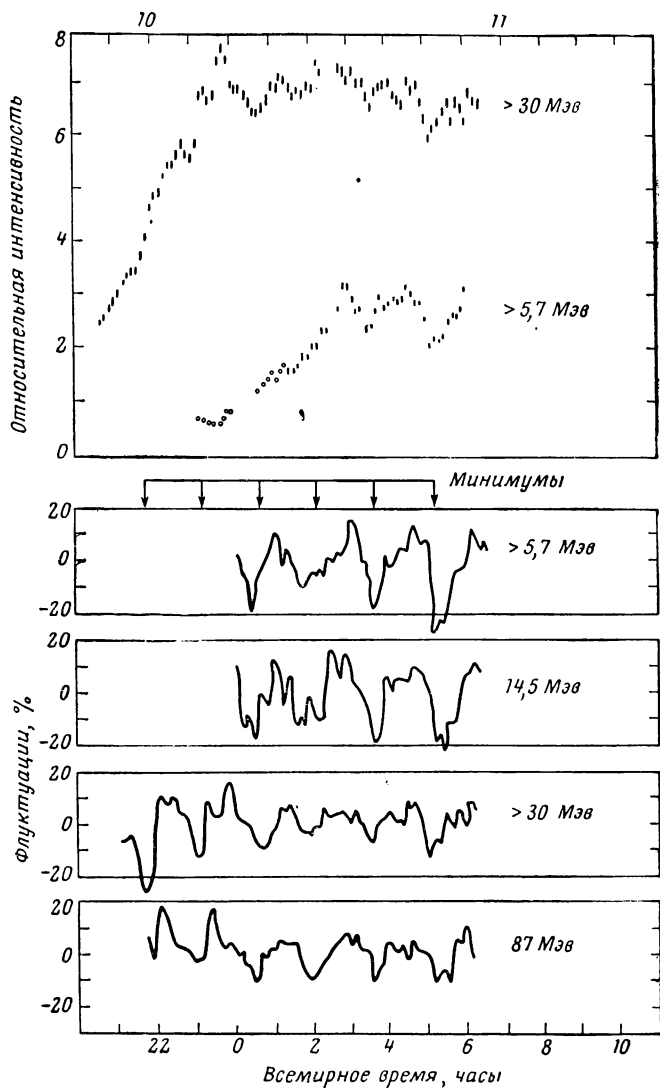


Рис. 1. Наблюдение вспышки солнечных протонов на «Эксплорере-12» 10 сентября 1961.

стей протонов, чтобы можно было считать, что они вызваны прямым воздействием Солнца. Если бы они возникали на Солнце, то распределение времени распространения разрушило бы эту согласованность. Следовательно, флуктуации возникают либо в некоторой области межпланетного пространства, либо в области между магнитопаузой и фронтом ударной волны. Такие 1,5-часовые вариации наблюдались ранее около Земли (например, Уинклер зарегистрировал их при наблюдениях на баллонах), но диапазон ранее измеренных скоростей протонов был недостаточно широк, чтобы показать отсутствие этой дисперсии.

В 1961 и 1962 гг. мы провели измерения во время трех или четырех вспышек солнечных протонов. Обнаружено, что вариации имеют место во всех случаях. Период этих вариаций изменялся от 1,0 до 1,5 час в зависимости от вспышки. Вариации выделяются лучше в течение периода нарастания вспышки, чем в течение периода спада. Хочется отметить, что период на рис. 1 отличается от периодов, найденных Андерсоном по наблюдениям на «Маринере-2». Это различие может быть обусловлено тем, что детектор «Маринера-2» производил измерения далеко в космическом пространстве, тогда как наш — около Земли. Тот факт, что флуктуации интенсивности носят примерно периодический характер, по-видимому, имеет важное значение, хотя пока еще не дано какого-либо теоретического объяснения этого эффекта.

Лейтон. Эти флуктуации измерены внутри магнитосферы?

Клайн. Нет. На расстояниях от 60 000 до 80 000 км, т. е. за пределами магнитосферы, но внутри фронта ударной волны.

Бридж. В какое местное время они наблюдались? Не производились ли измерения близ подсолнечной точки?

Клайн. Спутник находился на освещенной Солнцем стороне Земли около полудня.

Рекуррентные явления

Далее мне хотелось бы рассмотреть 27-дневные вариации интенсивности протонов весьма низкой энергии, наблюдавшиеся на «Эксплорере-12».

28 сентября 1961 г. наблюдалась первичная упорядоченная по скоростям вспышка солнечных протонов. На рис. 2 приведена интегральная интенсивность протонов с энергией больше 3 Мэв. Два дня спустя в период затухания первичной протонной вспышки вновь произошло возрастание интенсивности до максимума, амплитуда которого была на порядок выше предыдущего. Спад интенсивности основной вспышки до уровня шумов наблюдался в течение недели. Затем 27 октября наблюдалось другое увеличение интенсивности протонов, которое произошло через 27 дней

после двухдневного возрастания. Во время этой новой протонной вспышки область на Солнце, которая обусловила вспышку протонов 30 сентября, опять оказалась около центрального меридиана. Рекуррентная протонная вспышка была по интенсивности на два порядка слабее вспышки 30 сентября. Поскольку второе возрастание произошло во время повторного понижения

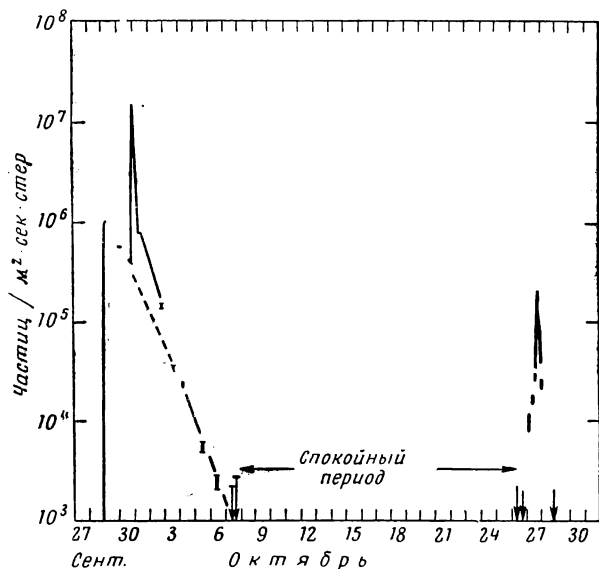


Рис. 2. Наблюдения вспышки солнечных протонов на «Эксплорере-12» 28 и 30 сентября и 27 октября 1961 г.

интенсивности космических лучей и между двумя рекуррентными геомагнитными бурями 26 и 28 октября, то мы считаем, что это событие связано с *М*-областью.

Такой рекуррентный характер имела вспышка солнечных протонов 10 ноября 1961 г., которая была обусловлена хромосферной вспышкой на западном лимбе. Возрастание интенсивности имело место 1 декабря 1961 г. и по своему характеру было очень похоже на увеличение интенсивности 27 октября. Это событие произошло через 3 недели после основной протонной вспышки, а не через 4 недели. Такое поведение обусловлено тем, что Солнце должно было повернуться всего лишь на $\frac{3}{4}$ оборота, чтобы источник — флоккулярная область — оказался около центрального меридиана.

Эти факты свидетельствуют в пользу того, что долгоживущие потоки солнечной плазмы, конфигурации плазма — магнитное

поле, способные либо ускорять протоны, либо удерживать протоны первоначальной вспышки, существуют в течение длительного времени (даже в течение месяцев). Можно также допустить либо непрерывное излучение протонов из одной и той же флоккулярной области на Солнце, либо новое испускание протонов, которые затем направляются из солнечной атмосферы вдоль этих конфигураций. Энергетические спектры вспышек 30 сентября и 27 октября сильно различались. Дифференциальный энергетический спектр вспышки с двухдневным запаздыванием представляется в виде степенной функции, изменяющейся от $\sim E^{-3}$ до E^{-4} , тогда как более поздняя вспышка обладала спектром, более крутым, чем E^{-5} . Итак, первичные вспышки солнечных протонов с упорядоченными скоростями обнаруживают дисперсию времени распространения. Малоэнергичные протоны прибывают позднее, чем высокоэнергичные, и, таким образом, наблюдаемое распределение энергии этих протонных вспышек со временем становится круче. Поскольку спектр вспышки 27 октября был круче спектра предшествующей вспышки 30 сентября, можно предположить, что в течение месяца испускания частиц Солнцем не происходило и что наблюдаемые протоны фактически были «старыми», захваченными магнитным полем. В этом случае было бы необходимо, чтобы либо механизм захвата оказался более эффективным для протонов низкой энергии, либо скорость потерь была возрастающей функцией энергии.

Интересно то, что эти струи могут существовать в течение месяцев, оставаясь довольно тонкими. Мы не знаем, был ли другой максимум через 27 суток после вспышки 27 октября, по крайней мере в наших данных такого максимума интенсивности протонов выше уровня шумов не замечено. Возрастание интенсивности 27 октября было довольно резким, несмотря на длительное запаздывание. Ширина на уровне половины максимума интенсивности составляет примерно сутки и увеличивается по мере понижения порога чувствительности. Если бы наши пороги чувствительности были значительно ниже, то мы смогли бы наблюдать другое повторение месяц спустя.

НАБЛЮДЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 3 Мэв НА СПУТНИКЕ «ИМП-1»

Т. Л. Клайн, Г. Х. Людвиг, Ф. Б. Мак-Дональд

Нам удалось зарегистрировать в межпланетном пространстве электроны внеземного происхождения с энергиями ~ 3 Мэв. На рис. 3 представлен детектор, установленный на спутнике

«ИМП-1». Он измеряет как потери энергии, так и остаточную энергию частицы, что отмечается по совпадению измерений сцинтиллятора (ΔE) малой и сцинтиллятора ($E - \Delta E$) большой толщины. Антисовпадение с пластическим сцинтиллятором на выходе требует, чтобы входящие частицы полностью останавливались во втором кристалле. Если событие удовлетворяет требованиям совпадения — антисовпадения, то сигналы ΔE и $E - \Delta E$

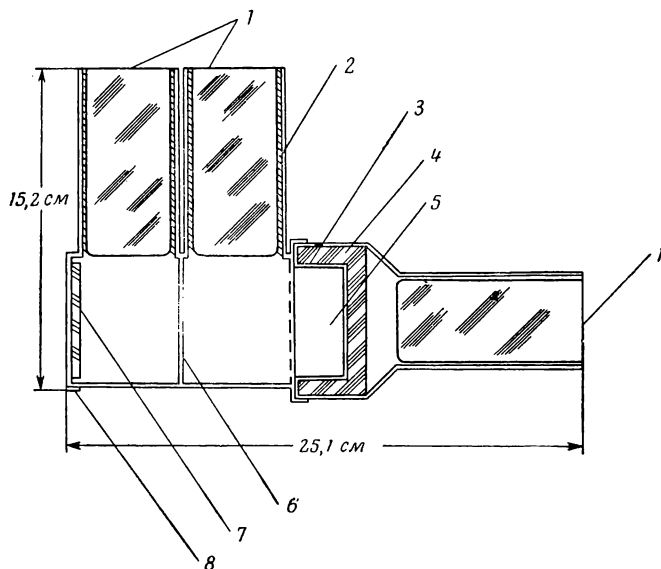


Рис. 3. Детектор, установленный на спутнике «ИМП-1».

1 — фотоумножитель RCA C-7151; 2 — силиконовая резина RTV; 3 — алюминиевый отражатель 27 г/см²; 4 — пластиковый сцинтиллятор 0,8 г/см²; 5 — сцинтиллятор $E - \Delta E$, CsI(Tl), 9 г/см²; 6 — алюминиевый отражатель, 25 г/см²; 7 — сцинтиллятор ΔE , CsI(Tl), 450 г/см²; 8 — алюминиевый отражатель, 20 г/см².

подаются на 256-канальный амплитудный анализатор. Вследствие низкой разрешающей способности телеметрической системы анализ по амплитуде возможен лишь один раз в минуту (скорость счета регистрируется независимо). Этот прибор обладает хорошим разрешением, но у него есть недостаток. Он чувствителен к вторичному излучению, возбуждаемому в спутнике: нейтральная частица, приходящая с выхода счетчика, может образовать частицы в сцинтилляторе $E - \Delta E$, а затем эта частица может пройти через сцинтиллятор ΔE . Мы покажем, что эффекты вторичного излучения были исключены.

Составлялись таблицы числа импульсов в зависимости от их уровня для ΔE и $E - \Delta E$. На рис. 4 видно, что в каждом узком интервале $E - \Delta E$ имеются отчетливо выраженные пики, соответствующие минимальной ионизации. Этот пик минимальной

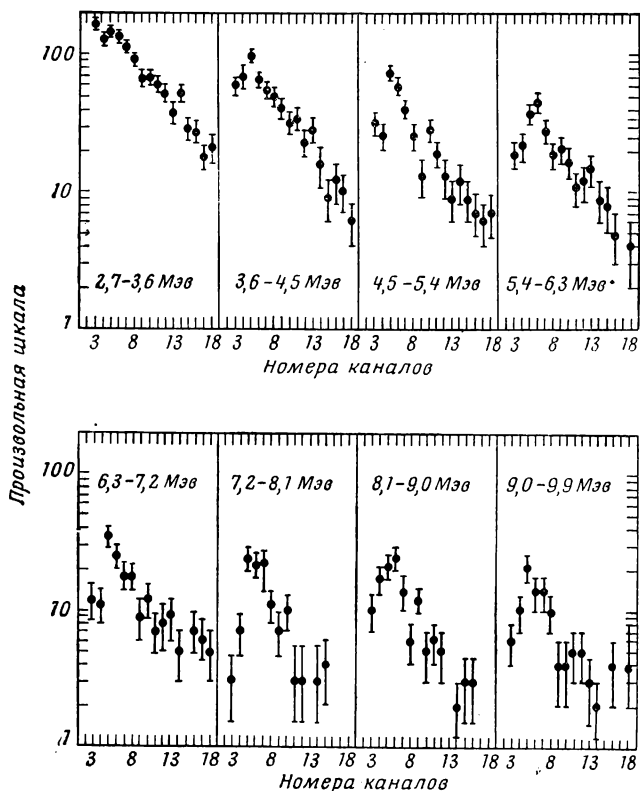


Рис. 4. Распределение ΔE в произвольной шкале с 27 ноября по 16 декабря 1963 г. Представлены различные энергетические диапазоны.

ионизации накладывается на фон малоэнергичных потерь, который является наибольшим при самых низких значениях $E - \Delta E$. Фон, как нам кажется, обусловлен гамма-излучением от спутника и создает электроны в цезиево-иодистом кристалле ($E - \Delta E$).

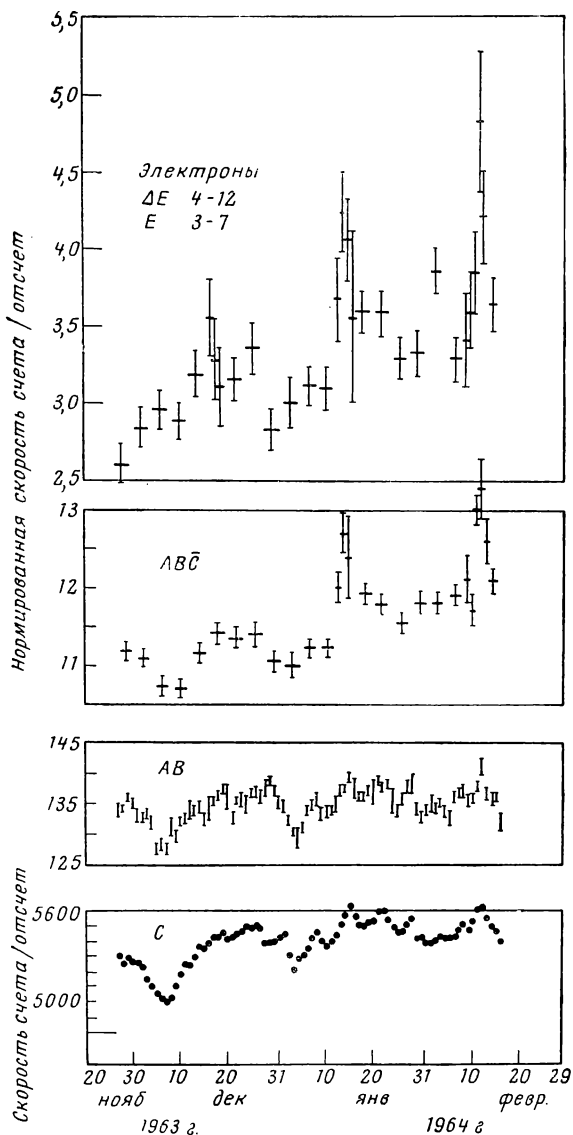
Предположим, что низкоэнергичной компонентой, дающей вклад в скорость счета минимальной ионизации, являются электроны. Эта компонента построена в функции времени с ноября

1963 по февраль 1964 г. (рис. 5, верхняя кривая). Чтобы доказать, что эти частицы — первичные электроны, мы исследовали их временные вариации и сравнили с временными вариациями первичных протонов. На графике *AB* приведены данные по протонам галактических космических лучей, полученные с помощью телескопа счетчиков, а на графике *ABC* представлены как малоэнергичные протоны, так и электроны, которые останавливаются в счетчике.

На рис. 5 видны три возрастания скорости счета электронов с интервалом 28 суток, но для протонов высоких и средних энергий таких возражений не наблюдается. Мы нормировали три верхние скорости счета, чтобы сравнить между собой возрастания скоростей счета частиц различных энергий. Например, когда наблюдается увеличение скорости счета на графике *ABC* с ~ 12 до 13 импульсов на отсчет, то весь вклад (1 импульс на отсчет) в возрастание интенсивности объясняется увеличением скорости счета электронов с 3,5 до 4,5; увеличения скорости счета протонов не наблюдалось.

Мы не можем утверждать, что это первичные электроны, поскольку отсутствует характер модуляции протонов средней и высокой энергии и этих электронов. Например, если бы на спутник попадали малоэнергичные протоны, к которым наш прибор нечувствителен, то они могли бы создать гамма-излучение, которое в свою очередь могло бы генерировать электроны в детекторе. Однако если бы существовали 27-дневные рекуррентные возрастания таких малоэнергичных протонов, то одновременно они должны были бы проявляться в повторяющихся понижениях интенсивности космических лучей, например, 4 декабря. К счастью, на спутнике «ИМП-1» был установлен детектор, который не зарегистрировал возрастания потока малоэнергичных (>1 Мэв) протонов [3] в эти дни. Такие возрастания скорости счета протонов наблюдались, но они были смещены примерно на 2 недели по отношению к наблюдаемым электронным максимумам и не сказывались на скорости счета электронов. Эти аргументы свидетельствуют с том, что мы обнаружили первичные электроны.

На рис. 6 представлено распределение ΔE в период возрастания 14—15 января. Видно, что даже при очень низких энергиях имеется весьма отчетливый пик минимальной ионизации, т. е. фон гамма-излучения в спокойный период не выявляется. Это свидетельствует о том, что наблюдаемое возрастание даже частично не было обусловлено гамма-излучением спутника. На рис. 7 вверху показано распределение амплитуд импульсов интегрального счета при минимальной ионизации, деленное на отсчет для возрастания интенсивности 14—15 января. Это



Р и с. 5. Данные наблюдений различных счетчиков, установленных на «ИМП-1», начиная с запуска до 15 февраля 1964 г. Счетчик A регистрирует ΔE , счетчик B регистрирует $E - \Delta E$, счетчик C — защитный. На верхнем графике приведены избранные импульсы $AB\bar{C}$, которые, как полагают, соответствуют первичным электронам.

распределение было преобразовано (довольно произвольным образом) в приближенные значения интенсивности в $\text{электрон}/\text{см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{стер} \cdot \text{Мэв}$. Распределение для спокойного периода представлено на рис. 7 внизу. Наблюдаются крутой наклон и разброс отсчетов, который можно приписать протонам, если

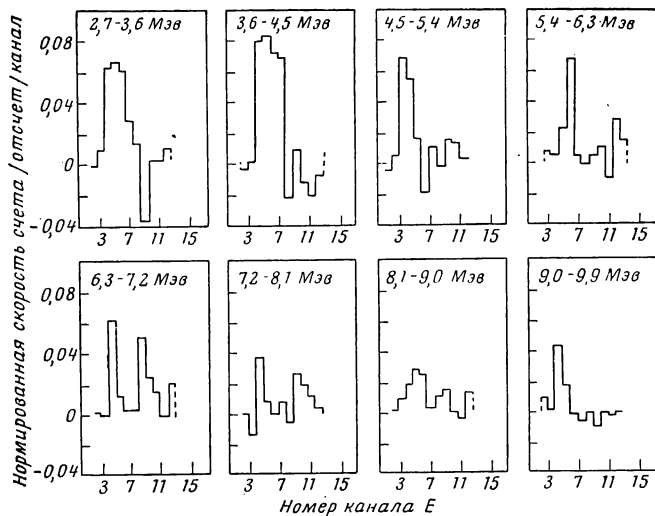


Рис. 6. Распределение ΔE в период возрастания 14—15 января 1964 г. Представлены различные энергетические интервалы.

считать, что электроны распределены по степенному закону. Распределение протонной компоненты по амплитудам имеет максимум около 13 Мэв. Протоны не заставляли срабатывать экранированный счетчик либо потому, что счетчик неэффективен, либо потому, что протоны превращались в нейтральные частицы вследствие взаимодействия в детекторе. Протоны, которые вызывают эти импульсы, являются вторичными; если пренебречь ими, то останется избыток электронов.

Возрастание 14—15 января дает нам распределение скорости счета, свободное от вторичных эффектов: высокоэнергичные протоны отсутствуют; кроме того, отсутствует малоэнергичное гамма-излучение спутника. Итак, мы полагаем, что возрастание интенсивности вызывается исключительно первичными электронами, причем эта интенсивность очень низкая.

На рис. 8 представлены графики трех возрастаний скорости счета электронов для сравнения с индексом K_p . Друг под другим приведены данные для дат, отстоящих на 27 суток. Эти

возрастания приблизительно коррелируют с очень спокойными периодами на Солнце, они имеют место, когда индекс K_p почти равен нулю. Однако, как это следует из значений индекса K_p , три спокойных периода на Солнце повторяются через 27 суток, тогда как возрастание скорости счета электронов обнаруживает некоторый фазовый сдвиг, поскольку они повторяются через

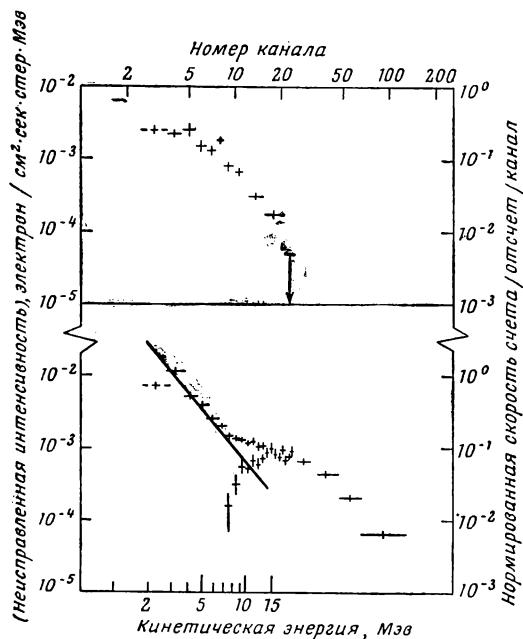


Рис. 7. Распределение электронов по энергиям: *вверху* — в период увеличения интенсивности 14—15 января 1964 г. (каналы с 4-го по 12-й включительно); *внизу* — в спокойный период с 17 декабря по 12 января 1964 г. (витки с 6-го по 12-й).

28 суток. Два первых возрастания имели место в спокойные периоды, но третье возрастание, по-видимому, наступило после спокойного периода одновременно с внезапным началом. Невольно напрашивается вывод, что электроны, вызывающие эти возрастания, являются галактическими, поскольку интенсивность возрастает, когда межпланетное пространство становится спокойным. Но я признаюсь, что мы не убеждены в этом. Если они галактические, то солнечная модуляция такова, что позволяет частицам с жесткостью 3 Мэв диффундировать до 1 а. е.

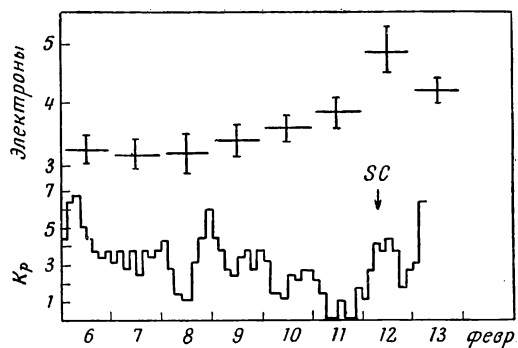
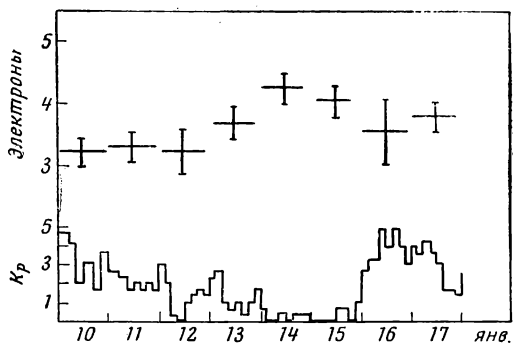
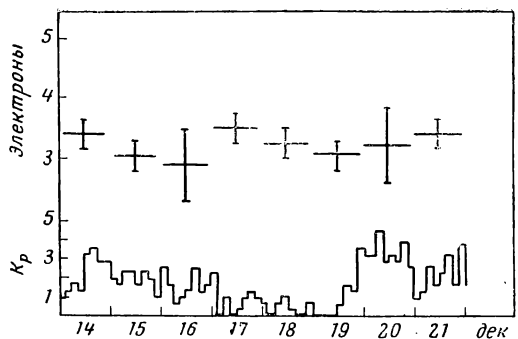


Рис. 8. Графики возрастания скорости счета электронов. Для сравнения приведен геомагнитный индекс K_p .

Если эти электроны имеют солнечное происхождение, а мы предполагаем, что это действительно так, то их интенсивность неожиданно высока. В отличие от протонов, которые наблюдаются лишь в некоторых вспышках, электроны регистрируются каждый день. Во всяком случае электроны и протоны проявляют качественно различные эффекты модуляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bryant D. A., Cline T. L., Desai V. D., McDonald F. B., Proc. of the IUPAP Int. Conf. on Cosmic Rays Jaipur, India, vol. I, 1964, стр. 70.
2. Bryant D. A., Cline T. L., Desai V. D., McDonald F. B., Phys. Rev. Letters, **11**, 144 (1963).
3. Fan C. Y., Gloeckler G., Simpson J. A., «Explorer-18». Symposium, Goddard Space Flight Center (в печати).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА КЛАЙНА

Фогт. Может быть, первоначально в солнечной системе существовал некоторый поток электронов (галактического и солнечного происхождения), и эти потоки периодически подавлялись в результате солнечной активности, а при третьем прохождении активной области модуляция была полностью уничтожена инжекцией солнечных электронов?

Клайн. Любое возрастание само по себе не слишком важно в статистическом отношении, но то, что эти три случая повторялись с периодом 28 дней, дает основание верить в существование связи между ними.

Фогт. Может быть, это одна и та же активная область, которая модулирует при первых двух прохождениях, а затем генерирует электроны лишь при третьем прохождении.

Клайн. Я полагаю, что не следует привлекать столько же причин, сколько наблюдается эффектов.

Фогт. Вы сказали, что изменение характера спектра свидетельствует против непрерывного создания солнечных частиц. Это довольно заманчиво. Однако мы пока еще недостаточно хорошо понимаем природу ускорения и инжекции солнечных частиц. После возвращения активной области некоторые из ее физических характеристик могли измениться. Следовательно, должно иметь место излучение частиц с различными спектральными характеристиками.

Эксфорд. Явления, наблюдавшиеся в октябре, вы связываете с явлениями 30 сентября или с хромосферной вспышкой? Кроме того, во время вспышки 30 сентября наблюдались флуктуации в фазе максимального развития. Раньше вы интерпретировали эти флуктуации иначе.

Клайн. Я сегодня говорил о флуктуациях в первичных вспышках солнечных протонов, например, 28 сентября, а не в запаздывающих вспышках, как, например, 30 сентября. Интенсивность рекуррентной вспышки протонов 27 октября была слишком слабой, чтобы статистически проследить это явление в деталях, тогда как интенсивность в период вспышки 30 сентября была высокой.

Возвращаясь к вашему первому вопросу, могу сказать, что, вероятно, имеют место два совершенно независимых явления. Возможно, что протонная вспышка 30 сентября феноменологически не идентична протонной вспышке 27 октября, но отличается от нее лишь тем, что Солнце совершило еще один оборот. Первая из этих вспышек является, по-видимому, запоздавшим фрон-

том ударной волны от вспышки солнечных протонов 28 сентября. Вспышка солнечных протонов 10 ноября, которая наблюдалась на западном лимбе, через 3 недели сопровождалась рекуррентной вспышкой. Но через 2 дня после нее не последовало внезапной плазменной вспышки.

Бридж. Нельзя ли предположить, что вспышка 28 сентября создала частицы в процессе диффузии? Два дня спустя, когда плазма достигла космического аппарата, вы наблюдали захваченные частицы этой хромосферной вспышки. Через 28 дней вы наблюдали, что хромосферная вспышка, совершив полный оборот, вернулась снова.

Клайн. Да.

Бридж. Возможна любая другая интерпретация, не так ли?

Клайн. Это наиболее простой подход.

Мид. В какой фазе была Луна в периоды электронных максимумов?

Клайн. Не знаю.

Снайдер. Вся беда в том, что существует слишком много явлений с 28-дневным периодом

ИЗМЕРЕНИЯ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА СПУТНИКЕ «ИМП-1»¹⁾

*Н. Ф. Несс***Спутник «ИМП-1»**

На рис. 1 показан спутник «ИМП». Видны некоторые характерные детали спутника, которые имеют непосредственное отношение к экспериментам, выполненным на его борту²⁾. Основная часть спутника представляет собой восьмиугольную призму высотой 20,3 см. Расстояние между противоположными параллельными боковыми гранями равно 69,2 см. Четыре антенны, излучающие на частоте 136 Мгц, и четыре откидные панели с солнечными элементами расположены симметрично вокруг восьмиугольной призмы. Штанги, на которых установлены датчики магнитометров, расположены одна вдоль оси восьмиугольной призмы (оси вращения спутника), а две длинные — вдоль диаметра восьмиугольника перпендикулярно его оси. В сфере диаметром 32,5 см, расположенной на конце осевой штанги, находится камера поглощения рубидиевого магнитометра³⁾. Две другие штанги поддерживают феррозондовые магнитометры⁴⁾. Все штанги магнитометров были увеличены вдвое по сравнению с первоначально спроектированной длиной, поскольку после того, как был построен металлический каркас космического аппарата и определены его магнитные свойства, стало ясно, что магнитный эксперимент будет подвержен серьезной опасности, если не удалить датчики на большее расстояние от основной части аппарата.

Некоторые приборы смонтированы на гранях восьмиугольной призмы самого космического аппарата. Устройство, похожее на

¹⁾ Спутник «ИМП-1» называют также «Эксплорером-18», межпланетной контрольной (или автоматической) станцией. — *Прим. ред.*

²⁾ Более полное представление о конструкции спутника «ИМП-1», о программе и о результатах исследования межпланетных магнитных полей можно получить из работ [3*—8*]. — *Прим. перев.*

³⁾ Более полное представление о рубидиевом магнитометре можно получить из работы Е. И. Дашевской и А. Н. Козлова [9*]. — *Прим. перев.*

⁴⁾ Их иначе называют магнитометрами с магнитно-насыщенными датчиками. — *Прим. ред.*

дымовую трубу, выполняет те же функции, что и обычная труба, с тем лишь исключением, что тепло от основного преобразователя удаляется посредством излучения, а не посредством конвекции.

Спутник был запущен 27 ноября 1963 г. на сильно вытянутую эллиптическую орбиту с периодом 93,5 час и апогеем $\sim 31,7 R_{\oplus}$.

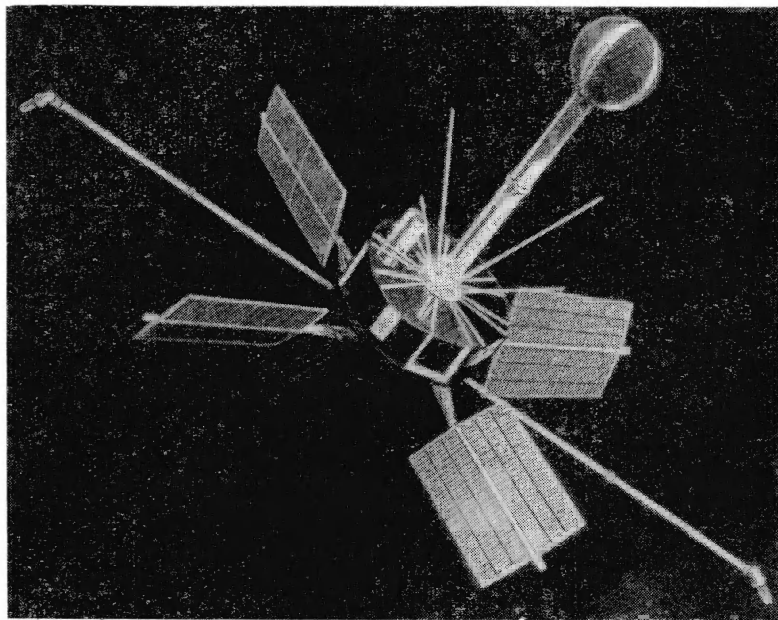


Рис. 1. Спутник «ИМП-1».

Угол апогей спутника — Земля — Солнце равнялся $25^{\circ},6$, так что первоначально апогей находился на освещенной Солнцем стороне Земли. 30 ноября 1963 г. на нисходящей части витка спутник проходил очень близко к подсолнечной точке магнитосферы.

Измерение магнитного поля

Измерения магнитного поля предназначены для исследования четырех основных явлений в космическом пространстве: 1) межпланетных магнитных полей солнечного происхождения; 2) солнечно-земных «преходящих явлений» (магнитные бури); 3) бесстолкновительной ударной волны (взаимодействие солнечного

ветра с геомагнитным полем); 4) границы геомагнитной полости (магнитопауза).

На рис. 2 показано схематическое сечение спутника с расположением чувствительных датчиков относительно основной части космического аппарата. Датчики феррозондовых магнитометров располагались на расстоянии 213 см от центра космического аппарата, весящего 62 кг, а квантовый магнитометр на парах

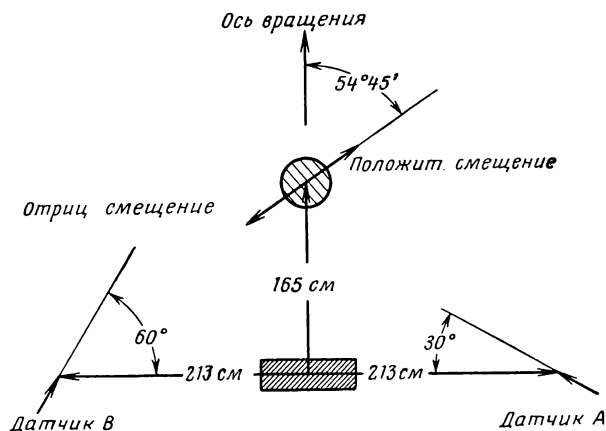


Рис. 2. Схематическое поперечное сечение спутника «ИМП-1», показывающее расположение и ориентацию приборов.

рубидия смонтирован на расстоянии 165 см. При разработке аппаратуры космического аппарата были приняты меры предосторожности, чтобы избежать паразитных магнитных полей, создаваемых: 1) ферромагнитными материалами и 2) токами, циркулирующими в аппарате.

Датчики феррозондовых магнитометров установлены под разными углами к оси вращения (см. рис. 2). Когда спутник вращается вокруг своей оси, магнитное поле, регистрируемое каждым одноосным датчиком, модулируется с частотой вращения спутника. Возможность регистрации векторов магнитных полей в космическом пространстве при различных углах наклона к оси вращения зависит от ориентации датчиков по отношению к оси вращения спутника. Датчик А, смонтированный под углом 30° к экваториальной плоскости, более чувствителен к магнитным полям, перпендикулярным к оси вращения, поскольку большая составляющая проецируется вдоль его оси. Датчик В более чувствителен к магнитным полям, которые направлены параллельно оси вращения спутника.

Рубидиевый магнитометр измеряет лишь напряженность магнитного поля. На сфере находится система смещающих колец, которые создают известное магнитное поле с известным направлением. Сигнал прибора зависит от векторной суммы известного и неизвестного магнитных полей. Анализ измерений позволяет однозначно определить величину и направление неизвестного окружающего поля. Система смещающих колец использовалась также на спутнике «Эксплорер-10». Кроме того, эта система использовалась на «Рейнджере-1» и «Рейнджере-2», хотя с некоторыми изменениями, поскольку спутники типа «Рейнджер» не были стабилизированы вращением.

На рис. 3 приводится система координат, которая лучше всего подходит для интерпретации анизотропных явлений, наблюдающихся на спутнике, стабилизированном по отношению к оси вращения. Обозначим через Z ось вращения спутника, а через XZ — плоскость, в которой лежит вектор спутник — Солнце. В таком случае вектор магнитного поля $\mathbf{B}$ полностью описывается его величиной и направлением, задаваемым двумя углами — полярным α и азимутальным ψ .

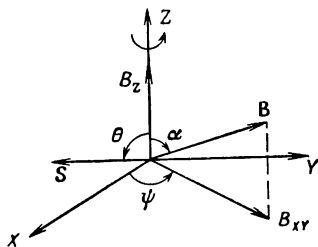


Рис. 3. Система координат спутника и выходной сигнал детектора.

Результат измерений

$$D = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = B \cos \alpha \cos \theta + B \sin \alpha \sin \theta \cos(\omega t - \psi)$$

представляет собой скалярное произведение напряженности поля на угол между осью датчика и направлением магнитного поля и складывается из постоянной и переменной составляющих (частота переменной составляющей соответствует частоте вращения спутника). Постоянная составляющая, измеряемая на выходе, равна $B \cos \alpha$, т. е. это составляющая поля, параллельная оси вращения. Переменная составляющая, измеряемая на выходе, зависит от составляющей поля, перпендикулярной оси вращения. Таким образом, $B \sin \alpha = B_{xy}$.

Мы использовали линейные численные операторы для определения первой и второй производных по времени сигнала, модулированного с частотой вращения спутника.

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} &= -\omega B_{xy} \sin \theta \sin(\omega t - \psi), \\ \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} &= -\omega^2 B_{xy} \sin \theta \cos(\omega t - \psi). \end{aligned}$$

Зная две производные по времени и частоту вращения спутника вокруг своей оси, можно определить угол ψ и составляющую магнитного поля, перпендикулярную оси вращения:

$$B_{xy}^2 = \frac{\left(\frac{\partial D}{\partial t}\right)^2 \omega^2 + \left(\frac{\partial^2 D}{\partial t^2}\right)^2}{\omega^4 \sin^2 \theta},$$

$$\psi = \arctg \left(\omega \frac{\partial D}{\partial t} / \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} \right).$$

Вновь подставляя B_{xy} и ψ в уравнение регистрируемого выходного сигнала, можно определить составляющую вдоль магнитного поля. Аналогично анализируются данные рубидиевого магнитометра, хотя модуляция регистрируемого выходного сигнала более нелинейна. Рубидиевый магнитометр менее чувствителен к векторным измерениям, чем феррозондовые магнитометры, специально предназначенные для таких измерений. Поэтому такие приборы были установлены на космическом аппарате и программа передач телеметрических данных была составлена таким образом, что отдавалось предпочтение данным феррозондовых магнитометров, чтобы обеспечить надежные векторные измерения межпланетного магнитного поля.

Феррозондовые магнитометры производят относительные измерения, нулевой уровень магнитометра неизвестен. Приборы можно откалибровать в лаборатории, хотя нет гарантии, что нуль магнитометра будет стабильным в течение длительного времени. Смещение нуля связано со свойствами материала сердечника, используемого в датчике. Применение рубидиевого магнитометра, являющегося абсолютным прибором, позволяло определять нулевой уровень феррозондовых магнитометров во время полета. Кроме того, рубидиевый магнитометр обладает более широким динамическим диапазоном и позволяет измерять магнитные поля напряженностью до 300 γ.

На рис. 4 приведен образец полного телеметрического цикла измерений и программа, используемая для выборки выходных данных трех датчиков магнитометров. Длительность телеметрической серии составляет 81,9144 сек. Сначала передаются показания феррозондового магнитометра А, затем В. Эти четыре замера равномерно распределены внутри интервала в 20 сек. Каждый замер длится 4,80 сек. Пики и впадины в сериях I—III не расположены точно друг под другом, поскольку период полного цикла измерений не совпадает с периодом вращения спутника. Скорость вращения спутника изменялась от 22,1 до 25,2 об/мин, т. е. период был немногим меньше 3 сек. В течение одной передачи данных феррозондового магнитометра спутник совершал полтора оборота.

В каждой четвертой серии измерений данные рубидиевого магнитометра передаются по всем телеметрическим каналам, и в этот период на Землю не поступает другая научная информация. Данные, накопленные другими бортовыми датчиками, передаются между сериями I, II и III. Серия IV была включена в цикл измерений главным образом из-за методики передачи информации рубидиевого магнитометра. Выходная частота модулировала по фазе несущую. Преобразование данных рубидиевого

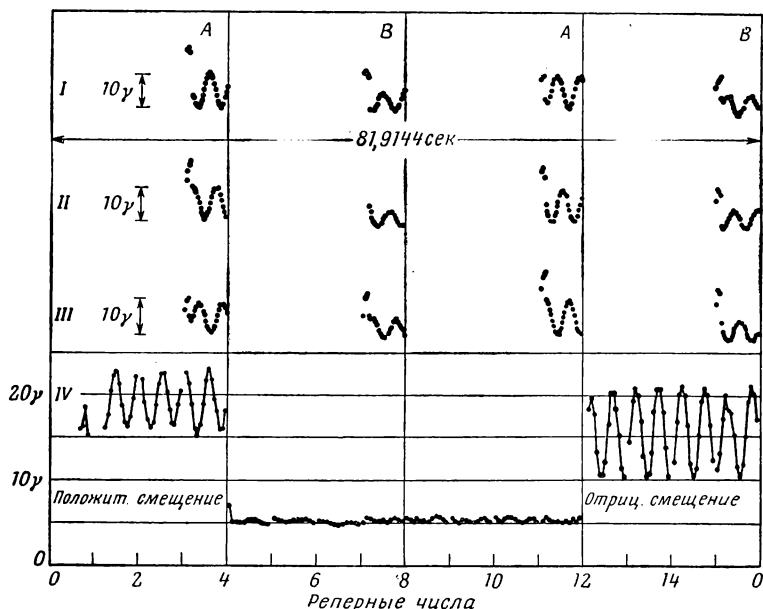


Рис. 4. Типичная серия данных. Серии I—III содержат чередующиеся интервалы данных двух феррозондовых магнитометров. Серия IV представляет запись рубидиевого магнитометра при положительном, отрицательном и нулевом полях смещения.

магнитометра в цифровые значения производилось на наземной установке.

Кроме того, на рис. 4 показана программа системы колец смещающего напряжения, которая добавляет поле напряженностью 20γ , направление которого известно, к неизвестному полю. В течение второй и третьей четвертей серии IV смещающие кольца отключаются и измеряется лишь неизвестное магнитное поле. Данные, приведенные на рис. 4, получены на расстоянии $\sim 100\,000$ км, т. е. далеко за пределами магнитопаузы и ударной волны; таким образом, напряженность магнитного

поля в межпланетном пространстве составляет около 5γ . Другая характерная особенность этих данных объясняет, почему мы выбрали именно такой период. Если бы существовало собственное магнитное поле космического аппарата, то при отключении смещающих колец наблюдалась бы модулированная составляющая этого поля. Удалось оценить, что полная амплитуда модулированной составляющей не превышала $0,5\gamma$. Мы чувствовали, что по абсолютной шкале погрешность составляла $\pm 0,25\gamma$. Это не что иное, как определенное во время полета абсолютным магнитометром собственное магнитное поле космического аппарата.

В течение последней четверти серии IV направление тока в системе колец менялось на противоположное. (Такое поле смещения называется отрицательным.) При этом меняется модуляция сигнала, обусловленная вращением спутника. Мы изменяли направление смещающего поля для распределения наших замеров таким образом, чтобы избежать предпочтительной ориентации полей, поскольку чувствительность прибора зависит от ориентации. Если модуляция, обусловленная вращением, значительна в первой четверти, то вполне возможно, что в четвертой четверти она может оказаться незначительной. Справедливо также и обратное утверждение. Пример, приведенный на рис. 4, указывает, что модуляция хорошая как при положительном, так и при отрицательном поле смещения. Это свидетельствует об относительно большой величине составляющей магнитного поля, перпендикулярной к оси вращения спутника.

На рис. 5 представлен результат сравнения нулей феррозондовых и рубидиевого магнитометров. В этом случае телеметрические серии однозначно определяются порядковым номером, например 21963, через четыре серии порядковый номер будет 26967 и т. д. $F_{\parallel}$ и $F_{\perp}$ — составляющие магнитного поля, параллельная и перпендикулярная оси вращения.

При таком представлении данных результаты феррозондового магнитометра A не исправлялись. Данные феррозондового магнитометра B были исправлены для параллельной составляющей на $-2,1\gamma$. Примерно за 70 дней анализа этих данных нуль феррозондового магнитометра B сместился с $-2,1\gamma$ до $-2,5\gamma$. Мы уверены, что наши определения нулей феррозондовых магнитометров согласуются с уровнем шумов космического аппарата ($\pm 0,25\gamma$).

На рис. 6 показана система координат, в которой будут представлены данные. Начало системы координат помещается в центр Земли, но оси направлены таким образом, чтобы подчеркнуть, что исследуемое явление связано с Солнцем. Ось $X_{\odot}$ направлена от центра Земли к Солнцу. Ось $Z_{\odot}$ направлена перпенди-

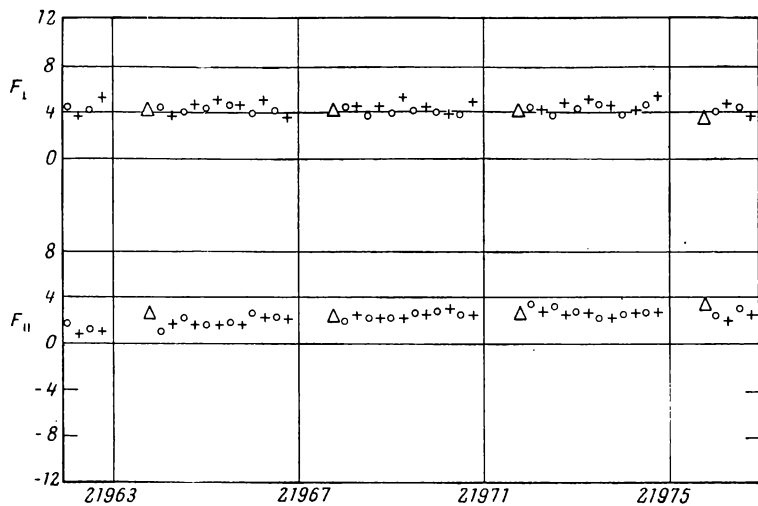


Рис. 5. Сравнение данных феррозондовых магнитометров А (кружки), В (крестики) и рубидиевого магнитометра (треугольники). (По оси абсцисс отложены номера серий.)

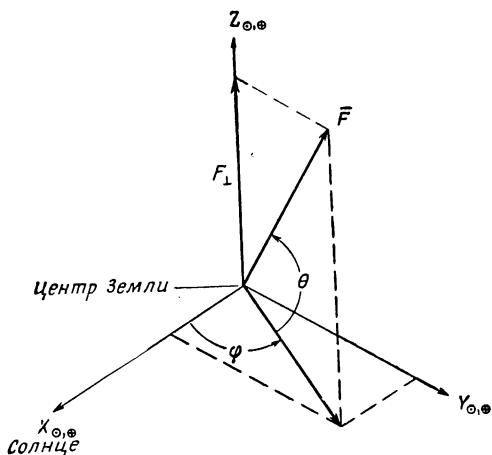


Рис. 6. Солнечно-эклиптическая система координат.

кулярно к плоскости эклиптики, а ось $Y_{\odot \oplus}$ выбирается таким образом, чтобы система координат была правовинтовой. Данные представляются не в виде составляющих по соответствующим осям, а численной величиной и двумя углами. К сожалению, выбранные нами обозначения и характер представления данных не совпадают с обозначениями и представлением данных «Маринера-2» (см. гл. 3). θ — широтный угол вектора магнитного поля, отсчитываемый от плоскости эклиптики; φ — азимутальный угол, который равен нулю, если вектор поля направлен к Солнцу, и 180° , если вектор направлен от Солнца.

Орбита «ИМП-1»

Параметры орбиты имеют особенно важное значение при измерении межпланетных магнитных полей и солнечного ветра, не возмущенных и не искаженных присутствием Земли и ее магнитного поля. На рис. 7 плоскость эклиптики лежит в плоскости чертежа; Солнце находится справа. Показаны первые четыре витка спутника «ИМП-1», указано всемирное время в моменты прохождения точек, обозначенных на витках. Два нуля означают начало суток, например, точка 28/00 соответствует 0 час. 28 ноября. Спутник, движущийся по сильно вытянутой эллиптической орбите, большую часть времени проводит около апогея. Таким образом, на измерения параметров межпланетной среды отводится больше времени, чем на измерения в окрестностях Земли, где данные искажены вследствие взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем.

На рис. 7 видно, что линия апсид, или прямая апогей спутника — Земля, первоначально располагалась на 25° восточнее полуденного меридиана: она смещалась на 4° на виток, поскольку спутник совершает полный оборот (виток) вокруг Земли за 4 суток. Рассматриваемые данные получены в течение первых 19 витков.

На рис. 8 показана проекция орбиты на плоскость, перпендикулярную плоскости эклиптики, т. е. на плоскость $X_{\odot \oplus} Z_{\odot \oplus}$. На восходящей части витка спутник находится ниже плоскости эклиптики на расстоянии примерно 5 или $6R_{\oplus}$. В апогее спутник находится под плоскостью эклиптики, а на нисходящей части витка спутник поднимается выше плоскости эклиптики. Со временем проекция траектории на плоскость $X_{\odot \oplus} Z_{\odot \oplus}$ укорачивается. В настоящее время (т. е. в апреле 1964 г. — *Ред.*) проекция апогея на эту плоскость характеризуется отрицательным значением $X_{\odot \oplus}$.

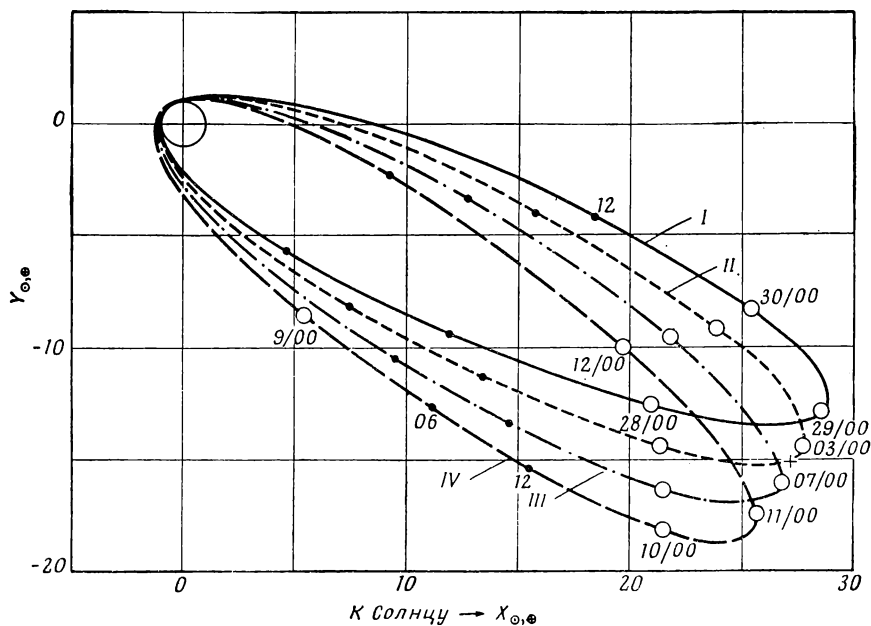


Рис. 7. Первые четыре витка спутника «ИМП-1», спроецированные на плоскость эклиптики. Расстояние в $R_{\oplus}$.

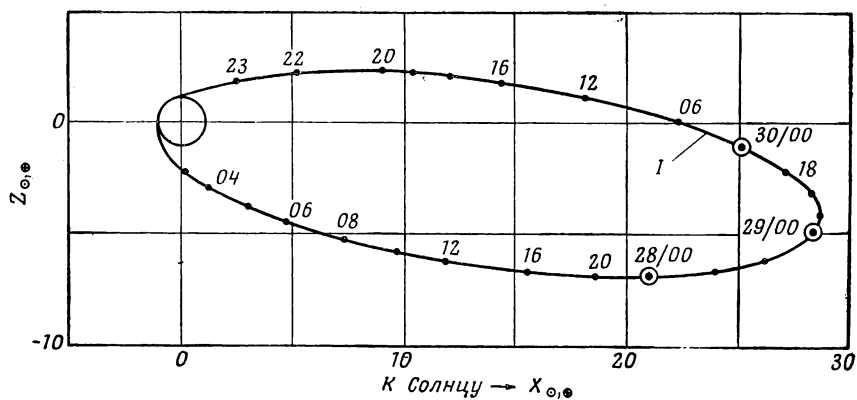


Рис. 8. Проекция траектории спутника «ИМП-1» на плоскость, перпендикулярную плоскости эклиптики. Расстояние в $R_{\oplus}$.

Свойства межпланетного магнитного поля

Рассмотрим данные о межпланетном магнитном поле, полученные на 11-м витке. Представленные на рис. 9 значения $\bar{F}$ — это средние из 12 измерений магнитного поля, сделанных в течение 5 мин. Каждая точка — это 5-минутное среднее значение. На графике $\bar{F}$ наносится от 0 до 20 γ , а θ от -90 до $+90^\circ$, причем $\theta=0^\circ$ соответствует плоскости эклиптики, ϕ соответствует 0 и 360° , если вектор направлен к Солнцу, и 180° , если вектор направлен от Солнца.

Хотя напряженность магнитного поля (которая 6 января 1964 г. составляла $\sim 4 \gamma$) меняется, но в общем она довольно постоянна. Угол θ в период измерений менялся от -10 до -40° .

Азимутальный угол ϕ сначала был приблизительно равен теоретическому углу спирали, соответствующему скорости солнечного ветра 400 км/сек. Затем угол претерпел ряд изменений, указывая, что вектор был направлен то к Солнцу, то от него. Но в общем наблюдается поразительное соответствие между изменением напряженности и направления поля. Поле меняется не произвольно, а имеет тонкую структуру со сравнительно устойчивой топологией.

Чтобы исследовать устойчивость магнитного поля в межпланетном пространстве и в переходной области, мы вычислили средние квадратичные отклонения солнечно-эклиптических составляющих за 5-минутные интервалы (см. рис. 9, внизу). Среднее квадратичное отклонение было очень малым: немного больше 0,25 γ , т. е. соответствовало чувствительности прибора. В общем оно было в пределах 0,25—0,40 γ .

Наблюдались случайные изменения поля межпланетного пространства, когда средние квадратичные отклонения были довольно велики. Из данных, представленных на рис. 9, не исключены всплески и шумы (ложные сигналы, связанные с телеметрической системой или с наземным цифровым устройством). Исключались лишь те случаи, когда наземная вычислительная установка могла однозначно определить, что измерение ошибочное. Мы не отбрасывали точки с большими средними квадратичными отклонениями. Однако я чувствую, что некоторые представленные здесь данные с большими средними квадратичными отклонениями — это помехи, поскольку в других случаях имеются указания на то, что они соответствуют реальным изменениям поля. Когда такие изменения поля обнаруживаются, они обычно длятся дольше 5 мин — интервала усреднения на рис. 9.

Данные 11-го витка представлены также на рис. 10. В начале суток напряженность поля все еще составляла 4—5 γ , позднее увеличилась до 6—7 γ , а затем слегка уменьшилась.

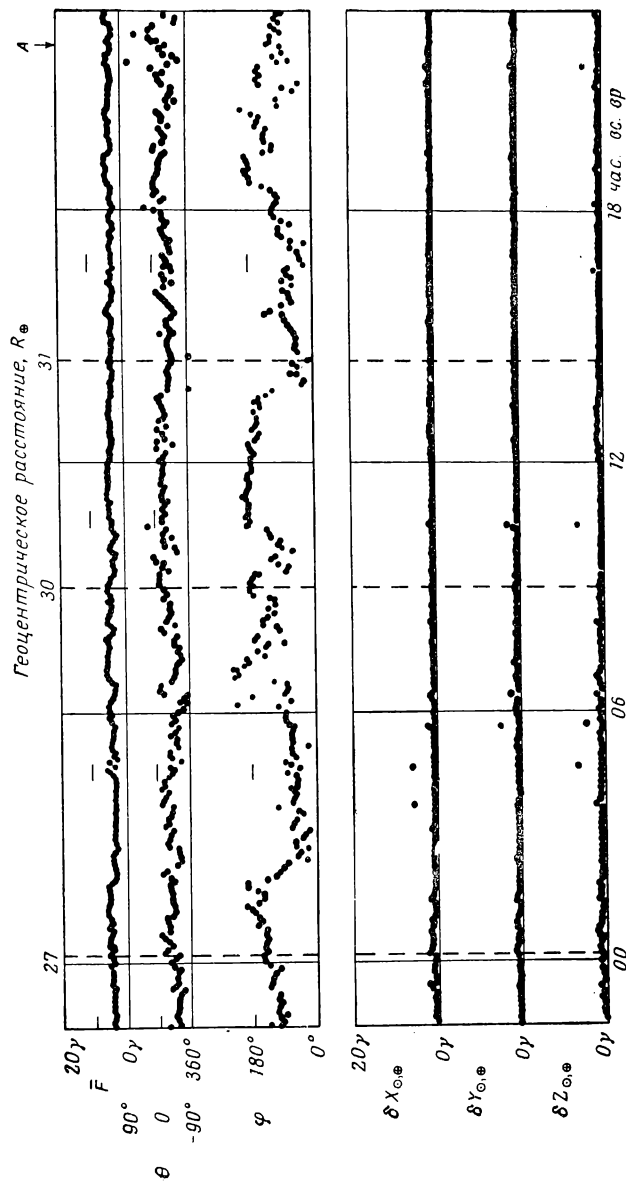


Рис. 9. Данные о магнитном поле, полученные на 11-м витке 6 января 1964 г. (каждая точка представляет 5-минутное среднее значение).

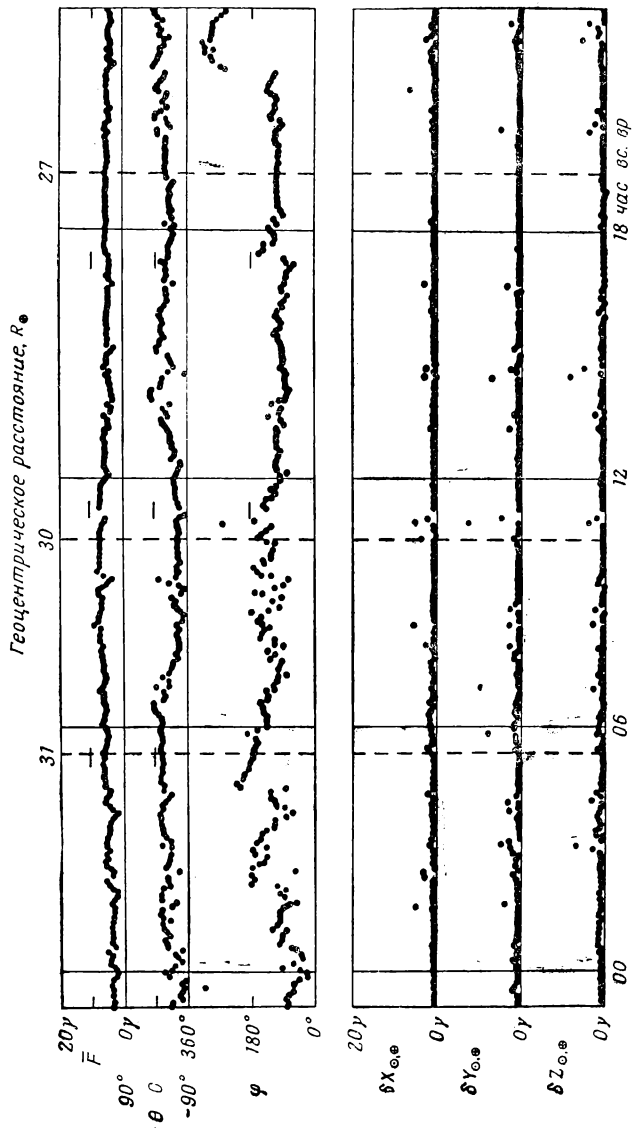


Рис. 10. Данные о магнитном поле, полученные на 11-м витке 7 января 1964 г.

Сначала угол θ был от -70 до -80° , а затем увеличился до -10 , -20 , или -40° . Угол φ первоначально соответствовал направлению вектора поля к Солнцу, затем вектор начал поворачиваться от Солнца и угол φ принял значение, предсказанное на основе теории Паркера [1], для скорости солнечного ветра ~ 400 км/сек.

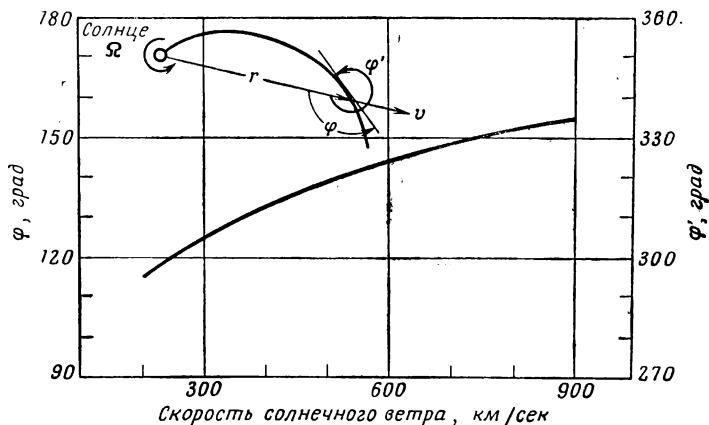


Рис. 11. Теоретический угол спирального магнитного поля в функции скорости солнечного ветра $\left(\varphi = 90^\circ \arctg \frac{v}{r} \Omega\right)$.

Средние квадратичные отклонения данных на рис. 10 очень малы, хотя иногда отмечались значительные средние отклонения разных составляющих одновременно. Кроме того, было замечено, что иногда, например около 11 час. 00 мин. вс. вр., напряженность поля не изменялась, хотя среднее квадратичное отклонение было большим.

Рассмотрим случай, наблюдавшийся около 22 час. 30 мин. вс. вр., когда поле было направлено под углом φ , соответствующим спирали, а затем внезапно изменило направление на противоположное: $\varphi' = \varphi + 180^\circ$. Такие случаи наблюдались неоднократно. Их можно объяснить проявлением волокнистой структуры межпланетного магнитного поля. Одновременно с внезапным изменением направления магнитного поля имеет место уменьшение напряженности поля.

Мы подробно изучили 5-минутные средние значения и обнаружили, что в некоторых случаях напряженность магнитного поля падала почти до 0,5 γ. По-видимому, в эти периоды спутник пересекал нейтральные поверхности, где магнитное поле стремится к нулю.

На рис. 11 показаны теоретические углы φ и φ' , которые вычисляются при условии аксиально симметричного и однородного течения солнечного ветра. Из рис. 11 следует важный вывод, что в общем углы φ и φ' относительно нечувствительны к скорости. Угол φ изменяется от 125 до 140° при соответствующем изменении скорости от 300 до 600 км/сек.

На рис. 12 представлены данные, полученные на 15-м витке. Поле было устойчивым и удерживалось на уровне $4-5 \gamma$, а в дальнейшем возросло до 6γ . В этом случае поле довольно долго лежало в плоскости эклиптики, а затем вектор магнитного поля начал опускаться под плоскость эклиптики. Поле было направлено радиально от Солнца, и его направление почти совпадало с теоретическим углом спирали в течение довольно длительного времени, хотя угол θ был отрицательным. Средние квадратичные отклонения были малы. На рис. 12 волокнистая структура магнитного поля не наблюдается.

Суммируя данные о межпланетных магнитных полях, я хочу сказать, что их можно интерпретировать на основе идей об однородно расширяющейся солнечной короне [1] и о дискретных источниках магнитного поля, которые расположены либо в фотосфере, либо высоко в солнечной короне [2]. Очевидно лишь то, что общая волокнистая структура свидетельствует в пользу непрерывного расширения солнечной короны и очень хорошо согласуется с теоретическими моделями. Мы не имели возможности исследовать структуру нейтральных поверхностей и определить, при помощи каких приборов, установленных на борту космического аппарата, можно их наблюдать.

Магнитные возмущения

Обратимся к той части данных, которые связаны с солнечно-земными преходящими явлениями. Крестиком около апогея на 2-м витке рис. 7 обозначено положение спутника в момент внезапного начала магнитной бури 2 декабря 1963 г. Большинство из нас хорошо знают, что последние несколько месяцев представляют очень спокойный период солнечного цикла. Тем не менее нам посчастливилось наблюдать эту магнитную бурю как раз тогда, когда спутник приближался к апогею. Если не учитывать, что спутник движется вместе с Землей по гелиоцентрической орбите со скоростью ~ 30 км/сек, то можно считать, что он был неподвижен в космическом пространстве, когда имела место буря.

На рис. 13 приведены нормальные магнитограммы, полученные на Земле 2 декабря. Одна из особенностей этой бури состоит

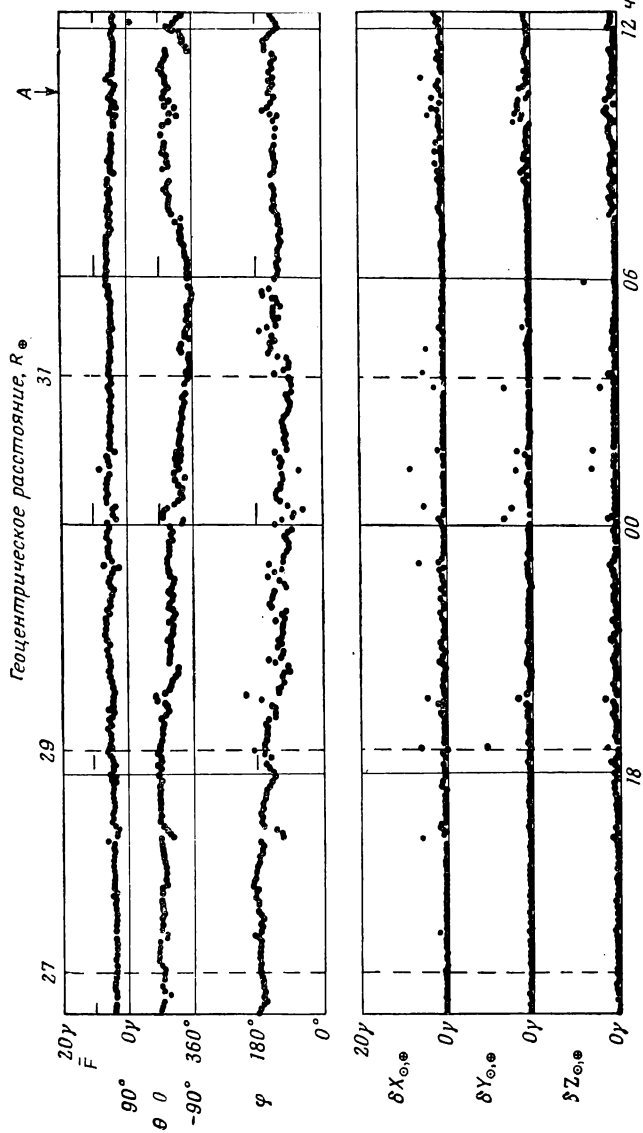


Рис. 12. Магнитное поле на 15-м витке 22 января 1964 г. (каждая точка представляет 5-минутное среднее значение).

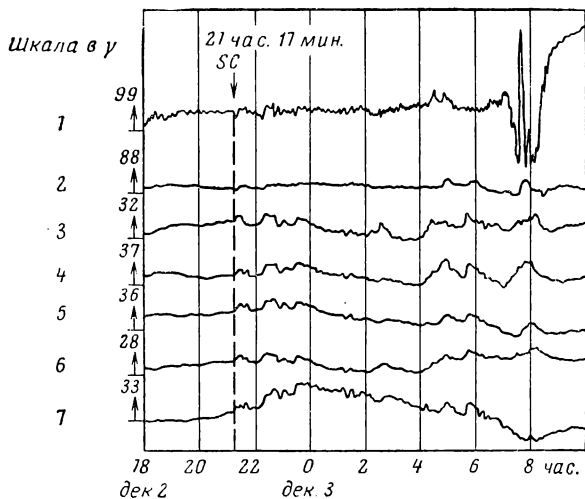


Рис. 13. Нормальные магнитограммы в период начала магнитной бури 2 декабря 1963 г.

1 — Колледж (Аляска), 2 — Ситка (Аляска), 3 — Фредериксберг (Виргиния), 4 — Тусон (Аризона), 5 — Гонолулу (Гавайи), 6 — Сан-Хуан (Пуэрто-Рико), 7 — Гуам (Марианские о-ва).

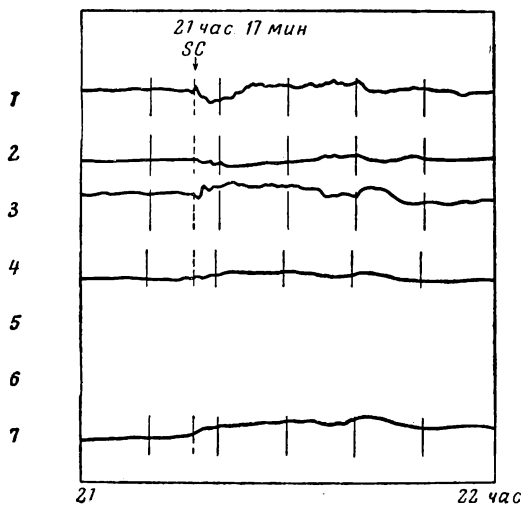


Рис. 14. Магнитограммы с быстрой записью за период 2 декабря 1963 г. (Обозначения те же, что на рис. 13.)

в том, что момент ее начала и характер этого начала были поразительно сходны на всех станциях. Момент начала магнитной бури — 21 час. 17 мин. вс. вр. — можно установить не только по стандартным магнитограммам наземных обсерваторий, расположенных по всему земному шару на различных широтах и долготах, но и на основе данных рис. 14, на котором представлены отдельные магнитограммы с быстрой записью.

На рис. 15 приведены данные о межпланетном магнитном поле с обычным 5-минутным усреднением до и после внезапного начала магнитной бури, отмеченного линией *SC*. В начале 2 декабря напряженность магнитного поля удерживалась примерно на уровне 7–8 γ , а затем увеличилась до 10 γ . В момент внезапного начала напряженность поля резко уменьшилась до 2–3 γ , потом она увеличилась до 10 γ , а затем последовало новое внезапное уменьшение до 2–3 γ . Начиная с этого момента, напряженность поля в общем увеличивалась и вернулась к своему прежнему уровню.

2 декабря магнитное поле было направлено к Солнцу, но обнаруживало значительные вариации. Среднее квадратичное отклонение также заметно увеличивалось с приближением бури, став равным 1, 2 или 3 γ для каждой составляющей.

На рис. 16 представлены данные о магнитном поле в системе координат, связанной со спутником. Здесь ψ — азимутальный угол, а $F_{\perp}$ и $F_{\parallel}$ определены ранее. Чтобы выявить момент, когда магнитная буря была зарегистрирована на спутнике, данные на рис. 16 показаны в большем масштабе по оси времени. Кружки и крестики представляют замеры магнитного поля феррозондовыми магнитометрами *A* и *B* длительностью 4,8 сек. Промежутки времени между точками 20 сек. Пробелы соответствуют передаче данных рубидиевого магнитометра, не использованных при построении рис. 16.

Угол ψ магнитного поля почти не менялся вплоть до ~21 час. 14 мин. вс. вр. Составляющая $F_{\perp}$ медленно уменьшалась, тогда как $F_{\parallel}$ была отрицательной и ее модуль постепенно увеличивался. Возмущение магнитного поля наиболее отчетливо проявляется в поведении ψ , менее четко в $F_{\perp}$ и очень мало сказывается на $F_{\parallel}$. Тем не менее момент начала отождествляется исключительно отчетливо.

Другая особенность, которую следует отметить, — это поведение магнитного поля. Оно изменяется таким образом, что составляющие $F_{\parallel}$ и $F_{\perp}$ одновременно проходят через нуль. Это не простая случайность. Таким образом, наблюдается другая нейтральная поверхность. Затем напряженность поля несколько увеличилась, вернулась к нулю (но не так отчетливо, как прежде) и, наконец, восстановилась.

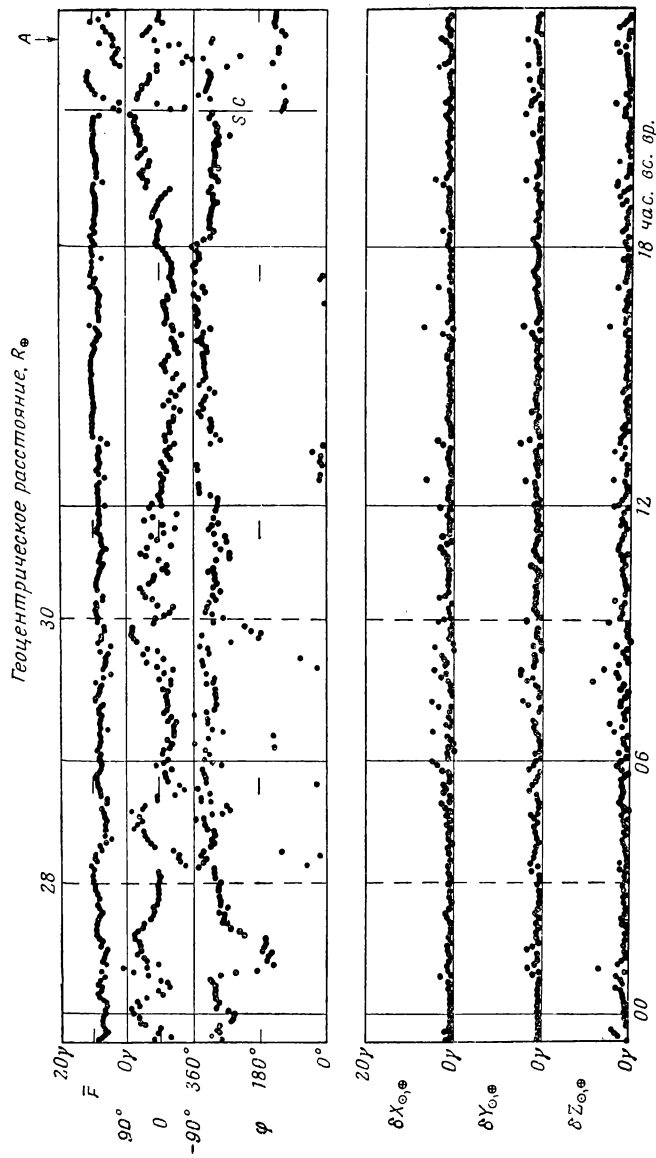


Рис. 15. Данные спутника «ИМП-1» по магнитному полю, полученные на 2-м витке и, показывающие начало магнитной бури 2 декабря 1963 г.

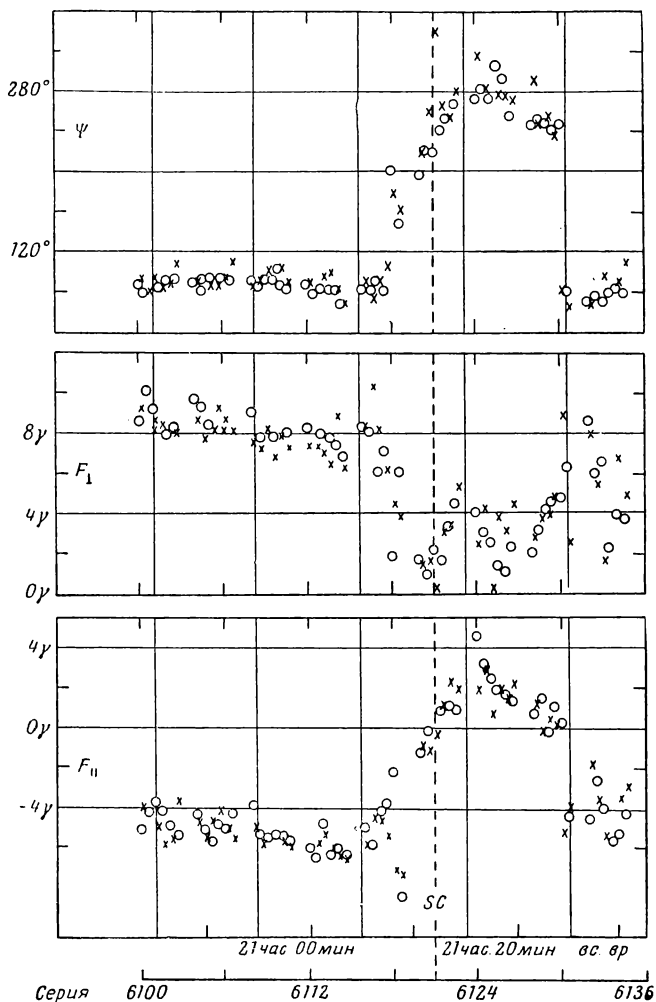


Рис. 16. Магнитное поле по данным спутника «ИМП-1» во время начала магнитной бури 2 декабря 1963 г. в системе координат, связанной со спутником, в увеличенном масштабе по оси времени.

Данные феррозондового магнитометра А обозначены кружками, магнитометра В — крестиками. Промежуток времени между отдельными замерами 20 сек.

Если принять 21 час. 14 мин. вс. вр. за момент регистрации спутником фронта магнитной бури, то длительность распространения этого фронта от спутника к Земле равна 3 мин. Если предположить, что фронт движется к Земле радиально от Солнца и если пренебречь вариациями скорости в переходной области и в магнитосфере, то скорость распространения первого возмущения равна ~ 700 км/сек. Эта скорость согласуется со значением энергии плазмы во время магнитных бурь, найденным на других спутниках. Кроме того, эта скорость согласуется с общим временем распространения магнитных возмущений, однозначно связанных со вспышками на Солнце, от Солнца к Земле. Необходимо лишь сделать предположение, что время прохождения действительно дает оценку скорости распространения.

Еще одна важная особенность — существование нейтральных поверхностей, связанных с фронтом магнитной бури. Напряженность магнитного поля была небольшой. Она увеличилась лишь до $\sim 10\gamma$. Сильного увеличения поля не удалось зарегистрировать, по крайней мере во временных масштабах, при которых производились измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Parker N., *Astrophys. J.*, **128**, 664 (1958).
2. Gold T., *Nuovo Cimento Suppl.*, **13**, Ser. 10, 318 (1959).
- 3*. Ness N. F., Searce C. S., Seek J. B., *J. Geophys. Res.*, **69**, № 17, 3531 (1964).
- 4*. Wilcox J. M., Ness N. F., *J. Geophys. Res.*, **70**, № 23, 5793 (1965).
- 5*. Ness N. F., Wilcox J. M., *Astrophys. J.*, **143**, № 1, 23 (1966).
- 6*. Ness N. F., *Space Science*, ed. Hess W. N., 1965, p. 321.
- 7*. Ness N. F., Searce C. S., Seek J. B., Wilcox J. M., *Space Research VI*, 1966.
- 8*. Wilcox J. M., Schatten K. H., Ness N. F., *J. Geophys. Res.*, **72**, № 1, 19 (1967).
- 9*. Дашевская Е. И., Козлов А. Н., *Геомагнетизм и аэрономия*, **3**, № 1, 171 (1963).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА НЕССА

Паркер. Верно ли, что магнитная буря 2 декабря связана с солнечной вспышкой, а не является рекуррентной бурей?

Несс. Нет. Эта буря, по-видимому, является пятой повторяющейся бурей. Ее связь с солнечной вспышкой неясна.

Бирман. Я не совсем понял, что вы сказали о волокнистой структуре магнитных полей, полученной на основе ваших измерений.

Несс. Полное объяснение этого вопроса требует больше статистических данных. Однако данные указывают на то, что наблюдались противоположно направленные магнитные поля. Время, необходимое для изменения направления поля на противоположное и обратно, составляет иногда 1—2 час, а иногда 12 или даже 22 час. Временная шкала довольно изменчива. Что касается протяженности, то в настоящее время мы можем говорить лишь о толщине фронта магнитной бури 2 декабря. Если принять скорость распространения равной 700 км/сек и учесть время, прошедшее от начала бури до мо-

мента восстановления угла ψ , то найдем, что толщина фронта магнитной бури $\sim 0,005$ а. е. К сожалению, эта оценка сделана независимо от данных по плазме.

Мид. Изучая широтное распределение поля в любой сферической системе координат, вы, по-видимому, найдете, что поле имеет тенденцию концентрироваться у экватора, причем такое распределение характеризуется величиной $\cos \theta$. Вероятность того, что $\theta = 90^\circ$, равна 0. Распределение ваших данных, по-видимому, имеет такой же характер, хотя углы θ преимущественно отрицательные. Хотелось бы видеть широтное распределение, исправленное на множитель $\cos \theta$.

Несс. Мне кажется, эта задача является статистической. Мы хотим работать с реальным физическим полем, а не с полем, построенным на основе временного усреднения составляющих поля. Чтобы определить преимущественное направление поля, можно построить гистограммы. Например, можно разделить сферу на 10- или 20-градусные зоны и определить угол в пределах, скажем, 1—3 час.

Представленные нами данные показывают, что углы θ преимущественно отрицательны. Мы пока еще не знаем, какова связь между направлением поля относительно плоскости эклиптики и углом ϕ относительно направления на Солнце.

Данжи. Существует ли связь между вашими данными и данными Клайна¹⁾? Что происходило с магнитным полем, когда он наблюдал электроны?

Несс. Не знаю.

Колеман. Вы говорили, что спокойные, устойчивые поля были единственными в своем роде по сравнению с данными других экспериментов. Мне хотелось бы отметить, что устойчивые поля нередко наблюдались как на «Маринере-2», так и на «Пионере-5». Довольно часто поля, наблюдаемые на «Маринере-2», оставались в пределах ~ 1 у, а на «Пионере-5» в течение многих сеансов поля также лишь слегка отличались от этого значения.

Несс. Мы впервые наблюдали, чтобы условия в космическом пространстве оставались неизменными от 6 час до нескольких дней.

Смит. Интересно сравнить результаты «Маринера-2» и «ИМП-1». Тогда мы смогли бы лучше представить себе межпланетные поля.

Несс. Судя по опубликованным и представленным здесь данным, конфигурация поля, наблюдавшаяся на «ИМП-1», поразительно устойчива по сравнению с конфигурацией поля, зарегистрированной «Маринером-2». В конце концов у нас накопится статистический материал за более длительный период, и мы сможем сравнить данные. Но, как мне кажется, состояние межпланетной среды в то время и в настоящий период существенно отличается.

Смит. В период полета «Маринера-2» мы наблюдали за 4 месяца десятков магнитных бурь. Сколько магнитных бурь вам удалось до сих пор зарегистрировать на «ИМП-1»?

Несс. Мы зарегистрировали лишь одну. В течение 4 месяцев с момента запуска спутника всего было 3 магнитных бури.

Смит. Кроме того, мы наблюдали несколько достаточно больших и несколько малых бурь. Значения индекса K_p геомагнитной активности во время магнитных бурь, зарегистрированных «ИМП-1», показывают, что они были довольно слабыми. Условия в период полета «Маринера-2», как мне кажется, были значительно более изменчивыми. На «Маринере-2» мы наблюдали несколько магнитных бурь, в период которых напряженность межпланетного магнитного поля возрастала на порядок от типичного значения 5 до ~ 50 у.

Несс. По-видимому, можно сделать вывод, что либо межпланетная среда сильно изменилась, либо результаты несравнимы по другим причинам.

¹⁾ См. гл. 5.

Смит. Но изменяется лишь напряженность. В ваших данных за сутки не обнаруживается спиральности поля. Это справедливо и для данных «Маринера-2». Лишь при усреднении за несколько дней начинает просматриваться устойчивое направление магнитного поля в космическом пространстве, которое достаточно хорошо соответствует теоретическому углу спирали.

Следует ли из ваших данных, что межпланетные магнитные поля имеют некоторую предпочтительную ориентацию? Каково направление межпланетных магнитных полей по результатам «ИМП-1»?

Несс. Первая характерная особенность — волокнистая структура, магнитные силовые линии которой располагаются либо вдоль теоретической спирали, либо в противоположном направлении. Другая особенность состоит в том, что магнитное поле направлено от Солнца в течение довольно длительного периода, а это совместно лишь с бесконечной скоростью солнечного ветра.

Смит. Мы тоже наблюдали это. Если усреднить ваши данные, полученные примерно за 15 витков, то не обнаружится ли межпланетного магнитного поля в плоскости эклиптики?

Несс. Нет, не думаю. Поскольку рассмотрение чисто качественное, то, на мой взгляд, изученные до сих пор данные указывают на существование преобладающего значения угла θ .

Голд. Я не согласен, что можно определить конфигурацию магнитного поля на основе течения плазмы. Несс сказал, что наблюдавшуюся им иногда конфигурацию поля можно объяснить лишь бесконечной скоростью. Это уж очень наивная интерпретация, не соответствующая действительности. Истечение плазмы с поверхности Солнца, где имеют место разнообразные направления поля, приведет к тому, что в космическое пространство будут уноситься магнитные поля любых направлений. Характер межпланетного магнитного поля прежде всего зависит от поля, которое существует в окрестностях Солнца. Если магнитное поле около Солнца имело хаотическую составляющую, то при переносе полей на большие расстояния от Солнца эта составляющая сохраняется. Такие конфигурации поля совместимы с любой скоростью солнечного ветра.

Я согласен, что «статистически» поле должно иметь форму струи из садового шланга. Однако нельзя однозначно определить скорость из магнитных данных. Вероятно, на основе довольно большого статистического материала можно определить среднюю скорость. Но это весьма сомнительная процедура, поскольку если средняя скорость изменяется в широких пределах, то вы получите не очень хороший результат.

Несс. Я не уверен, что понимаю суть наших разногласий.

Голд. Я не согласен с вами лишь относительно бесконечной скорости.

Несс. Это было шутливое заявление. Угол спирали вообще не является достаточно хорошей мерой скорости. Я согласен с вами, что мы наблюдаем именно структуру среды, а не волны.

Голд. Постоянство напряженности магнитного поля в сочетании с сильной изменчивостью направления, следующие из ваших наблюдений, несомненно, служат признаком структуры потока, в котором магнитное давление преобладает над газовым, над давлением, связанным с турбулентностью, и над другими силами в системе координат, связанной с газом.

Несс. Такая модель не действительна, хотя она может быть справедлива при измеренных вами температурах и полях?

Нейгебауэр. Статическое и магнитное давления сравнимы. Однако нас интересует влияние α -частиц, а также насколько точно известно тепловое уширение спектра плазмы. Не очень ясно, каковы термические условия и как температура газа сравнивается с турбулентным давлением.

Бридж. Если поля противоположного знака исходят из ограниченных областей и этот процесс длится довольно долго, то чем будет отличаться этот результат от стационарной модели Паркера.

Голд. В модели Паркера вектор скорости направлен по радиусу от Солнца. Истечение газа уносит солнечные магнитные поля, траектория движения которых напоминает дорожку на грампластинке.

Согласно моей модели, в окрестностях Солнца существует магнитное поле сложной формы. Поток газа уносит эти поля в космическое пространство и придает им некоторую структуру. Эта модель не может привести к устойчивой картине, поскольку все новые силовые линии уносятся от Солнца. В модели Паркера новые магнитные силовые линии не «вытягиваются» из Солнца, поэтому нет нужды в отсечении силовых линий, и при этом допускается существование устойчивой конфигурации.

Согласно моей модели, напряженность поля на полюсах Солнца увеличивается всякий раз, когда имеет место выброс на Солнце, так что необходим механизм отсечения силовых линий. Это означает, что должна существовать диссипация в межпланетном газе. Я предположил, что она связана с нейтральными плоскостями, которые непременно образуются при этом. Магнитные силовые линии отсекаются и образуют отдельные облака, которые улетают прочь, а силовые линии возвращаются обратно, чтобы напряженность поля на полюсе Солнца не увеличивалась неограниченно. Важным обстоятельством я считаю то, что наблюдаются все направления поля и сильная тенденция к существованию нейтральных слоев, что, как мне кажется, соответствует этой модели.

Паркер. Объясняя перемещение межпланетного Сирано де Бержерака, нос которого (магнитный язык) опережает его на четверть часа, Голд правильно изложил свойства конфигурации в соответствии с моей моделью. Но он не заметил того, что его модель имеет в основном те же характерные особенности. В моей модели, согласно которой магнитные силовые линии описывают спирали Архимеда, не делалось попыток ставить стрелки на силовых линиях. Обычно магнитные силовые линии направлены к Солнцу и от него. Волокна с меняющимся направлением являются внутренним свойством как моей модели, так и модели Голда с той лишь разницей, что в моей модели не приходится заниматься проблемой непрерывного отсечения довольно протяженных полей.

Голд. Как в вашей модели может возникнуть нормальное к плоскости эклиптики поле?

Паркер. Ваша модификация моей модели была выведена для идеализированного случая совершенно однородного радиального ветра. Как только происходят какие-либо вариации в солнечном ветре (а они предсказывались и в настоящее время измерены), то наблюдаются флуктуации в любом направлении.

Я думаю, что ваше замечание о магнитном и газовом давлениях недостаточно обосновано теоретически. Вам следует прежде разработать динамику этой модели.

Дэвис. Независимо от положения нулевого уровня в магнитных данных «Маринера-2» нельзя игнорировать наблюдающуюся структуру магнитного поля, которая повторяется каждые 27 суток. Можно изменить характер этой повторяемости, но нельзя избавиться от нее. По-видимому, на Солнце имеется образование, существующее по крайней мере в течение месяца. Эта повторяемость, вероятно, не имеет ничего общего с предположением Голда, если не допустить, что на Солнце в течение года существовало образование, связанное с межпланетным магнитным полем.

Бридж. Здесь говорили, что на «Маринере-2» наблюдалось несколько магнитных бурь, которые постепенно увеличивали энергию в течение довольно длительного времени после начала бури. Такое поведение наблюдается у всех магнитных бурь?

Нейгебауэр. Да. В каждом случае скорость достигала своего максимального значения через 1—2 дня. Однако мы не наблюдали головную часть

этих потоков; они догоняли нас, поскольку двигались относительно оси Солнца значительно быстрее, чем космический аппарат. Я не уверена, что мы наблюдали плазму, связанную с внезапным выбросом на Солнце или с солнечной вспышкой.

Бридж. Это очень важно, что наблюдаемая энергия плазмы медленно увеличивается поперек границы потока, который дает внезапное начало. Для таких умеренных явлений вряд ли можно ожидать большой азимутальной протяженности областей, связанных с магнитными бутылками Голда, даже если его модель справедлива для явлений с более высокими энергиями. Я полагаю, что в большинстве случаев можно получить волокнистую структуру на основе модели Паркера.

Несс. Вы совершенно правы в том, что характеристики направленности структуры поля определяются вращением Солнца. И все, что мы наблюдаем в межпланетном пространстве, является отражением этого факта.

Люст. Поскольку в период полета «Маринера-2», по-видимому, наблюдались 27-дневные вариации структуры магнитного поля, которая может оказаться в противоречии с измерениями «ИМП-1», я не думаю, что можно сразу же отказаться либо от модели Паркера, либо от модели Голда.

Смит. Насколько я понимаю, спиральная конфигурация поля образуется при условии, что магнитные силовые линии прикреплены к вращающемуся Солнцу. Если допустить, что иногда поле уносится более интенсивно, то магнитные данные «Маринера-2», полученные за 110 дней, подтверждают представление об извивающихся спиралях, т. е. о спиральных силовых линиях с накладывающимися на них мелкомасштабными неоднородностями.

Голд. Разве магнитное поле по данным «Маринера-2» всегда было направлено от Солнца?

Смит. Нет. Но направление крупномасштабного поля, по-видимому, было постоянным в течение солнечного оборота на большом расстоянии. В меньших масштабах наблюдаются, по-видимому, нулевые точки в поле и изменение направления, связанное с иррегулярностями.

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ,
СВЯЗАННЫЕ С ПРОБЛЕМОЙ
СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ¹⁾

Дж. Д. Уиндхэм

Это сообщение о применении радиоастрономических методов к исследованию межпланетной среды основывается главным образом на недавно опубликованной статье Хьюиша и Уиндхэма [1]²⁾. В настоящее время эти методы позволяют проводить исследования многих особенностей солнечной короны и межпланетного пространства. Мы можем изучать радиальные изменения электронной концентрации, установить предельные размеры неоднородностей в короне (флуктуации электронной концентрации), среднее направление магнитного поля в короне.

Методика наблюдений

Этот метод основан на приеме радиоизлучения удаленных источников, проходящего через солнечную корону³⁾. Радиоволны этих источников преломляются на неоднородностях электронной концентрации, что приводит к кажущемуся увеличению угловых размеров источника. Угловые размеры рассеянного радиоизображения (которое определяется как распределение яркости, когда радиоизлучение точечного источника проходит через солнечную корону) можно измерять при различных относительных положениях Солнца и источника при помощи

¹⁾ Уиндхэм не упоминает ни одной работы советских ученых, хотя успехи наших ученых в исследовании сверхкороны и межпланетной плазмы радиоастрономическими методами общеизвестны. В частности, исследования проводятся В. В. Виткевичем и др. в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР. Укажем лишь некоторые последние работы [11*—15*], где можно найти ссылки на более ранние публикации. — *Прим. ред.*

²⁾ См. также одну из последних работ Хьюиша и Деннисона [16*], где сообщается об измерениях солнечного ветра и мелкомасштабной структуры межпланетной среды на основе наблюдения мерцания источника 3С 48. — *Прим. перев.*

³⁾ Так называемый метод просвечивания. — *Прим. ред.*

радиоинтерферометра. Эффект размывания радиоизображения наиболее четко выражен в метровом диапазоне. Для обнаружения слабого рассеяния (с угловым размером около нескольких минут) на больших угловых расстояниях от Солнца в этом диапазоне необходимо, чтобы база интерферометра составляла несколько километров. Используя этот метод, удалось зарегистрировать рассеяние вплоть до расстояний порядка $100 R_{\odot}$, так что

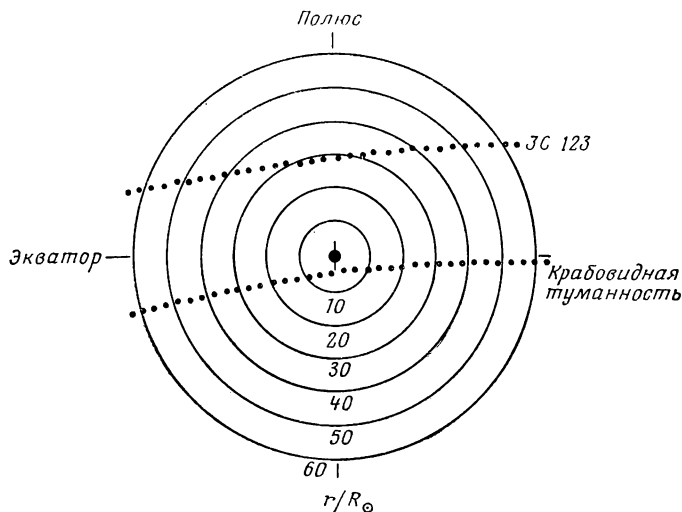


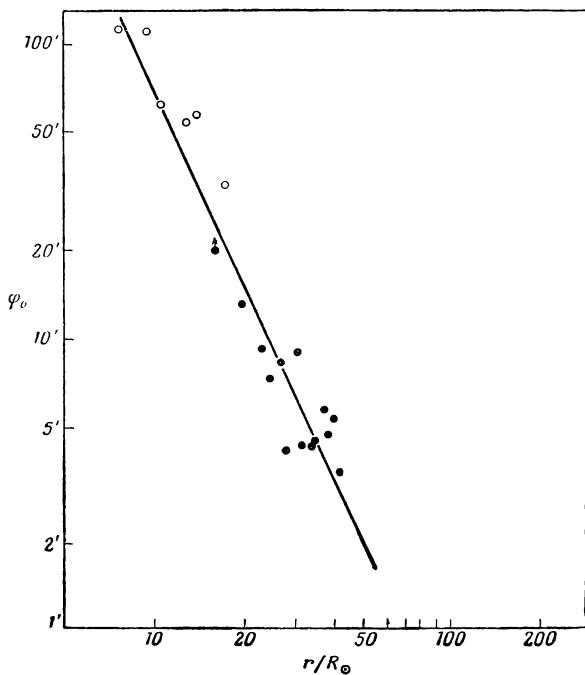
Рис. 1. Положения Крабовидной туманности и квазизвездного источника ЗС 123 относительно Солнца в 1962 г.

фактически исследуется межпланетная среда. Рассеяние радиоволн на таких расстояниях наблюдал также Сли [2].

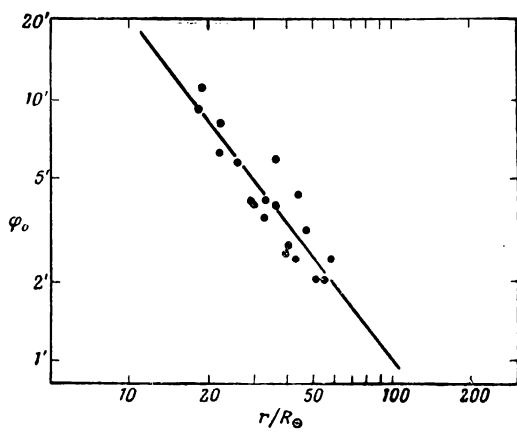
На рис. 1 показано движение двух радиоисточников относительно Солнца. Один из них — хорошо известный радиоисточник Крабовидная туманность, видимый путь которого проходит через экваториальные области Солнца. Квазизвездный источник ЗС123 позволяет сканировать полярные области Солнца на расстоянии $\sim 30 R_{\odot}$. Мы рассмотрим главным образом результаты, полученные при наблюдении Крабовидной туманности, т. е. относящиеся к экваториальным областям Солнца.

Изменение угла рассеяния с расстоянием от Солнца

На рис. 2 представлено изменение угловых размеров радиоизображения с расстоянием в 1959 г. φ_0 — угловая полуширина (на уровне $1/e$) радиоизображения в направлении, перпендику-



Р и с. 2. Угловое рассеяние на частотах 38 (черные кружки) и 178 *МГц* (светлые кружки) в 1959 г.; $\alpha = -2,24 \pm 0,15$.



Р и с. 3. Изменение углового рассеяния с расстоянием от Солнца на частоте 38 *МГц* в 1960 г.; $\alpha = -1,3 \pm 0,15$.

лярном радиусу-вектору от Солнца. Как будет показано позднее, именно в этом направлении рассеяние максимально. Мы наблюдали радиоизлучение Крабовидной туманности на частотах 38 и 178 *Мгц*. Точки, соответствующие 178 *Мгц*, были пересчитаны на 38 *Мгц* в соответствии с законом $\varphi_0 \sim (\text{Длина волны})^2$, как показал Хьюиш [3]. Если предположить, что φ_0 изменяется по закону радиальное расстояние в степени x , то точкам лучше всего соответствует прямая при $x = -2,24$.

Аналогичные наблюдения, выполненные в 1960—1962 гг., представлены на рис. 3—5. Точки, соответствующие 26,3 *Мгц*, на рис. 4 были приведены к частоте 38 *Мгц*. На рис. 5 φ_0 — угловые размеры рассеянного изображения в направлении восток — запад. Эти наблюдения дают менее крутое изменение размеров рассеянного изображения с расстоянием от Солнца при среднем значении x примерно $-1,4$.

Магнитные поля

Рассеяние радиоволн анизотропно. Наблюдения на трехбазовом интерферометре позволяют определить эллипс рассеяния. Такая форма рассеянного радиоизображения указывает на существование неоднородностей в виде волокон, которые рассеивают радиоволны преимущественно в направлении, перпендикулярном их длине. Наблюдая источник по мере его движения относительно Солнца, получаем ряд эллипсов, малая ось которых указывает среднее направление волокон.

На рис. 6 представлены средние направления волокон в 1958 [4], 1959 [5] и 1960 гг.¹⁾, полученные по наблюдениям Крабовидной туманности. Наблюдается преимущественно радиальное направление от Солнца, особенно вблизи экваториальной плоскости.

Волокнистые неоднородности поддерживаются магнитным полем, и их направление также характеризует среднее направление магнитного поля в короне. Это дает нам независимое доказательство радиальности магнитного поля, хотя магнитные силовые линии могут изгибаться в экваториальной плоскости.

Широтные эффекты

Два источника (3С 123 и Крабовидная туманность) дают возможность просвечивать различные области короны и

¹⁾ Наблюдения сверхкороны Солнца в 1964—1965 гг. и характера рассеивающих неоднородностей в сверхкороне проводились В. Ф. Бедевкиным и В. В. Виткевичем [13*]. — *Прим. перев.*

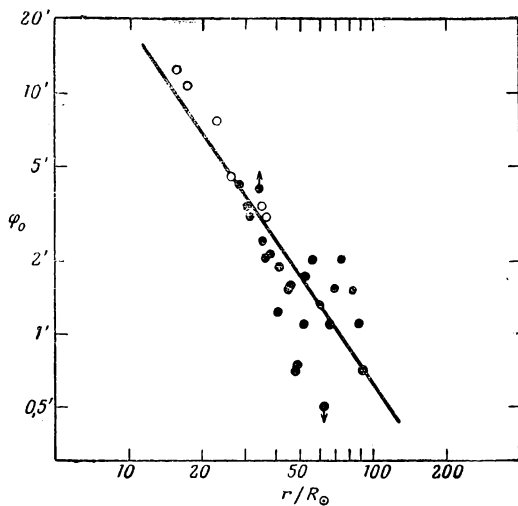


Рис. 4. Изменение рассеяния с расстоянием от Солнца на частотах 38 (светлые кружки) и 26,3 МГц (черные кружки) в 1961 г.; $\alpha = -1,46 \pm 0,17$.

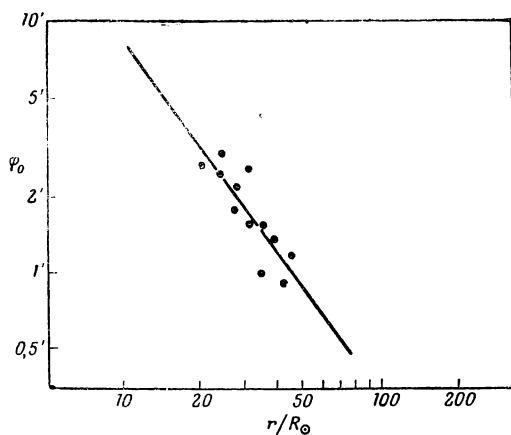


Рис. 5. Изменение рассеяния с расстоянием от Солнца на частоте 38 МГц в 1962 г.; $\alpha = -1,41 \pm 0,27$.

позволяют провести сравнение полярных и экваториальных областей. Изменение угла рассеяния φ_0 в зависимости от гелиографической широты представлено на рис. 7. Графики зависимости угла рассеяния в виде полярной диаграммы для трех расстояний

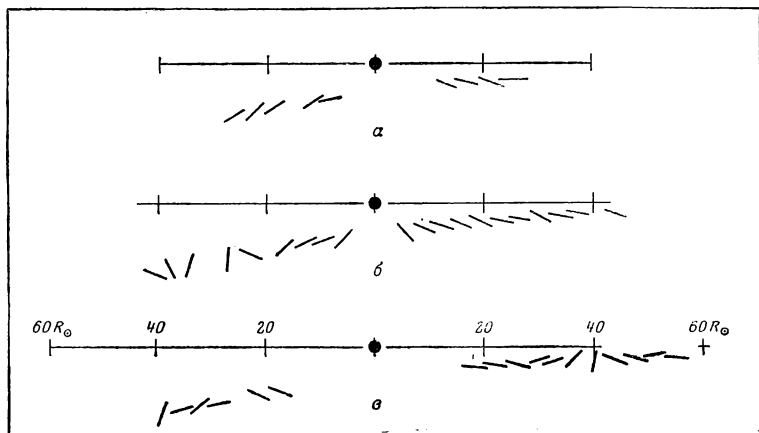


Рис. 6. Среднее направление корональных волокон; *a* — по измерениям Хегбома [4], *б* — по измерениям Горголевского и Хьюиша [5], *в* — по измерениям Хьюиша и Уиндхэма.

приведены на рис. 7, *a*. На рис. 7, *б* показана изолиния постоянного угла рассеяния ($\varphi_0 = 1', 8$). Рассеяние наиболее четко выражено в области около экватора. Это указывает либо на более высокую концентрацию волокон, либо на более высокую электронную концентрацию.

Эффекты цикла солнечной активности

Интенсивность рассеяния радиоволн заметно изменяется в зависимости от фазы солнечного цикла. Эти изменения представлены на рис. 8. Этот эффект наблюдается вплоть до $40R_\odot$. Наибольшее рассеяние наблюдается в период максимума пятнообразовательной активности Солнца, а по мере приближения к минимуму пятнообразовательной активности рассеяние уменьшается.

Верхний предел размеров неоднородностей

Исходя из теории Чандрасекхара [6], можно показать, что распределение радиоизлучения в изображении точечного источника, просвечиваемого сквозь солнечную корону, не является

гладким. Оно содержит флуктуации интенсивности с размерами, сравнимыми с размерами неоднородностей в короне. В этом случае действует механизм многократного рассеяния и $\varphi_0 \sim$

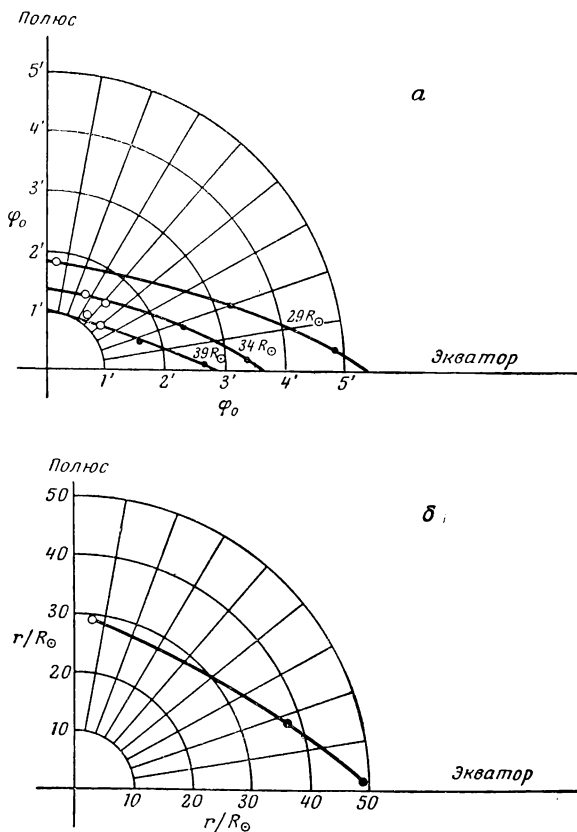


Рис. 7. *а* — полярная диаграмма углов рассеяния на трех радиальных расстояниях; *б* — изолинии постоянного угла рассеяния ($\varphi_0 = 1', 8$). Светлые кружки — по наблюдениям 3C 123, черные кружки — по наблюдениям Крабовидной туманности.

$\sim$ (Длина волны)². Любое наблюдаемое значение φ_0 непосредственно дает верхний предел угловых размеров неоднородностей.

Наименьший угол рассеяния был измерен Сли [2] на интерферометре с базисом восток—запад длиной 10 км на частоте 85,5 МГц. По наблюдениям источника 3C 273 он измерил $\varphi_0 = 6''$ на расстоянии $65R_\odot$. Сравнение этого значения с полученными нами результатами для того же периода на частоте 38 МГц

показывает, что угол рассеяния действительно зависит от квадрата длины волны. Следовательно, угловые размеры неоднородностей меньше $6''$. На расстоянии Солнца это соответствует $5 \cdot 10^3$ км, что является верхним пределом поперечного размера волокна. Если экстраполировать эти размеры на поверхность

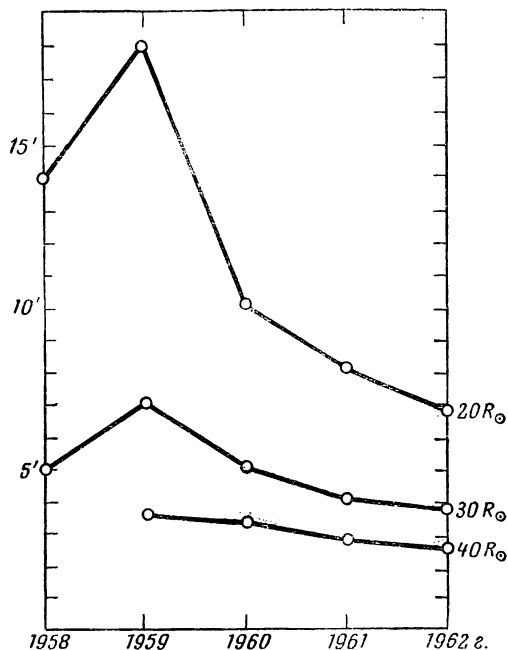


Рис. 8. Изменение угла рассеяния $\phi_{0 \max}$ в зависимости от фазы солнечного цикла.

Солнца, предполагая, что поперечные размеры пропорциональны радиальному расстоянию, то обнаружим, что размеры этих волокон ~ 100 км, т. е. по порядку величины они соответствуют размерам фотосферных гранул и хромосферных спикул. Наши наблюдения указывают на то, что тонкая структура, которую мы наблюдаем на Солнце, простирается далеко в корону.

Модель солнечной короны

В нашей модели корона рассматривается как скопление волокон. В экваториальной плоскости (рис. 9, б) волокна направлены по радиусу от Солнца, причем поперечный размер пропорционален радиальному расстоянию. Можно показать, что в пре-

делах расстояний, на которых проводились наблюдения ($20-80 R_{\odot}$), кривизна волокон в экваториальной плоскости не оказывает воздействия. Мы допустили, что в плоскости, перпендикулярной плоскости экватора (рис. 9, а), возможно искривление линий тока, причем поперечные размеры волокон

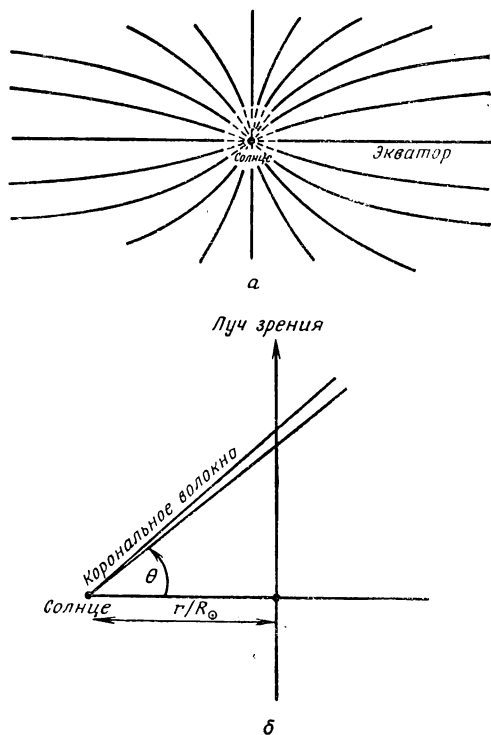


Рис. 9 а — модель истечения, ограниченного по широте; вид из экваториальной плоскости. б — геометрия модели рассеяния; вид из точки над северным полюсом.

изменяются с расстоянием по степенному закону, где показатель степени α лежит в пределах от 0 до 1. При $\alpha=1$ корона сферически симметрична, тогда как при $\alpha=0$ она имеет форму диска, лежащего в экваториальной плоскости.

Предполагая, что уравнение непрерывности справедливо для течения вдоль волокна, мы рассчитали радиальный закон изменения угла рассеяния для ряда моделей. В этих моделях скорость истечения плазмы изменяется от значений, соответствующих быстрому солнечному ветру [7], до значений,

соответствующих спокойному расширению, при котором происходит диссипация вещества с поверхности Солнца [8]¹⁾. Для случая солнечного ветра предполагается, что скорость постоянна за пределами $20 R_{\odot}$, т. е. там, где начинаются наши наблюдения.

На рис. 10 представлены некоторые результаты. Заштрихованная область показывает пределы изменения величины x для

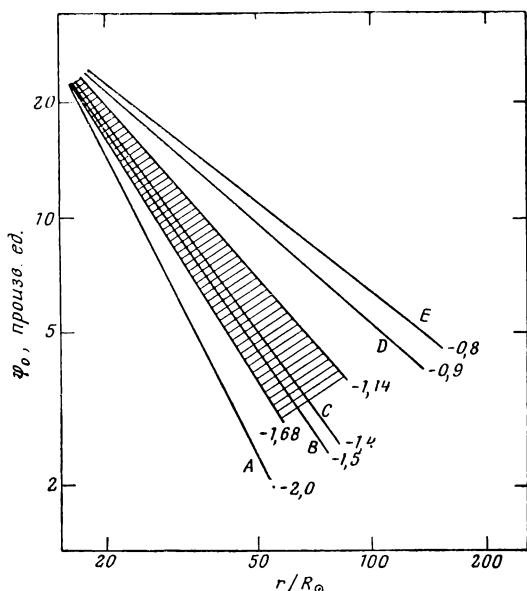


Рис. 10. Изменение рассеяния с расстоянием для нескольких теоретических моделей, сравнимых с наблюдениями.

A — Паркер, $\alpha=1$; B — Чемберлен, $\alpha=1$; C — Паркер, $\alpha=0,7$; D — Чемберлен, $\alpha=0,7$; E — Паркер, $\alpha=0,4$.

модели, согласующейся с наблюдениями, выполненными в 1960—1962 гг. (см. рис. 3—5). Приведены также некоторые теоретические модели. Ясно, что сферически симметричное истечение согласно Чемберлену ($\alpha=1$, модель B) и ограниченный по широте солнечный ветер ($\alpha=0,7$, модель C) находятся в согласии с наблюдениями. Сферически симметричный солнечный ветер (модель A) не согласуется с нашими результатами, полученными для промежуточной фазы солнечного цикла. Более крутой наклон в 1959 г. около максимума солнечной активности (см.

¹⁾ Вопросы, связанные с моделью короны и солнечного ветра, освещены подробно в гл. 13. — *Прим. ред.*

рис. 2) указывает на то, что справедливо представление о сферически симметричном солнечном ветре.

Используя нашу модель и данные об изменении рассеяния с расстоянием для периода 1960—1962 гг., мы рассчитали область, в пределах которой справедлив закон изменения электронной концентрации с гелиоцентрическим расстоянием. На

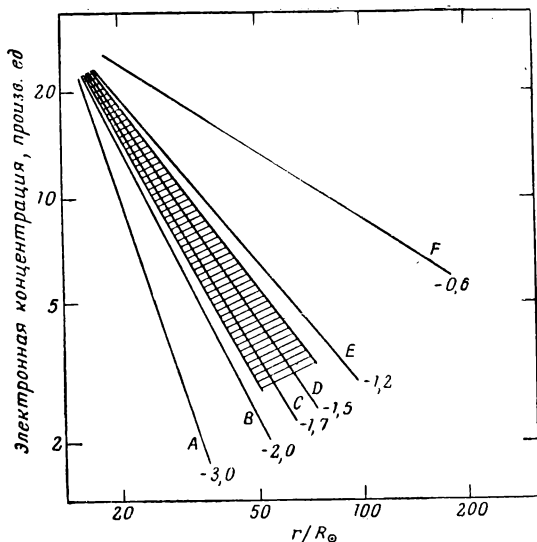


Рис. 11. Изменение электронной концентрации с расстоянием (в произвольных единицах) для различных моделей короны.

A — Ингхэм [9]; B — Паркер, $\alpha=1$; C — Паркер, $\alpha=0,7$; D — Чемберлен, $\alpha=1$; E — Чемберлен, $\alpha=0,7$; F — Чепмен [10], $T_0=10^6$ °K.

рис. 11 эти пределы показаны заштрихованной областью; приведены другие модели изменения электронной концентрации. Поскольку существование устойчивого солнечного ветра достаточно надежно подтверждено измерениями на космических аппаратах, эти результаты указывают на то, что концентрация изменяется с расстоянием по закону $r^{-1,7}$ от 20 до 80 $R_\odot$ и, вероятно, за пределами этого расстояния (модель C).

ЛИТЕРАТУРА

1. Hewish A., Wyndham J. D., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **126**, 469 (1963).
2. Slee O. B., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **123**, 223 (1961).
3. Hewish A., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **118**, 534 (1958).
4. Högbom J. A., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **120**, 530 (1960).
5. Gorgolewski S., Hewish A., Observatory, **80**, 99 (1960).

6. Chandrasekhar S., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **112**, 475 (1952).
7. Parker E. N., Astrophys. J., **132**, 821 (1960).
8. Chamberlain J. W., Astrophys. J., **133**, 675 (1961).
9. Ingham M. F., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **122**, 157 (1961).
10. Chapman S., Zirin H., Smithsonian Contr. Astrophys., **2**, № 1, 1 (1957).
- 11*. Виткевич В. В., Труды Физ. инст. АН СССР, М., изд-во «Наука», **38**, 80 (1967).
- 12*. Антонова Т. Д., Виткевич В. В., Власов В. И., Труды Физ. инст. АН СССР, М., изд-во «Наука», **38**, 88 (1967).
- 13*. Бедевкин В. Ф., Виткевич В. В., Труды Физ. инст. АН СССР, М., изд-во «Наука», **38**, 96 (1967).
- 14*. Шишов В. И., Труды Физ. инст. АН СССР, М., изд-во «Наука», **38**, 170 (1967).
- 15*. Виткевич В. В., Антонова Т. Д., Власов В. И., Докл. АН СССР, сер. Математика, физика, **168**, № 1—3, 55 (1966).
- 16*. Hewish A., Dennison P. A., J. Geophys. Res., **72**, № 7, 1977 (1967).
- 17*. Little L. P., Hewish A., Denisson P. A., Planetary Space Sci., **14**, 1221 (1966).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА УИНДХЭМА

Люст. Нельзя ли определить абсолютное изменение концентрации, задавшись размерами неоднородностей, которые в соответствии с вашими данными составляют $5 \cdot 10^3$ км?

Уиндхэм. Нет, поскольку нужно знать количество неоднородностей, через которое проходит радионизлучение.

Люст. А если вы сделаете некоторые предположения относительно числа неоднородностей?

Уиндхэм. Возможны два случая: волокна расположены близко друг к другу, либо на больших расстояниях друг от друга. Эти два случая дают сильно различающиеся вариации электронной конфигурации и средние значения концентрации.

Чтобы получить предельные значения электронной концентрации, мы сделали несколько расчетов в предположении, что луч зрения проходит либо через плотноупакованные волокна, либо через небольшое число волокон. На расстоянии $20 R_{\odot}$ в предположении, что размеры неоднородности $5 \cdot 10^3$ км, электронная концентрация в волокне заключена между $7,5 \cdot 10^3$ и 300 см^{-3} , а среднее значение — между 10 и 30 см^{-3} .

Дейч. Вы мне говорили, что неоднородности концентрации могут соответствовать дефициту электронов.

Уиндхэм. Эти неоднородности могут быть дырами в непрерывной короне. Мы не знаем, чему равна средняя концентрация. Вся корона могла бы состоять из таких волокон или же волокна — это небольшие по размерам флукутации значительно большей средней концентрации.

Дэвис. Вы говорите об искривленности потоков вплоть до расстояний $20\text{—}30 R_{\odot}$. Этот характер течения, по-видимому, требует ветра, «дующего» с большой скоростью, и весьма значительных сил для создания результирующего ускорения.

Уиндхэм. Да.

Дэвис. Возможна ли другая интерпретация — например, структура с искривленными волокнами?

Уиндхэм. Я не могу ответить на этот вопрос.

Голд. Почему мы не можем измерить среднее значение коэффициента преломления для источника, который проходит несколько выше Солнца? Почему мы не можем обнаружить поперечное смещение источника?

Уиндхэм. Эти наблюдения относятся к расстояниям больше $20R_{\odot}$. Лишь начиная с расстояний порядка $5R_{\odot}$, коэффициент преломления становится достаточно большим, чтобы его можно было измерить на нашей установке.

Голд. Даже с сильно разнесенными антеннами?

Уиндхэм. На больших радиальных расстояниях эффект рассеяния будет смазывать любой эффект преломления.

На очень близких расстояниях преломление и рассеяние могут происходить одновременно. Кроме того, эффект усложняется, поскольку магнитные силовые линии являются радиальными, а не параллельными. Довольно трудно разобраться во всех этих эффектах.

Бирман. Вы говорили, что размеры волокна самое большее 5000 км. Я полагаю, что примерно такие же размеры мы наблюдаем в плазменных хвостах комет. Нет ли каких-либо данных со спутника «ИМП-1», которые можно сравнить или связать с этими величинами?

Несс. Линейные размеры, получаемые по магнитным измерениям «ИМП-1», сильно искажены локальной скоростью солнечного ветра, поскольку прибор измеряет лишь структуру, проходящую мимо спутника. 5000 км — минимальная величина, получаемая на основе наших данных.

Петчек. Я полагаю, что данные «ИМП-1» показывали изменения за более длительный период (т. е. на больших расстояниях), тогда как из вашего заявления следует, что не наблюдается крупномасштабных флуктуаций. Нет ли тут противоречия?

Уиндхэм. Мы выбрали модель, в которой волокна, вызывающие рассеяние радиоволн, не больше 5000 км в поперечнике на расстоянии $65 R_{\odot}$, причем они могут быть любой длины.

Паркер. Для более крупных образований ваша интерпретация неверна?

Уиндхэм. Мы не могли объяснить наши наблюдения рассеянием на корональных волокнах с поперечником более 5000 км.

Паркер. Можно ли обнаружить волокно поперечником более миллиона километров?

Уиндхэм. Все, что мы увидели бы, — это смещение источника, зависящее от концентрации, без увеличения его диаметра.

Паркер. Но вы не увидите смещения, поскольку оно будет меньше, чем разрешение вашей установки?

Уиндхэм. Возможно.

Паркер. Это не нарушает правильности вашей интерпретации?

Уиндхэм. Нет.

Голд. Вы хотели сказать, что не можете интерпретировать свои наблюдения на основе образований больших размеров. Однако на основе ваших наблюдений нельзя установить, существуют ли они. Вы можете лишь утверждать, что есть значительное количество мелких образований.

Уилкерсон. Вы сказали, что рассеяние проверялось по крайней мере на двух длинах волн. Не проводилась ли проверка еще и на других длинах волн?

Уиндхэм. Нет.

Уилкерсон. Почему вы использовали лишь две длины волн?

Уиндхэм. На основе предыдущих наблюдений, выполненных на нескольких различных частотах, было показано, что рассеяние зависит от квадрата длины волны. Мы нашли, что аналогичная зависимость от длины волны справедлива в пределах ошибки эксперимента¹⁾ и в настоящем случае.

Гесс. Какова длительность одного измерения? Какого типа временные вариации можно обнаружить?

Уиндхэм. Мы наблюдали источник радиоизлучения ежедневно от нескольких минут до получаса в зависимости от разрешающей способности

¹⁾ О хорошей связи флуктуаций интенсивности с частотой сообщается в [17*]. — *Прим. перев.*

антенн. Мы не обнаружили временных вариаций с периодом меньше дня, хотя другие ученые опубликовали сообщения о временных вариациях с периодом порядка минут.

Братенагль. Какова ориентация волокон? Они, вероятно, изменяются со временем, хотя, безусловно, в различные дни на карту наносятся различные волокна?

Уиндхэм. Каждая линия на карте представляет наблюдение одного дня. Линия характеризует среднее направление поля в какой-либо день.

Люст. Волокнистая структура была пока обнаружена лишь по наблюдениям Крабовидной туманности или же подтверждается наблюдениями других источников?

Уиндхэм. Рассеяние радиоволн от любого источника указывает на неоднородность структуры. Является ли структура волокнистой, можно определить лишь по наблюдениям с разрешением в различных направлениях. Для этого пока использовалась лишь Крабовидная туманность. Так что по наблюдениям других источников нельзя установить форму неоднородностей.

Люст. Или их размеры?

Уиндхэм. Одновременные наблюдения радиоисточника на различных частотах позволяют нам кое-что сказать о размерах. Наблюдения источника 3C 123 производились лишь на одной частоте.

Г л а в а 8

ЧТО МЫ ЗНАЕМ И ЧЕГО НЕ ЗНАЕМ О СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Г. С. Бридж

Теоретические предпосылки

В своем выступлении я буду придерживаться теории Паркера¹⁾. Я не утверждаю, что теория Паркера является единственно правильной или что существуют какие-либо характерные особенности, свидетельствующие о ее правильности, но я

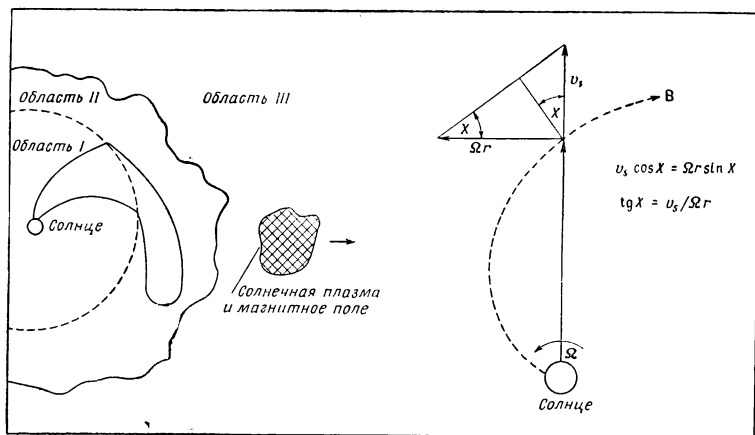


Рис 1. Модель солнечного ветра с вмороженным магнитным полем [1].

считаю, что она дает исходную систему, в которой мы можем проверять как экспериментальные результаты, так и теорию.

На рис. 1, заимствованном у Эксфорда, Десслера и Готтлиба [1], показана модель солнечного ветра, развивающая идеи Паркера. Эта картина построена на основе решения

¹⁾ Подробное изложение теории Паркера можно найти в его монографии [29*]. — Прим. ред.

гидродинамического уравнения, дающего плоский профиль скоростей от окрестностей Солнца до некоторой границы. Характер течения приводит к созданию спиральных магнитных силовых линий поля, которые вращаются вместе с Солнцем. В этой модели предполагается, что спиральная структура кончается на внешней границе области I, где солнечный ветер уравновешивается динамическим давлением извне. В области II магнитное поле, по-видимому, становится турбулентным. В конце концов поле отрывается за счет диссипативных процессов и уносится в межзвездное пространство, что предотвращает безграничное увеличение напряженности турбулентных магнитных полей в области II.

Безусловно, интересной особенностью этой модели является предположение о существовании в области II турбулентной структуры. Это, по-видимому, позволяет объяснить 11-летние вариации галактических космических лучей¹⁾. Идея состоит в том, что общее радиальное движение плазмы выметает неоднородности магнитного поля, и в том, что космические лучи диффундируют в солнечную систему против течения. Кроме того, время, необходимое газу, чтобы достичь этой точки, порядка года. Таким образом, если скорость плазмы изменяется, то должно существовать время релаксации, которое позволяет объяснить некоторые наблюдаемые детали цикла космических лучей.

Что нам хотелось бы знать

Позвольте мне кратко перечислить свойства плазмы, которые хотелось бы определить экспериментально. Нам хотелось бы измерить: скорость направленного движения плазмы; направление движения; разброс скорости в направлении движения потока, который дает нам некоторое представление о температуре; разброс скоростей поперек потока, чтобы узнать, является ли распределение скоростей в покоящейся системе изотропным. Хотелось бы знать распределение энергии электронов, величину и направление магнитного поля, связь флуктуаций магнитного поля и движения электронов. Затем, безусловно, мы коснемся общих пространственных особенностей всех этих характеристик, например их изменений в азимутальном и радиальном направлении; хотелось бы выяснить, как эти характеристики изменяются со временем.

Энергия направленного движения плазмы в основном сосредоточена в положительных ионах, энергия свободных электронов настолько мала по сравнению с энергией положитель-

¹⁾ См. гл. 12. — *Прим. ред.*

ных ионов, что ею можно пренебречь. Вот почему большинство исследователей уделяют так много внимания положительным ионам. В соответствии с различными теоретическими моделями и экспериментальными данными желательно измерять протоны в энергетическом диапазоне от 10 эв до 20 кэв. В настоящее время большинство измерений охватывает лишь часть этого диапазона. Позднее я приведу свои доводы, почему эти пределы являются важными.

Для измерения энергии протонов использовались различные схемы¹⁾. Все они включают электростатический анализ, а следовательно, измеряют кинетическую энергию на единичный заряд. Однако, когда мы пытаемся определить состав частиц, нам необходим анализ скоростей. Но даже путем анализа скоростей нельзя определить однозначно массу: можно определить лишь массу на единицу заряда.

Разрешение по энергии и энергетический диапазон современных приборов недостаточны для выполнения этой задачи, диапазоны энергий различных каналов плохо перекрываются. Хотелось бы определять энергию с точностью до 1% и подобрать энергетические ступеньки, перекрывающиеся таким образом, чтобы можно было точно измерять полный плазменный поток. Если рассматривается энергетический диапазон, который перекрывается тремя десятками энергетических ступенек, то это технически неосуществимая задача. Полный цикл измерений плазмы требует длительного времени, а сами измерения довольно трудны.

Хорошее разрешение по энергии имеет важное значение, поскольку температура и скорость плазмы могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от того, где находится плазма. Если плазма проходит через фронт ударной волны из области течения с большими числами Маха, то следует ожидать, что угловое распределение изотропно. В таком случае приходится измерять довольно высокую температуру и одновременно довольно низкое значение энергии дрейфа.

В настоящее время экспериментаторы приступили к разрешению этих проблем, хотя современные плазменные зонды еще далеки от идеала²⁾.

Что мы узнали из первых экспериментов

Обзор экспериментов по солнечному ветру — нелегкая задача, и многие из них уже были описаны довольно подробно.

¹⁾ Описание плазменных зондов можно найти в [31*]. — *Прим. перев.*

²⁾ В последнее время измерения плазмы выполнены на спутниках «Вела-2», «Вела-3», «Вела-5» [16*, 17*] и «Пионер-6» [18*]. — *Прим. перев.*

Сводка измерений солнечного ветра

Аппарат	Дата	Направление		Апогей, $R_{\oplus}$	Основные результаты, плазма, поле	Примечания
		азимут. часы	накло- нение			
„Пioneer-1“ [2, 3] „Пioneer-4“ [4] „Луна-2“ [5, 6]	11 окт. 1958 г.	12,2	+5°	18,6	Большие $\Delta B/B$ $? - 13,5R_{\oplus}$ $B_{int} < 6$, если не- дальное	$A_p \sim 5$ Измерения в преде- лах $12,3 - 14,8R_{\oplus}$
	3 марта 1959 г. 12 сент. 1959 г.	8,5 21	-18 -7		$7,9 - 11,8R_{\oplus}$, $\varphi^- = (1,5 -$ $-4) \cdot 10^8$ $11,8 - 30R_{\oplus}$, $\varphi^{\pm} \sim 0$	$200 \text{ эв} < E < 20 \text{ кэв}$; модулирован враще- нием
	4 окт. 1959 г.	16,2	-8		Много случаев $\varphi^+ < 10^8$ $19,8R_{\oplus}$, $\varphi^+ = 4 \cdot 10^8$	Модулирован враще- ем
„Пioneer-5“ [7, 8]	11 марта 1960 г.	16,5	+25		Большие $\Delta B/B$ $9,4 - 15,7R_{\oplus}$, $B_{\perp} \sim 3\gamma$ (спокойное), $5 - 60\gamma$ (возмущенное)	Запущен в период фа- зы восстановления магнитной бури. Пер- вый спутник, зареги- стрировавший эффект Форбуша

„Венера-1“ [5, 6]	12 февр. 1961 г.	17,5	+10	$26R_{\oplus}, \varphi^+ \sim 2 \cdot 10^8$ $297R_{\oplus}, \varphi^+ \sim 1 \cdot 10^9$	Плазменный зонд ориентирован на Солнце, $E > 50$ эв.
„Эксплорер-10“ [9]	25 марта 1961 г.	20,8	-35	46,6 $v = 300$ км/сек $\varphi^+ \sim 2 \cdot 10^8$ см ⁻² · сек ⁻¹ $T \sim 5 \cdot 10^{50}$ К	Детальные наблюдения В в пограничной области магнитосферы
„Эксплорер-12“ [10]	15 авг. 1961 г.	(13 → 8)	-33	13,1	Исследование границы магнитосферы
„Маринер-2“ (см. гл. 1)	27 авг. 1962 г.			$v = 360-700$ км/сек $n = 0,3-10$ см ⁻³ $T = 6 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^{50}$ К	Плазменный детектор, ориентированный на Солнце; время полетной жизни 104 дня
„Эксплорер-14“ [11, 12]	2 окт. 1962 г.	(8,5 → 18)	-33	16,4	Исследование границы магнитосферы
„Эксплорер-18“ (см. гл. 21)	27 нояб. 1963 г.	(12 → 6)	-33	31 $v \sim 250-440$ км/сек $\varphi^+ \sim (3-8) \cdot 10^8$ см ⁻² × × сек ⁻¹	Исследование границы магнитосферы, переходной области и межпланетного пространства

В таблице дана сводка результатов измерений солнечного ветра [2—12], в том числе измерения на спутнике «ИМП-1» («Эксплорер-18»), причем свойствам частиц уделено больше

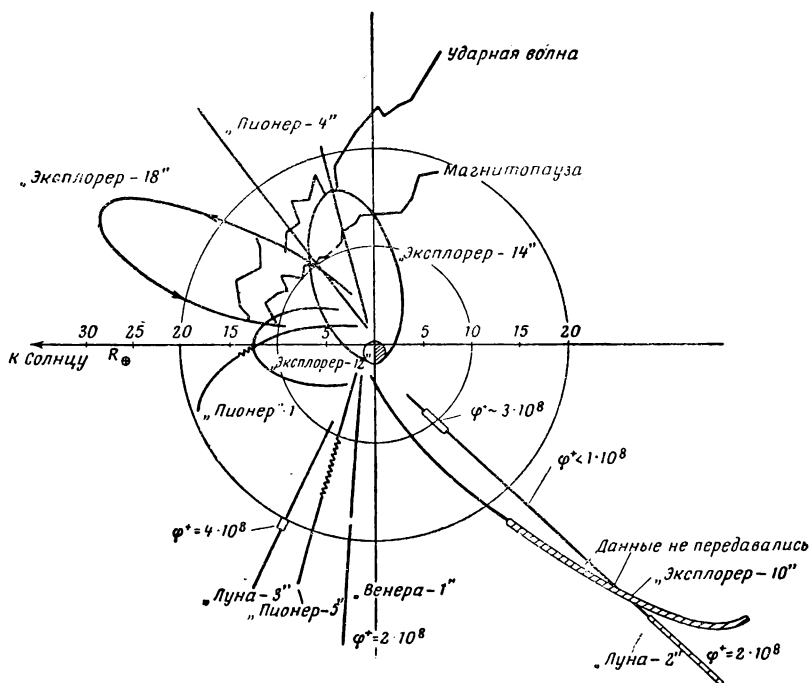


Рис. 2. Траектории космических аппаратов в системе координат Земля—Солнце.

внимания, чем свойствам магнитного поля¹⁾. В таблице не упоминается эксперимент на межпланетной станции «Марс-1»²⁾.

На рис. 2 показаны графически результаты экспериментов, выполненных на космических аппаратах. Некоторые орбиты были искусственно повернуты в плоскость эклиптики относительно линии Солнце—Земля. Цель этой процедуры—дать соответствующее представление о положении орбит относительно Солн-

¹⁾ Сведения о первых измерениях магнитных полей в межпланетном пространстве можно получить из [25*], результаты измерений межпланетного поля и плазмы на ракетах и спутниках за последнее время приводятся в [26*—28*]. — Прим. перев.

²⁾ Данные измерений на межпланетной станции «Марс-1» приводятся в [19*, 20*]. — Прим. перев.

ца, которое управляет процессами, происходящими около Земли. Этот метод был бы хорош, если бы поток был осесимметричным относительно линии Земля — Солнце.

На «Пионере-1» [2, 3] был установлен магнитометр, который зарегистрировал магнитные поля с довольно сильными флуктуациями на расстояниях от ~ 12 до $\sim 14 R_{\oplus}$. Дальше $14 R_{\oplus}$ напряженность упала до спокойных значений. На расстояниях меньше $12 R_{\oplus}$ данные на Землю не передавались, так что флуктуации поля, по-видимому, имели место значительно ближе к Земле.

Аналогичное поведение поля зарегистрировал «Пионер-5» [7, 8], траектория которого проходила ближе к вечерней стороне. На расстоянии от 10 до $15 R_{\oplus}$ обнаружены сильные флуктуации магнитного поля.

Измерения заряженных частиц проводились, например, на космическом аппарате «Луна-2», с ночной стороны Земли [5, 6]. «Луна-2» передавала данные о потоках положительных и отрицательных ионов вплоть до момента падения на Луну. К сожалению, на расстояниях $30-40 R_{\oplus}$ данные не передавались, поскольку космическая ракета была за пределами видимости приемных станций. Интересная особенность этого полета состоит в том, что в области от 12 до $30 R_{\oplus}$ не было зарегистрировано потоков положительных ионов. По-видимому, это объясняется абсолютной чувствительностью аппаратуры ($10^8 \text{ см}^{-2} \times \text{сек}^{-1}$).

На расстоянии $\sim 10 R_{\oplus}$ космическим аппаратом «Луна-2» измерены потоки электронов, а за пределами $40 R_{\oplus}$ — потоки положительных ионов. В этих экспериментах измерялся поток положительных ионов с энергией выше $\sim 15 \text{ эв}$. Из этого потока следует вычесть поток электронов с энергией достаточно высокой, чтобы они могли проникнуть через внешнюю сетку, на которую подано отрицательное напряжение смещения. Такого типа ловушки (рис. 3) фактически измеряли разницу между потоком электронов выше некоторого значения энергии и потоком протонов выше некоторого энергетического уровня.

Результаты измерений положительных ионов на космической ракете «Луна-2» согласуются с результатами, полученными на «Эксплорере-10» [9]. На рис. 2 не показаны флуктуации параметров плазмы, наблюдавшиеся «Эксплорером-10». Однако, начиная с $22 R_{\oplus}$ и до конца полезной жизни, на «Эксплорере-10» попеременно наблюдались периоды, когда плазма регистрировалась и когда она отсутствовала.

На «Луне-3» [5, 6] также регистрировались потоки положительных ионов $\sim 4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$. К сожалению, эти измерения не были непрерывными, так что не удалось построить зависимость

интенсивности потока плазмы от положения космической ракеты.

Аналогичные результаты были получены на автоматической межпланетной станции «Венера-1» [5, 6] (рис. 4). Передача 1 — это очень слабые токи, наблюдавшиеся внутри магнитосферы. Передача 2 — запись токов, наблюдавшихся вне магнитосферы,

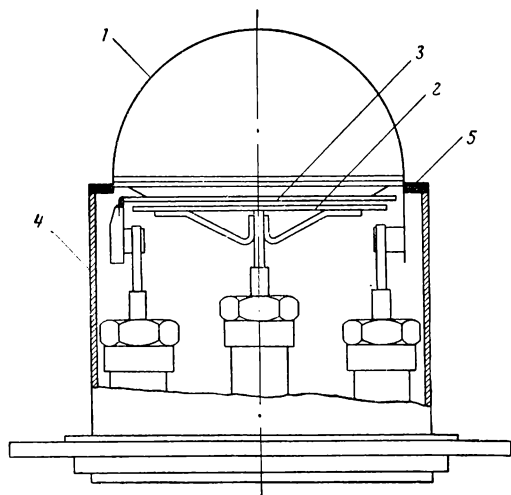


Рис. 3. Ионная ловушка.

1 — внешняя сетка, 2 — коллектор, 3 — внутренняя сетка (вольфрам), 4 — экран (алюминий), 5 — изолятор (тефлон).

а передача 3 — токи, наблюдавшиеся на очень больших расстояниях. Потоки, соответствующие передаче 1, равнялись $\sim 4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$, а две дорожки представляют измерения двумя различными ловушками с различными смещениями на сетках.

При помощи «Эксплорера-12» изучалось состояние магнитного поля на границе магнитосферы¹⁾.

Однако поскольку эти измерения не относятся к межпланетному пространству, то мы не будем их рассматривать.

«Эксплорер-14», несомненно, пересекает магнитопаузу, а иногда и головную ударную волну²⁾, хотя результаты, опубликованные до сих пор для переходной области, не очень

¹⁾ Данные измерений «Эксплорера-12» и результаты анализа приведены в [21*, 22*]. — Прим. перев.

²⁾ Об этом сообщалось в [30*]. См. также гл. 10. — Прим. перев.

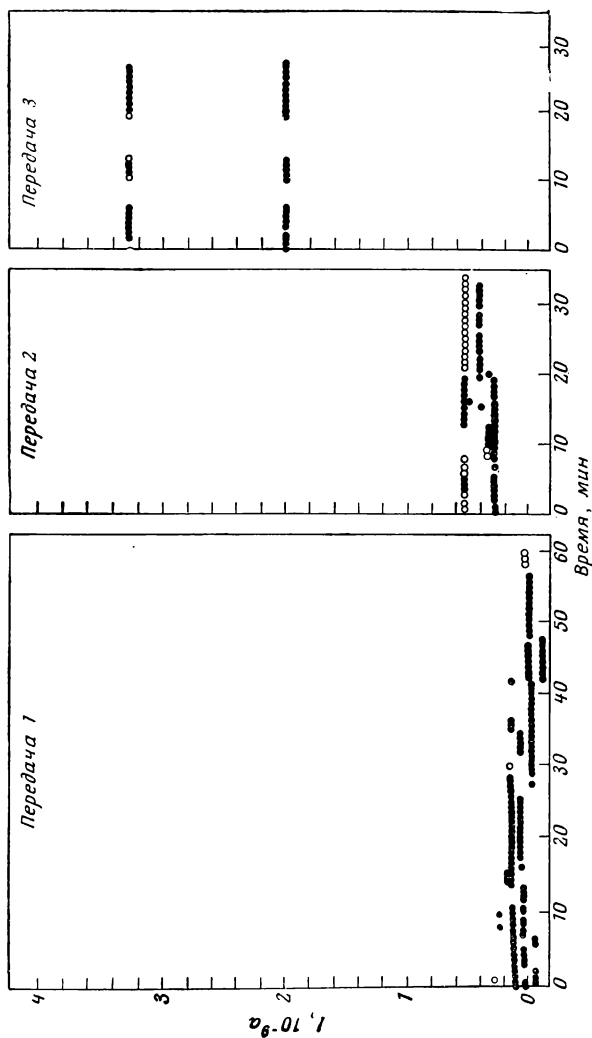


Рис. 4. Пример записи результатов с автоматической станции «Венера-1», полученных в 1961 г. Передача 1 соответствует внутренней части магнитосферы, передача 2 принята с небольшого расстояния вне магнитосферы, передача 3 относится к межпланетному пространству. (Черные кружки — $\varphi_{g2}=50^\circ$, светлые кружки — $\varphi_{g2}=0^\circ$.)

определенны. Период полезной жизни «Эксплорера-12» продолжался от 13 час. до 8 час. местного времени (полуденный меридиан соответствует 12 час. местного времени). Апогей спутника «Эксплорер-14», как мне кажется, по существу описал полный оборот.

Основной вывод, который можно сделать на основе этой сводки, состоит в том, что эти результаты согласуются с современными представлениями. Ударная волна создается на дневной стороне в результате взаимодействия плазмы с магнитосферой; за ударной волной со стороны Земли находится переходная область толщиной в несколько $R_{\oplus}$, а затем идет магнитосфера. Эта картина подтверждается результатами измерений плазмы на «ИМП-1»¹⁾. Примерное положение фронта ударной волны и магнитопаузы, полученное на основе этих результатов, показано на рис. 2 жирными линиями. Эти линии соединяют точки, где наблюдались изменения свойств плазмы. Все результаты согласуются удовлетворительно.

Что мы узнали на основе данных «ИМП-1»

Перейдем к данным, полученным в межпланетном пространстве при помощи плазменного зонда «ИМП-1». Результаты «ИМП-1», относящиеся к магнитосфере и переходной области, будут рассмотрены в гл. 21.

На рис. 5 показан характер модуляции плазменных данных, полученных за пределами магнитосферы, вращением спутника (спутник вращается со скоростью $\sim 1/3$ об/сек). Плазменный зонд установлен таким образом, что нормаль к входному отверстию прибора была направлена перпендикулярно оси вращения. По мере вращения спутника регистрация плазменного потока в азимутальной плоскости производилась через каждые 20° , и характер направленности потока можно обнаружить, исследуя токи в зависимости от времени, т. е. в зависимости от угла поворота спутника. Представленные графики соответствуют различным диапазонам энергий, стрелки отмечают положение Солнца. Заметьте, что для разных энергетических диапазонов максимумы интенсивности потока наблюдаются при различных углах: очевидно, что в азимутальной плоскости направление потока плазмы заключено в пределах 20° , причем по радиусу от Солнца, т. е. так, как мы предполагали на основе предыдущих результатов.

¹⁾ Более полные сведения о результатах измерений плазмы при помощи электростатического анализатора «ИМП-1» можно найти в [23*]. — *Прим перев.*

На рис. 6 приводятся «суммарные» данные, полученные на нисходящей части последнего витка. На рис. 6, а дается среднее значение энергии в электронвольтах в зависимости от времени. Рис. 6, б показывает поток плазмы, наблюдаемый, когда зонд направлен к Солнцу; он сравнивается с минимальным

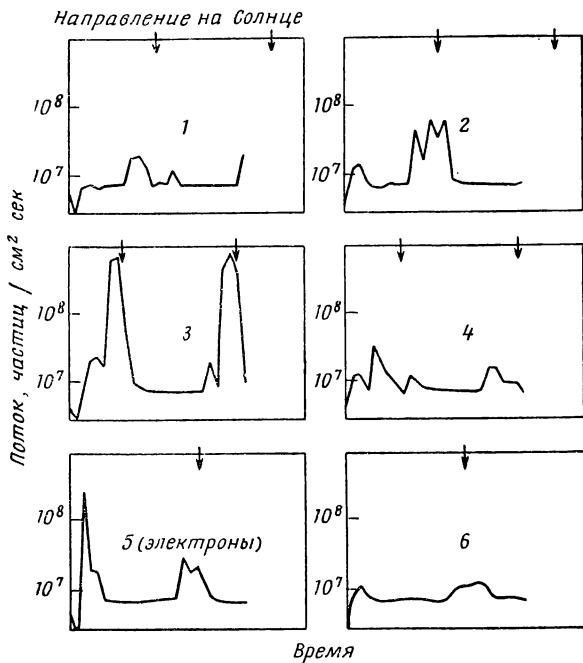


Рис. 5. Измерение солнечной плазмы в различных энергетических интервалах на спутнике «ИМП-1». Данные получены на восходящей части 10-го витка на расстоянии $17,8 R_{\oplus}$ при эклиптической широте $-20^{\circ},8$ и солнечно-эклиптической долготе $286^{\circ},3$, угол нормаль (к входному отверстию ловушки) — Солнце составлял 36° .

потоком, регистрируемым во время вращения спутника. Эти значения были получены суммированием по всему измеряемому энергетическому диапазону, так что эти линии представляют максимальный и минимальный полный наблюдаемый поток. Для этой части данных характерны очень спокойные условия; энергия и поток довольно постоянны. На рис. 6, г, д приведены данные измерений электронов. (На плазменном зонде есть один энергетический электронный канал. Мы надеемся, что он даст нам важную информацию, но пока недостаточно ясно, что все же

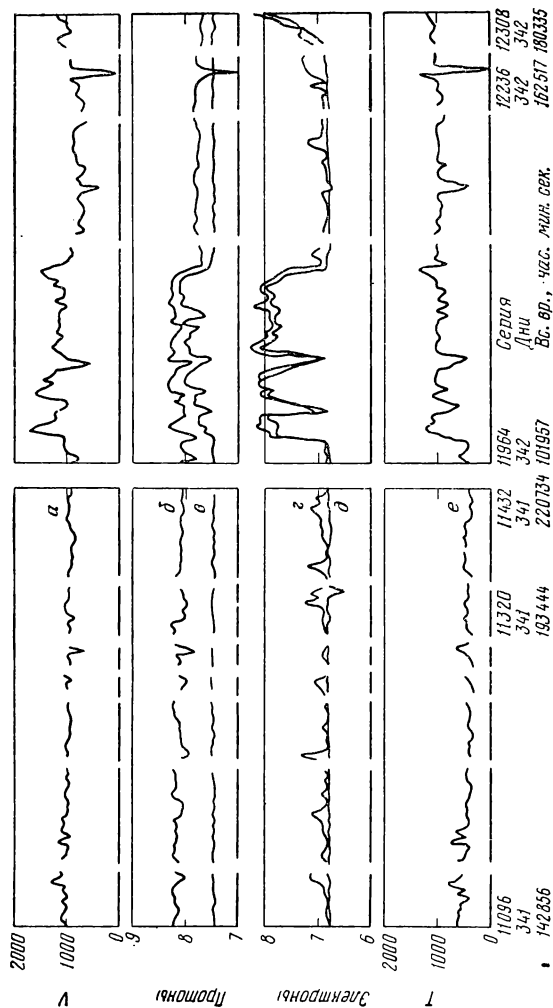


Рис. 6. Суммарные данные по солнечной плазме, полученные на нисходящей части витка спутника «ИМП-1».

означают эти данные.) Наконец, рис. 6, *е* дает что-то вроде температуры плазмы. В правой половине рисунка приведены данные, полученные при переходе в магнитосферу. Начальный скачок электронного потока, например, был назван *ударной волной*. Следующий разрыв будет представлять магнитопаузу, которая будет более подробно рассмотрена в гл. 21.

Нейгебауэр. Что такое температура? Этот рисунок разве не говорит о том, что тепловая энергия составляет 20 или 30% потока полной энергии? Если так, то это значительно больше того, что регистрировалось на «Маринере-2».

Лайон. Не следует связывать кривую «температуры» с тепловой энергией. «Температура» представляет собой просто второй момент распределения и включает шумы.

Бридж. Мы нанесли эту величину на график, чтобы выяснить, изменится ли ширина функции распределения энергии, когда спутник проходит через фронт ударной волны. Но я не знаю, что это означает количественно. Как мне кажется, это дает меру того, что происходит, — метод изучения данных и определения изменений в энергетическом распределении плазмы.

Уилкерсон. Кривая для электронов в левой части рисунка показывает, что распределение электронов более изотропно, чем распределение протонов.

Бридж. Да, это так, если не учитывать незначительные флуктуации между ударной волной и магнитопаузой. Уровень шумов (нижняя кривая) составляет примерно одну десятую часть электронного сигнала. Уровень шумов в протонном канале несколько выше, поскольку он является суммой шумов всех пяти энергетических интервалов. Мы по существу наблюдаем энергетический диапазон от нескольких сот электронвольт в межпланетном пространстве до среднего значения около двух килоэлектронвольт в переходной области.

До сих пор мы рассматривали прямые измерения плазмы. Сейчас суммируем наиболее важные, характерные особенности этих измерений. Большую часть данных о поведении плазмы в межпланетном пространстве мы получили на основе результатов «Маринера-2»¹⁾. Плазма в межпланетном пространстве есть все время — вот наиболее важный вывод, подтвержденный измерениями на «ИМП-1». Энергия плазмы, или скорость, изменяется в широких пределах. Измерения, выполненные на «ИМП-1», показывают, что скорость изменяется, по-видимому, от 250 до 400 км/сек, обычно она очень устойчива. Вряд ли в настоящее время можно делать надежные выводы о свойствах плазмы, кроме того, что плазма есть всегда. Это довольно важное утверждение, оно означает, что на Солнце не существует больших областей, которые не испускали бы плазму.

¹⁾ См. гл. 1 и примечания к ней. — Прим. ред.

Что мы узнали из экспериментов по изучению энергичных частиц

Согласно модели Паркера, свойства плазмы определяют конфигурацию магнитного поля между Землей и Солнцем. Один из методов исследования плазмы — изучение движения солнечных протонов при различных условиях. Поэтому я скажу несколько слов о том, что мы знаем о распространении частиц от Солнца ¹⁾.

За последнее время мы очень много узнали о проникновении солнечных протонов к Земле благодаря систематическим исследованиям траекторий, по которым могут распространяться частицы. Этому особенно способствовали работы Годдардовской группы, из которых следует, что солнечные протоны могут достигать Земли четырьмя путями [13]:

1. Вспышки высокоэнергичных частиц, которые приходят к Земле непосредственно из солнечной хромосферной вспышки. В этом случае время нарастания интенсивности частиц сравнимо с временем пробега частиц от Солнца до Земли; интенсивность достигает максимального значения в течение 20 или 30 мин.

2. Распространение частиц подвержено влиянию диффузионных процессов. Продолжительность нарастания интенсивности до максимума занимает несколько часов. Как мне кажется, мы начинаем понемногу понимать природу этих двух типов протонных вспышек.

3. Частицы, испущенные вспышкой, захватываются одновременно испущенной плазмой. Частицы достигают Земли одновременно с плазмой.

4. Распространение частиц, которые, по-видимому, связаны с вращением Солнца. Этот тип несколько отличается от третьего типа, связанного с захватом частиц.

Первые три типа распространения можно проиллюстрировать, наблюдая процессы, связанные с отдельной солнечной вспышкой. Позвольте мне напомнить последовательность событий в период солнечной вспышки. Обычно вспышка на Солнце наблюдается в течение нескольких часов. Однако время испускания частиц, по-видимому, очень близко совпадает с характерным уярчением и уширением линии H α . Это уярчение длится лишь несколько минут и дает временной интервал, в течение которого солнечные частицы излучаются вспышкой. Несколько минут спустя солнечные космические лучи наблюдаются на Земле. Запоздывание соответствует времени, необходимому солнечным космическим лучам, чтобы пройти расстояние от Солнца

¹⁾ См. гл. 4, 5 и 12. — *Прим. перев.*

до Земли в предположении прямолинейного распространения. Как я говорил, характерное время нарастания интенсивности потока частиц зависит от того, приходят ли частицы к Земле по прямой или за счет процессов диффузии.

День-два спустя после этой серии явлений на Земле наблюдается внезапное начало и вскоре после этого эффект Форбуша. Одно из возможных объяснений этих явлений, предложенное Голдом, представлено на рис. 7. На рис. 7, б и в иллюстрируется понятие магнитного языка, или магнитной бутылки. Частицы движутся от Солнца к Земле вдоль магнитных силовых линий, выходящих из области солнечной вспышки. Это понятие позволяет объяснить эффект Форбуша галактических космических лучей (см. рис. 7, в). Если такая конфигурация существует во время вспышки, то частицы распространяются непосредственно к Земле, если нет, то частицы диффундируют. Обе эти схемы распространения космических лучей иллюстрируются на основе вспышки 12 ноября 1960 г.

На рис. 7, а представлена схема предполагаемой конфигурации магнитного поля, заимствованная из [14]. По общему мнению, такая конфигурация магнитного поля была создана вспышечными выбросами 10 и 11 ноября. Эта конфигурация поля проявилась 12 ноября в постепенном увеличении потока частиц, который сопровождался новым возрастанием интенсивности потока частиц, когда Земля вошла в магнитную ловушку. Если бы вспышка 12 ноября произошла в тот момент, когда Земля находилась в магнитном поле, созданном более ранними вспышками, то наблюдалось бы быстрое возрастание интенсивности.

Приблизительно через 2 дня после вспышки 12 ноября имело место внезапное начало, которое соответствует, по-видимому, приходу плазмы, выброшенной этой вспышкой. Время запаздывания наступления магнитной активности на Земле соответствует времени, необходимому протонам с энергиями порядка нескольких килоэлектронвольт, скажем от 2—3 до 20 кэв, чтобы преодолеть расстояние от Солнца до Земли. Таким образом, нужно ответить на вопрос: что достигает Земли в это время? Независимо от того, что это такое, «оно» пронесется мимо Земли очень быстро (в течение минут). Вероятно, это фронт ударной волны, который генерируется одновременно с плазмой. Но что представляет плазма за фронтом ударной волны? Как эти ударные волны распространяются через межпланетную среду?

Я не думаю, что в настоящее время мы располагаем экспериментальными данными, которые помогли бы ответить на эти вопросы или разобраться в условиях в плазме в период этих

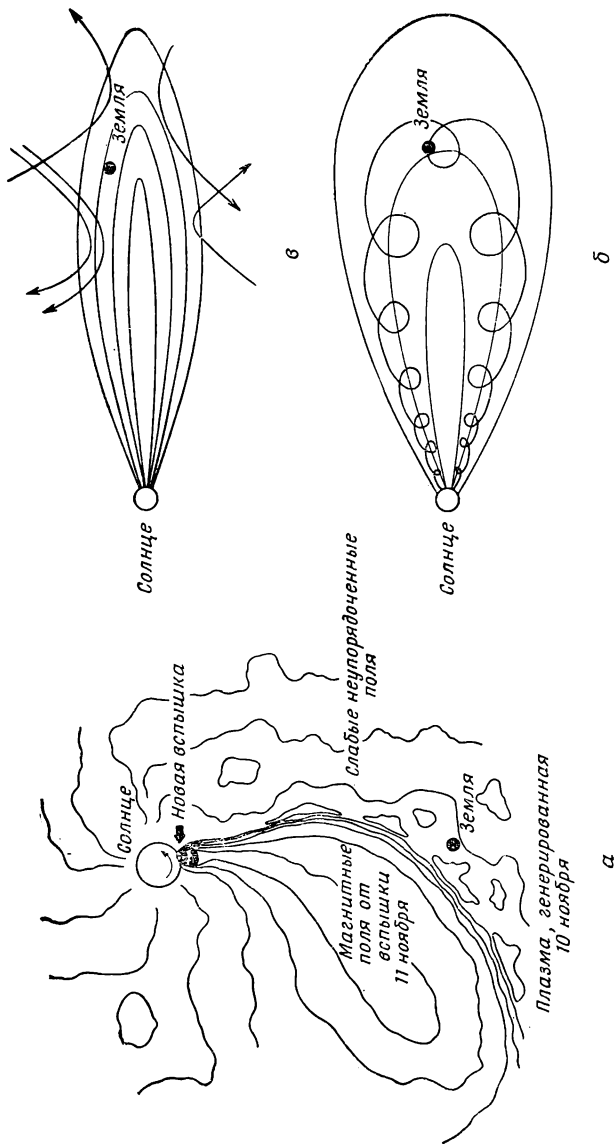


Рис. 7. *а* — модель конфигурации межпланетное магнитное поле — плазма в период солнечной вспышки 12 ноября 1960 г. [14]; *б* — влияние солнечных космических лучей; *в* — отклонение галактических космических лучей магнитными полями, переносимыми в солнечной плазме.

грандиозных событий¹⁾. Но к следующему солнечному циклу мы должны подготовить приборы, которые позволили бы получить необходимые параметры. Пусть теоретики подскажут нам, какие требования следует предъявлять к этим приборам. Установка, которая позволяет измерять энергию плазмы вплоть до

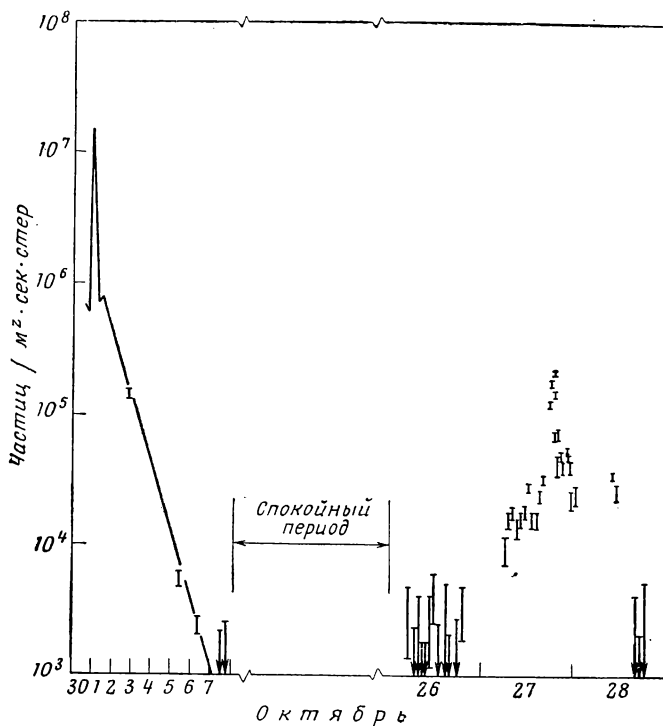


Рис. 8. Протоны, наблюдавшиеся на «Эксплорере-12», по-видимому, связаны со вспышкой 28 сентября 1961 г. (см. гл. 5).

20 кэв, сильно отличается от установки для измерения энергии частиц лишь до 3 кэв.

Рис. 8 напоминает рисунок, представленный Клайном (рис. 2 гл. 5), и иллюстрирует четвертый тип распространения частиц. Вполне возможно, что увеличение интенсивности потока 27 октября можно связать с вхождением Земли в магнитную ловушку, содержащую частицы вспышки, которые были излучены

¹⁾ Некоторые сведения все же есть. См. гл. 10 и примечания к ней, — Прим. ред.

28 сентября. Эти частицы первоначально достигли Земли за счет процессов диффузии. Затем 27 дней спустя мы вновь наблюдаем эти протоны с энергиями выше нескольких мегаэлектронвольт. Я не уверен, что эти частицы непрерывно испускаются Солнцем.

По-видимому, в потоке плазмы существуют магнитные ловушки, содержащие эти частицы. Разрушаются ли эти ловушки в следующие 27 дней, просачиваются ли частицы, я не знаю. Однако совершенно ясно, что на Солнце существует область, в которой произошла вспышка и что эта область излучает частицы, которые каким-то образом удерживаются в поле; эти поля обволакивают Землю и должны быть отделены от поля остальной плазмы. Итак, как выглядят эти области поля? Как они создаются? Поддерживаются ли они там? Существование этого потока должно означать, что силовые линии все еще связаны с Солнцем, поскольку, если бы они отсоединились, то они должны были бы 27 суток оставаться в пределах 1 а. е.

Когда Земля вошла в эту ловушку, наблюдалось внезапное начало. Вероятно, внезапное начало было связано с границей между потоком и остальной плазмой. Какова эта граница? Она, по-видимому, похожа на границу, которая образуется после большой солнечной вспышки, когда на Земле наблюдается магнитная буря и эффект Форбуша. Однако в количественном отношении эти границы, вероятно, отличаются. Магнитная ловушка обгоняет Землю из-за вращения Солнца, а не потому что плазма, движущаяся от Солнца, догоняет Землю. Однако мы наблюдали внезапное начало в этой точке, поэтому мы должны пересечь некоторое подобие переходной области или ударную волну в плазменном потоке.

Другое доказательство существования 27-дневной периодичности — данные, приведенные Снайдером. На рис. 9 представлены предварительные результаты «Маринера-2» [15]¹⁾, показывающие 27-дневную периодичность в скорости плазмы, коррелирующей с индексом K_p . Свойства плазмы изменяются, по-видимому, в азимутальном направлении в плоскости эклиптики. Соответствует ли такое поведение установившемуся характеру течения или существуют разрывы между областями, движущимися с разными скоростями, которые определяются структурой этого течения?

Таким образом, в этом явлении наблюдается все: от плазмы, содержащей захваченные протоны, до свободных частиц. Различается ли качественно солнечное излучение во всех этих случаях или же оно в основном всегда одинаково? В чем заклю-

¹⁾ Более подробно этот вопрос освещен в [24*]. — *Прим. перев.*

чается это различие, в характере магнитного поля или частиц? Данные, которыми мы располагаем, показывают, что свойства частиц плазмы отличаются от предсказанных. Например, мы наблюдаем ударную волну, которая распространяется через среду

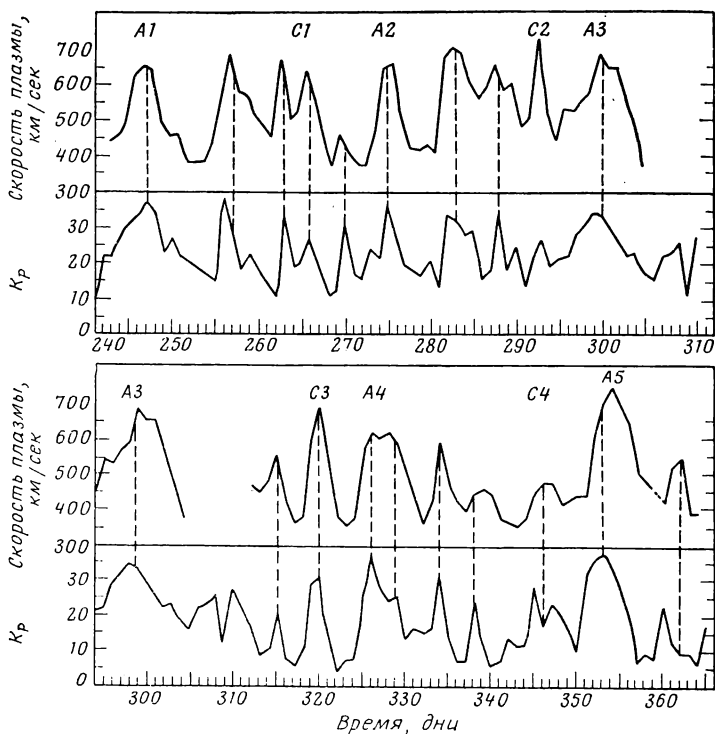


Рис. 9. Средние значения скорости плазмы, наблюдавшейся «Маринером-2»; для сравнения нанесены значения индекса K_p [15].

со скоростью, в несколько раз превышающей скорость положительных ионов. Если это верно, то в какой степени и каким образом энергия протонов в плазме зависит от их положения за фронтом ударной волны.

Нам необходима теория, которая могла объяснить все эти явления, даже предсказания имели бы огромное значение для экспериментаторов. Результаты спутников должны дать нам новую информацию о конфигурации магнитного поля и плазмы, а это позволит нам связать воедино отдельные детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Axford W. I., Dessler A. J., Gottlieb B., *Astrophys. J.*, **137**, 1268 (1963).
2. Sonett C. P., Judge D. L., Sims A. R., Kelso J. M., *J. Geophys. Res.*, **65**, 55 (1960).
3. Sonett C. P., Smith E. J., Sims A. R., *Space Res.*, I, ed. H. Kallmen Bijl, North-Holland, Publ. Co., Amsterdam 1960, p. 921.
4. Van Allen J. A., Frank L. A., *Nature*, **184**, 219 (1959).
5. Грингауз К. И., *Space Res.*, II, eds. H. C. van de Hulst, C. de Jager, A. H. Moore, Interscience Publ., Inc., New York, 1961, p. 539.
6. Грингауз К. И., Безруких В. В., Баладина С. М., Озеров В. Д., Рыбчинский Р. Е., *Space Res.*, III, ed. by W. Priester, Interscience Publ., John Wiley and Sons, Inc., New York, 1963, p. 602.
7. Coleman P. J., Davis L., Sonett C. P., *Phys. Rev. Letters*, **5**, 43 (1960).
8. Coleman P. J., Sonett C. P., Judge D. J., Smith E. J., *J. Geophys. Res.*, **65**, 1856 (1960). (Русский перевод в сб. «Солнечные корпускулярные потоки и их взаимодействие с магнитным полем Земли», М., ИЛ, 1962.)
9. Bonetti A., Bridge H. S., Lazarus A. J., Rossi B., Scherb F., *J. Geophys. Res.*, **68**, 4017 (1963).
10. Bryant D. A., Desai U. D., McDonald F. B., *J. Geophys. Res.*, **67**, 4983 (1962).
11. Frank L. A., Van Allen J. A., Macagno E., *J. Geophys. Res.*, **68**, 3543 (1963).
12. Cahill L. J., Amazeen P. G., *J. Geophys. Res.*, **68**, 1835 (1963).
13. Bryant D. A., Cline T. L., Desai U. D., McDonald F. B., *AAS-NASA Symposium on the Physics of Solar Flares, SP-50*, ed. W. H. Hess, Washington, D. C., 1964, p. 289.
14. Steljes J. F., Carmichael H., McCracken K. G., *J. Geophys. Res.*, **66**, 1363 (1961).
15. Snyder C. W., Neugebauer M., *Space Res.*, **4**, 89 (1964).
- 16*. Coon J. H., *Radiation trapped in the earth's magnetic field*, ed. B. M. McCormac, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 1966, p. 231.
- 17*. Hundhausen A. J., Asbridge J. R., Bame S. J., Strong I. B., *J. Geophys. Res.*, **72**, № 7, 1979 (1967).
- 18*. Wolfe J. H., Silva R. W., McKibbin D. D., Mason R. H., *J. Geophys. Res.*, **71**, № 13, 3329 (1966).
- 19*. Грингауз К. И., Безруких В. В., Мусатов Л. С., Рыбчинский Р. Е., Шеронова С. М., *Space Res.*, **4**, 621 (1964).
- 20*. Вакулов П. В., Вернов С. Н., Горчаков Е. В., Логачев Ю. И., Чарахчян А. Н., Чарахчян Т. Н., Чудаков А. Е., *Space Res.*, **4**, 26 (1964).
- 21*. Cahill L. J., Patel V. L., *Planet. Space Sci.*, **15**, № 6, 997 (1967).
- 22*. Sonnerup B. U. O., Cahill L. J., *J. Geophys. Res.*, **72**, 171 (1967).
- 23*. Wolfe J. H., Silva R. W., Myers M. A., *J. Geophys. Res.*, **71**, № 5, 1319 (1966).
- 24*. Snyder C. W., Neugebauer M., Rao U. R., *J. Geophys. Res.*, **68**, № 24, 6361 (1963).
- 25*. Smith E., *Space Physics*, ed. D. P. Le Galley, A. Rosen, New York—London—Sydney, 1964. (Русский перевод: Космическая физика, под ред. Д. П. Ле Гэлли и А. Розена, М., изд-во «Мир», 1966, стр. 359.)
- 26*. Ness N. F., *Space Science*, ed. W. N. Hess, Gordon and Breach, Glasgow, 1965, p. 323.

- 27*. Lüst R., Report on the Inter-Union of Symposium on Solarterrestrial Physics, Belgrade, August 29—September 3, 1966. (Русский перевод в сб. «Солнечно-земная физика», М., изд-во «Мир», 1968.)
- 28*. Грингауз К. И., Вестник АН СССР, № 5, 60 (1965).
- 29*. Parker E. N., Interplanetary Dynamical Processes, New York—London, 1963. (Русский перевод: Е. Н. Паркер, Динамические процессы в межпланетной среде, М., изд-во «Мир», 1965.)
- 30*. Wolfe J. H., Silva R. W., J. Geophys. Res., 70, № 15; 3575 (1965).
- 31*. Space Physics, ed. by D. P. Le Galley, A. Rosen, New York—London—Sydney, 1964. (Русский перевод: Космическая физика, под ред. Д. П. Ле Галли и А. Розена, изд-во «Мир», М., 1966, стр. 75 и 424.)

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА БРИДЖА

Эксфорд. Я хочу подвергнуть сомнению предложенную интерпретацию данных Клайна, а именно что повторное излучение протонов 27 октября 1961 г. не было новой вспышкой протонов и что протоны не создаются непрерывно в этой активной области. Нет оснований утверждать, что излучение новых протонов не происходит постоянно.

28 сентября наблюдалась вспышка протонов, связанная с хромосферной вспышкой. 30 сентября было зарегистрировано внезапное начало и новая вспышка частиц, отчасти связанная с ударной волной. Некоторое время спустя, 27 октября, наблюдалась другая вспышка, также связанная с внезапным началом.

Итак, событие, наблюдавшееся в октябре, было связано с событием 30 сентября, поскольку оно произошло через 27 дней.

Однако важно отметить, что хромосферная вспышка 28 сентября произошла на 30° восточнее центрального меридиана. Активной области потребовалось еще два дня, чтобы оказаться около центрального меридиана. Так что вполне обоснованно связать событие 27 октября с прохождением через центральный меридиан области, которая вызвала вспышку 28 сентября.

Бридж. Смысл вашего заявления в том, что события эти не связаны. Вы не утверждаете, что существует непрерывное излучение.

Эксфорд. Я полагаю, что нет данных, свидетельствующих о том, что нет непрерывной эмиссии.

Бридж. Безусловно, если бы эмиссия была непрерывной, то аргументация не изменилась бы. Однако утверждение, что оба события не были вызваны одной и той же вспышкой, в корне изменило бы аргументацию. Не ясно, сохраняют ли магнитные силовые линии свою конфигурацию в течение длительного времени.

Дэвис. Очень хорошо, что вы поддерживаете гипотезу о магнитных полях с неизменной конфигурацией, которые появляются время от времени и, по-видимому, направляют частицы от Солнца к Земле. Такие особенности, вероятно, отмечают положение интересных областей на Солнце, испускающих частицы во время солнечных вспышек или каких-либо других изменений. Но, по-видимому, неверно перекладывать на теоретиков тяжесть создания механизма захвата, который удерживал бы частицы в течение месяца, когда ему противодействуют дрейф и механизмы потерь.

Голд. Такой длительный захват абсолютно невозможен, когда мы говорим о малоэнергичных частицах и знаем, что поле не такое уж гладкое, и все же наблюдаем в нем частицы и когда вещество вылетает с такой скоростью, что ему необходимо довольно длительное время, чтобы достичь Земли. Невозможно придумать какой-либо механизм захвата, если поле не меняется плавно, поскольку в таком поле трудно предотвратить утечку.

Рассмотренные диффузионные механизмы позволяют без затруднений определить локализацию малоэнергичных частиц. Эти частицы будут

переноситься в основном потоком плазмы со скоростью истечения плазмы. Небольшие изгибы магнитного поля не будут влиять на высокоэнергичные частицы. Для них поле будет почти гладким.

Бридж. Я понял Вашу точку зрения. Я умышленно указал на следствия и выводы Клайна. Это не единственное событие.

Голд. Я хотел бы также напомнить, что когда много лет назад строили графики магнитных бурь, вызванных солнечными вспышками, то пришли к такой же картине. Для солнечных вспышек была характерна 27-дневная повторяемость. Было довольно трудно отличить так называемые магнитные бури *M*-областей от магнитных бурь, связанных со вспышками, поскольку у магнитных бурь, связанных со вспышками, наблюдалась тенденция повторяться каждые ~ 27 суток.

Бридж. Вы утверждаете, что если вы наблюдали вспышку, то через 27 суток вам удастся заметить еще какие-то явления?

Голд. Я сказал бы, что вероятность существования сравнительно низкоэнергичных частиц в магнитных полях, связанных с возмущенной областью, очень высока. Небольшие вспышки постоянно происходят в возмущенных областях, и частицы могут достичь Земли только в случае подходящей конфигурации поля.

Бридж. Но вы не доказываете, что магнитная конфигурация сохраняется в течение 27 суток?

Голд. Нет. Но я предполагаю, что положение источника истечения сохраняется гораздо дольше. Поэтому именно из этих областей магнитные конфигурации вытягиваются в любое время. Совсем не обязательно, что это одни и те же силовые линии. Из наблюдений не ясно, устойчив ли этот процесс.

Паркер. Вы согласны с тем, что спиральное поле формируется совершенно независимо?

Голд. Абсолютно. Все, что испущено из области на Солнце, формирует спираль. Спираль формируется либо теми же магнитными силовыми линиями навсегда, либо последовательностью облаков.

Клайн. В данных события 28 сентября есть интересная деталь. В период предыдущего солнечного оборота 10 сентября произошла хромосферная вспышка на западном лимбе. Плазменный поток от этой хромосферной вспышки можно было бы наблюдать между 28 и 30 сентября, но он был «смазан» этим новым событием, которое, безусловно, произошло в той же флоккулярной области. Солнечная вспышка 10 сентября вызвала вспышку малоэнергичных частиц и внезапное начало, наблюдавшееся два дня спустя. Но поскольку излучение выходило из области, расположенной на 90° западнее центрального меридиана, а не около центрального меридиана, ориентация не позволила установиться потоку: конфигурация поля для событий с 2-дневным запаздыванием должна быть иной.

Часть II

ТЕОРИИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ ПЛАЗМЫ, ПОЛЕЙ И ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ

МОДЕЛИ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПОЛЕЙ
И ТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ¹⁾

Л. Дэвис

Хотя я не могу предложить модель, которая объяснила бы все особенности представленных вчера данных, тем не менее я хочу проанализировать различные модели, основанные на этих данных, и высказать соображения, необходимые для построения удовлетворительной модели.

Современные представления о солнечном ветре включают два очень примечательных факта, которые следует выделить: 1) Солнце выбрасывает долгоживущие струи газа, движущиеся с большой скоростью; 2) составляющая межпланетного магнитного поля, перпендикулярная к плоскости эклиптики, по-видимому, направлена преимущественно к югу.

Высокоскоростные струи

Струи газа, движущиеся с большой скоростью, могут непрерывно испускаться одной и той же областью Солнца в течение по крайней мере 4—5 солнечных оборотов. Одна из струй, наблюдаемая на «Маринере-2», всегда имела относительно сильное магнитное поле, направленное от Солнца. Это поле, по-видимому, обладало классической спиральной структурой, хотя на основе данных «Маринера-2» это не установлено определенно.

Рис. 1 объединяет два рисунка, показанных Смитом (см. гл. 3). Нижняя кривая представляет собой радиальную составляющую магнитного поля; верхняя — составляющую поля в направлении движения планеты. Каждая точка соответствует среднесуточному значению. Никакие предположения относительно смещения нуля магнитометра не могут значительно изменить тангенциальную составляющую в течение первых десяти

¹⁾ См. также обзор Десслера [6*], работу Мишеля [7*], а также гл. 13 настоящей книги. — *Прим. перев.*

дней. Характер радиальной составляющей, в которой выделяется ряд последовательных горбов через 27-дневные интервалы, также не зависит от положения нуля-пункта прибора. Можно

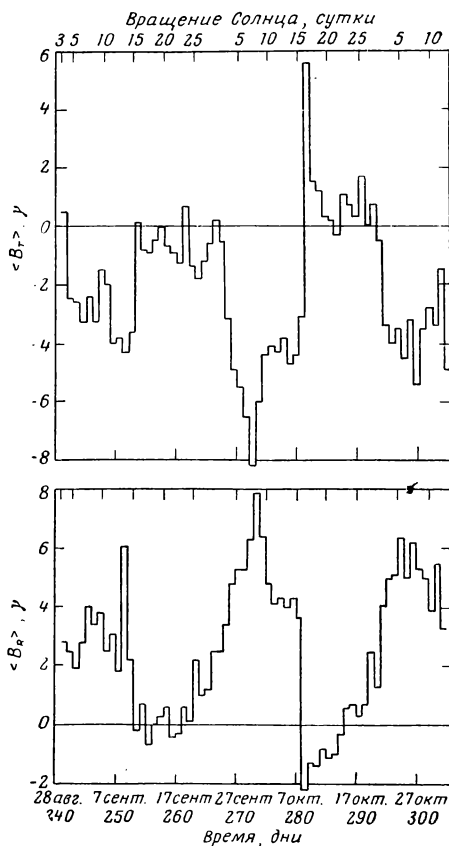


Рис. 1. Радиальная B_R и тангенциальная B_T составляющие межпланетного магнитного поля, среднесуточные значения с 30 августа по 1 ноября 1962 г.

поместить нуль составляющей B_R , как показано на рисунке, поскольку это обеспечивает желаемую спиральную структуру поля с 3-го по 12-й день солнечного оборота. В этот период существовала сильная радиальная составляющая, направленная от Солнца, которая неоднократно наблюдалась при последующих оборотах Солнца.

Южная составляющая поля

Данные «Маринера-2» и «ИМП-1» указывают, что составляющая поля, перпендикулярная к плоскости эклиптики, преимущественно направлена к южному полюсу эклиптики. На рис. 2 представлены системы координат, используемые в экспериментах на «Маринере-2» и «ИМП-1». В обоих случаях плоскость эклиптики лежит в плоскости чертежа. Единственная линия, не лежащая в плоскости чертежа, — это северная полярная ось эклиптики. [N (нормаль) — для «Маринера-2», Z — для

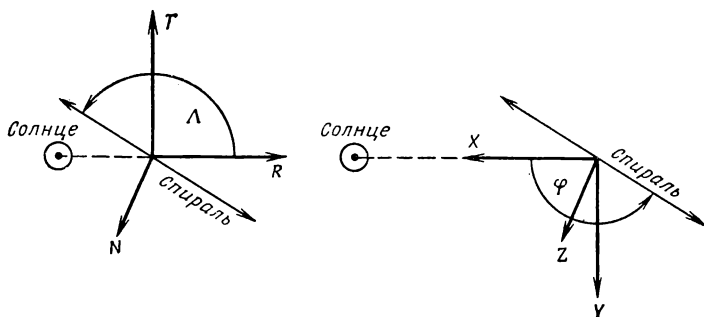


Рис. 2. Системы координат, используемые в экспериментах на «Маринере-2» (слева) и «ИМП-1» (справа). Широта в системе координат «Маринера-2» обозначается через β , в системе координат «ИМП-1» — через θ .

«ИМП-1»]. Направление движения планет совпадает с направлением оси T (касательная) и противоположно направлению оси $+Y$. Ось R «Маринера-2» направлена по радиусу от Солнца, ось X «ИМП-1» направлена по радиусу к Солнцу. Направление спирального поля в плоскости эклиптики показано долготными углами Λ и ϕ .

Стремление среднего значения составляющей поля, перпендикулярной плоскости эклиптики, к южному полюсу следует из того, что значения B_N и β , полученные «Маринером-2», и значения θ , полученные «ИМП-1», отрицательны. В обеих сериях данных B_N очень часто достигало значения -1γ . Трудно представить себе, чтобы среднее значение было меньше $0,1\gamma$. Если поле уносится и если среднее значение B_N составляет даже $0,1\gamma$, то уносимый лишь этой составляющей поток магнитного поля будет равен 10^{23} мкс/год. Эту величину довольно трудно объяснить: это поток ста типичных солнечных пятен.

Направление поля тоже озадачивает. В текущем 22-летнем цикле солнечной активности знаки поля в полярных областях Солнца такие же, как и у Земли. Таким образом, составляющая

B_N приблизительно дипольного поля, «выдуваемого» в плоскости солнечного экватора, имеет неправильный знак. Если вы утверждаете, что спиральная структура должна быть параллельна солнечной экваториальной плоскости, а не плоскости эклиптики, то обнаружите, что в декабре экваториальная плоскость наклонена на 7° с северо-запада на юго-восток. В таком случае существует корреляция между B_N и B_T , причем $B_N = B_T/8$. Вряд ли такая конфигурация поля может объяснить полученные данные, поскольку по наиболее надежным наблюдениям на «Маринере-2», выполненным в сентябре, такой зависимости не обнаружено. Однако для будущих наблюдений мы будем иметь в виду эту конфигурацию.

Отрицательный знак нормальной составляющей поля можно объяснить при помощи модели Бэбкока [1], согласно которой солнечный ветер уносит магнитные силовые линии с Солнца, что приводит к необходимости пересоединения магнитных силовых линий в короне. Модель Бэбкока дает правильный знак, но недостаточную величину потока. [Однако если правильно учесть запаздывание между изменением знака поля на полюсах и концом активности солнечных пятен около экватора, то эта модель тоже даст неправильный знак.]

Движение плазмы и геометрия поля

Рассмотрим воздействие движения плазмы на геометрию поля. Допустим, что где-то в короне установилась структура поля. Газ выходит наружу и достигает орбиты Земли. Что происходит при этом со структурой поля? По мере выхода газа будет происходить несильное скручивание поля. Такое скручивание можно назвать перемешиванием. Если бы перемешивание поля преобладало, то структура поля около Земли не имела бы ничего общего со структурой в короне. В таком случае было бы довольно трудно обнаружить какую-либо упорядоченную структуру межпланетного магнитного поля; нормальная составляющая поля не была бы преимущественно отрицательной и трудно было бы выявить довольно устойчивую радиальную составляющую поля, направленную от Солнца, которая удерживалась бы на одном уровне в течение 7—8 дней. Однако такие закономерности поля в межпланетном пространстве наблюдаются, следовательно, процесс перемешивания полей не играет существенной роли.

Возможно, поле ведет себя иначе. Рассмотрим прямоугольный объем, выходящий из Солнца в радиальном направлении без вращения и без сдвигов, но с разным характером расширения вдоль трех осей. Совсем не обязательно предполагать одно-

родное сферическое расширение вокруг Солнца. Допустим лишь, что этот объем движется радиально в небольшом конусе. Пусть L_R — длина объема в радиальном направлении, L_T — ширина в тангенциальном направлении и L_N — толщина в перпендикулярном направлении. Как изменяются размеры объема с расстоянием от Солнца (r)? Размеры, перпендикулярные радиусу (L_N и L_T), пропорциональны r . Если бы скорость солнечного ветра v была постоянной, то L_R не менялась бы, но если v меняется с r независимо от времени, то фронт объема ускоряется раньше задней части и L_R будет пропорциональна v . Если это недостаточно очевидно, то предположим, что $n(r)$ — концентрация частиц, и заметим, что $nL_R L_T L_N$ (число частиц в объеме) и $nvL_T L_N$ (поток, направленный наружу из конуса) остаются постоянными.

Поскольку вещество солнечного ветра — очень хороший проводник, магнитный поток через каждую стенку объема остается постоянным, и легко видеть, что произойдет с напряженностью магнитного поля. Радиальная составляющая B_R пропорциональна r^{-2} , а B_N и B_T пропорциональны $(nv)^{-1}$. Чтобы определить характер изменения структуры поля, рассмотрим B_T/B_R и B_N/B_R . Оба эти отношения пропорциональны r/v или, поскольку nvr^2 постоянно, nr^3 . Таким образом, если nr^3 увеличивается, то структура поля становится более плоской, а следовательно, будет содержать в основном тангенциальную и перпендикулярную составляющие. Если nr^3 уменьшается, то образование вытягивается в радиальном направлении и в основном содержит радиальную составляющую.

Любая разумная модель солнечного ветра позволяет получить оценки $n(r)$, пригодные для наших целей. Я использовал значения концентрации и скорости солнечного ветра, полученные Ноублом и Скарфом [2], при построении рис. 3. На рис. 3 показано отношение $nr^3/n_1r_1^3$, где нижний индекс относится к условиям на расстоянии 1 а.е. Если двигаться от орбиты Земли к Солнцу, то nr^3 уменьшается существенно, падая до величины, не превышающей одной десятой значения, наблюдаемого около Земли. Это значение достигается на расстоянии $\sim 1,3 R_\odot$, а в нижележащих областях короны nr^3 быстро возрастает. Таким образом, если структура поля формируется в короне ниже $1,3 R_\odot$ путем перемешивания магнитных силовых линий, а затем выходит наружу, сопровождаясь чистым расширением без дальнейшего перемешивания, то на расстоянии 1 а.е. эта структура вытянется в радиальном направлении. Структура поля укоротится в радиальном направлении по сравнению с начальной конфигурацией лишь в том случае, если она образуется выше $1,3 R_\odot$.

Третья характерная особенность — сдвиг. Солнце вращается с угловой скоростью Ω . Мы рассмотрели объем, который выходит из Солнца. Проследим за движением двух граней, перпендикулярных к радиусу. Предположим, что характер движения определяется только расстоянием от Солнца и что в любой момент внутренняя поверхность перемещается по тому же пути, что и внешняя поверхность, которая находилась в данном месте немного раньше, когда была на этом радиусе. Внутренняя

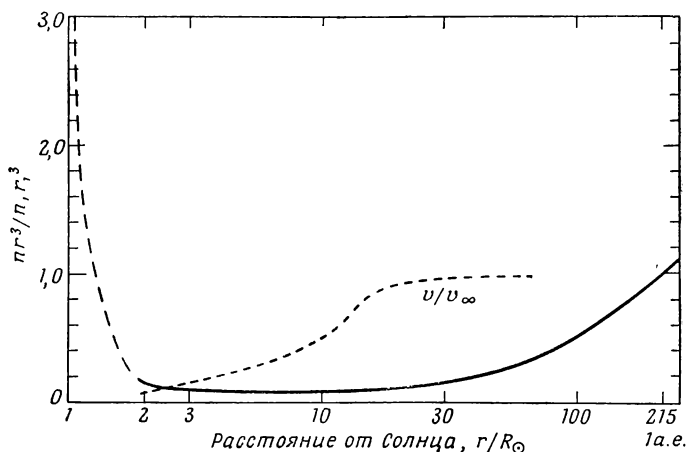


Рис. 3. Функция возмущения для однородного расширения солнечного ветра и скорость солнечного ветра.

поверхность сдвигается вращением Солнца немного дальше, чем внешняя поверхность объема, и объем сдвигается при этом на классический угол струи садового шланга

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{(\Omega - \omega) r}{v},$$

где $\omega(r)$ — угловая скорость солнечного ветра, определяемая из сохранения момента количества движения и магнитного натяжения. Близко к Солнцу, где v мало, а магнитное натяжение преобладает над движением, ω почти равно Ω , поэтому спиральность у Солнца невелика.

Итак, скомбинируем эффект сдвига и чистого расширения для того, чтобы увидеть, что произойдет со структурой поля в газе, когда он покидает Солнце. Находим, что

$$\frac{B_T}{B_R} = \left(\frac{B_T}{B_R} \right)_0 \frac{nr^3}{(nr^3)_0} - \frac{(\Omega - \omega) r}{v}. \quad (1)$$

Если около Земли большую часть времени поле близко по структуре к идеальной спирали, то в (1) преобладает последний член. В таком случае, если поток возникает значительно выше $1,3 R_{\odot}$, поле там будет почти радиальным. Если же поток возникает на уровне значительно ниже $1,3 R_{\odot}$, то большое значение $(\kappa r^2)_0$ в этой области подавляет первый член, т. е. на расстоянии $1,3 R_{\odot}$ поле становится радиальным, поскольку оно вытягивается по радиусу. Если же на расстоянии орбиты Земли структура поля не похожа на идеальную спираль (без учета перемешивания полей), то вполне возможно, что первый член играет важную роль и что структура вызвана тангенциальным полем, связанным с плазмой с самого начала.

Модели

Какого типа модели можно построить, исходя из этих фактов? Рассмотрим три возможности.

1) Модель, согласно которой небольшие нерегулярные структуры формируются в короне, а затем движутся наружу как более или менее самостоятельные образования. Хотелось бы, чтобы они возникали выше $1,3 R_{\odot}$, либо если облако образуется значительно ниже, то для его выхода потребовалось бы слишком много времени. Вид солнечных протуберанцев и движения вещества на Солнце указывают на то, что ниже этого уровня наблюдается слишком сильное перемешивание, чтобы образования оставались невозмущенными до тех пор, пока они не покинут Солнце. Облака, которые выходят как самостоятельные элементы с высоты $1,3 R_{\odot}$ (без дальнейшего перемешивания), возмущаются таким образом, что B_T/B_R и B_N/B_R увеличатся к тому моменту, когда облака окажутся на расстоянии 1 а. е. Не думаю, что мы наблюдаем такую картину в действительности, поэтому такие облака вряд ли можно считать важной составной частью предлагаемой модели¹⁾.

2) Модель, в которой над фотосферой могут подниматься короткие петли магнитных силовых линий²⁾. Верхняя часть петли выдувается плазмой каждые день-два, концы петель остаются связанными с Солнцем. Это модель Голда [3]³⁾, с тем лишь исключением, что я слишком точно указал временной

¹⁾ Существует другая точка зрения, согласно которой «магнитное поле и, вероятно, плазма корпускулярного эффективного потока соответствуют модели потока, состоящего из ряда дискретных крупномасштабных плазмондов («М-элементы»), имеющих собственное квазибессилое поле» [8*]. — *Прим. ред.*

²⁾ Петли принято также называть языками [4]. — *Прим. ред.*

³⁾ Аналогичная модель была разработана рядом других авторов [9*—12*]. — *Прим. перев.*

масштаб. Эта модель приводит к образованию полей классической спиральной структуры. Исключение составляют лишь те довольно редкие временные интервалы, когда наблюдается прохождение верхней части петли мимо наблюдателя. Довольно трудно отличить эти петли от петель модели Паркера [4]. Однако можно ожидать, что в этой модели радиальная составляющая изменяет знак с частотой, определяемой размером первоначальной малой петли. Вряд ли возможно, чтобы существовало протяженное образование, сохраняющее знак поля месяца за месяцем по мере вращения Солнца. Вероятно, в течение

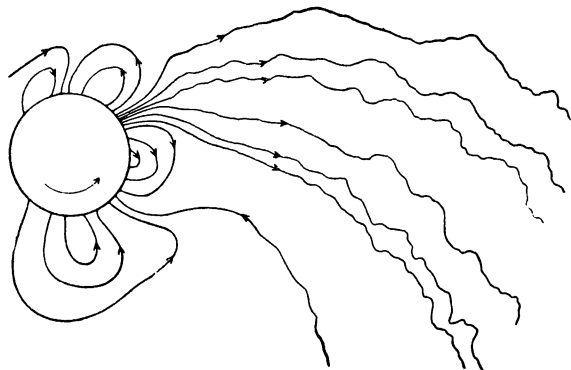


Рис. 4. Модель конфигурации плазмы и магнитного поля, выходящих через солнечную корону.

второй половины солнечного оборота, когда небольшие смещения нуля магнитометра на «Маринере-2» сильно изменили бы интерпретацию данных, эта модель могла бы соответствовать наблюдениям. Даже если это так, то я не очень симпатизирую этой модели.

3) Модель, которой я отдаю предпочтение, представлена на рис. 4. На расстоянии ~ 1 а.е. ($215 R_{\odot}$) отношение $B^2/8\pi$ (магнитное давление) к ρv^2 (плотность потока импульса солнечного ветра) очень мало, а следовательно, солнечный ветер преобладает: он раздувает магнитные силовые линии в направлении своего движения. Но если двигаться к Солнцу, то магнитные силы возрастают значительно быстрее, чем импульс потока. В пределах $10-20 R_{\odot}$ магнитное поле доминирует в среде, и в этой области имеется множество различных магнитных структур. Таким образом, вряд ли можно считать, что истечение газа происходит из фотосферы довольно равномерно со всей поверхности Солнца и что он проникает в корону, ускоряется в направлении от Солнца, образуя солнечный ветер. Магнитное поле напряженностью ~ 1 гс, имеющее соответствующую кон-

фигурацию, в состоянии подавить такое движение. Вероятно, газ находит место, где силовые линии гладкие и почти радиальные, и именно там он вытекает. Когда газ достигает достаточно большой высоты в короне, где локальные магнитные образования значительно слабее и имеют более правильную структуру, поднимающийся из каждого источника газ может растекаться и заполнять значительную часть верхней короны. Здесь нагретый газ набирает скорость и становится солнечным ветром. Следовательно, ветер, который приходит из протяженной области верхней короны, возникает в малой области фотосферы, где магнитное поле регулярно. Таким образом, полярность во всем объеме газа естественно должна быть одинаковой.

Характерные особенности модели

На рисунке видны несколько других характерных особенностей, которые я упомяну, но не буду обсуждать подробно. Нет оснований считать, что магнитное сопло, из которого вытекает солнечный ветер, должно быть направлено точно в радиальном направлении. Если сопло слегка наклонено в направлении вращения, то приходящий к Земле газ будет покидать Солнце, когда источник находится несколько восточнее центрального меридиана. Это частично объясняет несоответствие, обнаруженное Снайдером (гл. 2), между скоростью струй солнечного ветра и временем, прошедшим между прохождением кажущегося источника струи через центральный меридиан и прибытием высокоскоростного потока к «Маринеру-2».

Я не вижу оснований считать, что течение солнечного ветра является совершенно однородным и вытягивает магнитное поле в идеальную спиральную структуру. Данные наблюдений свидетельствуют о том, что на расстоянии 1 а.е. существуют различные иррегулярности с характерными временами от нескольких секунд и в редких случаях до нескольких минут, часов или дней. Если характерные времена умножить на скорость порядка 500 км/сек, то предполагаемые размеры неоднородностей будут изменяться от тысячи километров до существенной части астрономической единицы. Неоднородности переносятся не только со скоростью солнечного ветра; они должны также распространяться как магнитозвуковые волны. Заманчиво предположить, что во многих случаях они представляют собой альвеновские волны, которые изменяются больше по направлению, чем по величине, но в некоторых случаях более важную роль играет сжатие.

Неоднородности могут создаваться различными факторами: когда газ вытекает из магнитного сопла, он уже может со-

держат в себе магнитные структуры; течение может быть нерегулярным и неустойчивым; потоки различной скорости и концентрации могут взаимодействовать где-то между короной и космическим аппаратом.

Этот механизм возникновения солнечного ветра позволяет объяснить образование различных структур в межпланетном поле. Вполне возможно, что в некоторых волокнах высокая напряженность поля и низкое давление плазмы сменяется низкой напряженностью поля и высоким давлением.

Бирман. Где проходит граница, определяющая зону совместного вращения?

Дэвис. Вероятно, солнечный ветер возникает между $1-10R_{\odot}$ и в основном ускоряется в этой области. Если экстраполировать к Солнцу условия, наблюдаемые около Земли, то равновесие между магнитными силами и плотностью потока импульса или равенство скорости солнечного ветра и альвеновской скорости достигается между $10-20 R_{\odot}$. В пределах этих расстояний господствует магнитное поле. Можно предположить, что зона совместного с Солнцем вращения простирается вплоть до этой точки равновесия. Один из способов получить ответ на эти вопросы состоит в нахождении стационарного решения для вращающегося и движущегося наружу потока газа в области, где радиальная составляющая магнитного поля обладает сферической симметрией. Предполагается, что скорость однородного радиального истечения известна, а скорость углового вращения получается на основе равенства скорости изменения момента количества движения и магнитных сил. Видоизменение магнитного поля за счет углового вращения включено в эту модель. Можно ожидать, что тенденция газа сохранять кинетический момент приведет к наклону магнитных силовых линий назад, в сторону, противоположную направлению вращения. Это действительно имело бы место, если бы поле было относительно слабым, но там, где поле сильное, стационарное решение показывает, что магнитные силовые линии наклоняются вперед. Решение фактически невозможно, поскольку оно обладает сингулярностью на расстоянии, где альвеновская скорость равна скорости солнечного ветра. От этой особенности можно избавиться, если принять во внимание вязкость и конечную проводимость. Я предполагаю, что полученное в результате стационарного решения, в котором магнитные силовые линии около Солнца наклонены вперед, не устойчиво. Возможно, стационарного решения не существует и в области сильного магнитного поля происходят колебания силовых линий, которые создают нерегулярности поля, наблюдаемые дальше от Солнца. Однако до тех пор, пока эта модель не будет исследована более тщательно, любое предположение следует рассматривать просто как гипотезу.

Уилкокс. Можно ли ожидать, что магнитные силовые линии вытягиваются на одинаковое расстояние как в направлении, перпендикулярном плоскости эклиптики, так и в плоскости эклиптики.

Дэвис. Я предполагал, что магнитные силовые линии расходятся радиально в обоих направлениях, как если бы они исходили из центра Солнца. Если ввести соответствующие силы, чтобы получить нерадиальное движение ветра, то можно добиться, чтобы в направлении, перпендикулярном плоскости эклиптики, магнитное поле вытягивалось сильнее, чем в плоскости эклиптики.

Еще одна интересная особенность модели, показанной на рис. 4, состоит в том, что магнитные сопла могут иметь различные профили. До тех пор пока не будут получены более точ-

ные данные об условиях около Солнца, теоретик может предлагать любой приемлемый профиль. Таким образом, он может строить потоки почти с любой желаемой комбинацией скорости и концентрации. Попытка подогнать данные Нейгебауэр и Снайдера (см. гл. 1) к чисто радиальному магнитному соплу модели Паркера не увенчалась успехом. В модели Паркера наиболее легко изменяемые параметры — подводимая энергия или температура. Но когда какой-либо из этих параметров меняется, чтобы увеличить скорость солнечного ветра, то должна значительно возрасти концентрация. Магнитное сопло обеспечивает по крайней мере еще одну степень свободы, которая позволяет легко объяснить наблюдения.

Эффекты в обгоняющих потоках

Наконец, укажем на еще одну особенность, которую следует учесть при рассмотрении этих моделей. Из результатов Нейгебауэр и Снайдера следует, что из одних точек на Солнце газ истекает с большой скоростью, а из других — с малой. Такая структура сохраняется в течение нескольких солнечных оборотов. Мы наблюдаем эти потоки лишь тогда, когда они проносятся мимо космического аппарата; трудно поверить, что они не вращаются вместе с Солнцем. Что произойдет, когда вследствие вращения Солнца, быстрый поток плазмы начинает обгонять ранее испущенный более медленный поток? Рассмотрим это явление в системе координат, движущейся от Солнца в радиальном направлении с промежуточной скоростью.

Быстрый и медленный потоки будут течь вместе и сталкиваться. Газ обоих потоков будет скапливаться во все увеличивающейся промежуточной области, где концентрация, температура и давление газа и напряженность магнитного поля будут выше¹⁾. В любом случае образуются две ударные волны. Если разница в скорости движения газа обоих потоков невелика, то ударные волны будут очень слабыми и их очень трудно обнаружить. Если же разность скоростей примерно в два раза будет превышать магнитозвуковую скорость, характерную для этой области, то образовавшаяся ударная волна будет сильной, и ее легко обнаружить²⁾. Рис. 5 заимствован у Десслера и Феджера [5] и показывает структуру, которая может образоваться

¹⁾ Некоторые аспекты взаимодействия потоков рассмотрены в работах [13*, 14*]. — *Прим. ред.*

²⁾ Например, по внезапному началу, зарегистрированному на поверхности Земли. Эти вопросы довольно подробно рассмотрены в [15*]. Ударная волна в межпланетном пространстве была обнаружена 7 октября 1962 г. на «Маринере-2» (см. гл. 10). — *Прим. перев.*

при таких условиях. Стрелки вдоль точечной линии показывают скорость солнечного ветра в различных областях. Предполагается, что в области высоких скоростей между спиралями и в области низких скоростей вне спиралей скорость направлена точно вдоль радиуса. Поскольку ударные волны являются наклонными, поток преломляется, и между двумя ударными волнами возникает небольшая составляющая скорости в тангенциальном направлении. Газ, который перемещался быстрым потоком (замедляемый при прохождении через внутреннюю ударную волну), и газ, который перемещался медленным потоком

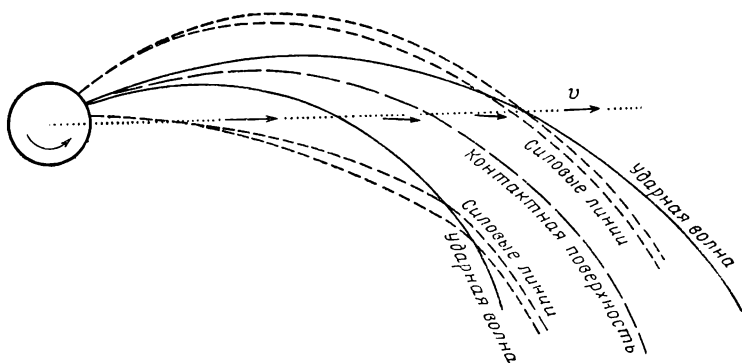


Рис. 5. Двойная ударная волна, образующаяся при обгоне медленного солнечного ветра более быстрым.

(ускоряемый при прохождении через внешнюю ударную волну), могут иметь различные температуры и концентрации, но их давление одинаково. Как показано на рис. 5, они разделены контактной поверхностью. Я предполагаю, что тангенциальные скорости по обе стороны от нее различны, что приводит к генерации волн и неустойчивости. В обоих невозмущенных областях магнитные силовые линии располагаются вдоль идеальных спиралей, соответствующих скорости солнечного ветра.

Проходя фронт ударной волны, магнитные силовые линии преломляются. Они должны проходить параллельно контактной поверхности, поскольку не могут пересекать ее. Я полагаю, что некоторые элементы этой двойной ударной волны следует включить в модель межпланетного магнитного поля, но я не исследовал этот вопрос в деталях¹⁾.

¹⁾ Более подробно структура солнечных плазменных потоков и их полей рассмотрена в [6*, 8*, 16*, 17*]. — Прим. перев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Babcock H. W., *Astrophys. J.*, **133**, 572 (1961).
2. Noble L. M., Scarf F. L., *Astrophys. J.*, **138**, 1169 (1963).
3. Gold T., *Astrophys. J.*, Suppl., **4**, 406 (1960).
4. Parker E. N., *Interplanetary Dynamical Processes*, Interscience Publ., Inc., New York—London, 1963. (Русский перевод: Е. Паркер, Динамические процессы в межпланетной среде, М., изд-во «Мир», 1965.)
5. Dessler A. J., Fejer J. A., *Planet. Space Sci.*, **11**, 505 (1963).
- 6*. Dessler A. J., *Rev. Geophys.*, **5**, № 1, 1 (1967).
- 7*. Michel F. C., *J. Geophys. Res.*, **72**, № 7, 1917 (1967).
- 8* Калинин Ю. Д., Могилевский Э. И., Исследования космического пространства, М., изд-во «Наука», 1965, стр. 368.
- 9*. Cocconi G., Greisen K., Morrison P., Gold T., Hayakawa S., *Nuovo Cimento, Suppl.*, II, **8**, 161 (1958).
- 10*. Piddington J. H., *Phys. Rev.*, **112**, 589 (1958).
- 11*. Steljes J. F., Carmichael H., McCracken K. G., *J. Geophys. Res.*, **66**, 1363 (1961).
- 12*. Obayashi T., *J. Geophys. Res.*, **67**, 1717 (1962).
- 13*. Афанасьева В. И., Калинин Ю. Д., Геомагнитные возмущения, М., Изд-во АН СССР, № 4, 5 (1960).
- 14*. Иванов К. Г., Геомагнетизм и аэрономия, **6**, № 2, 190 (1966).
- 15*. Razdan H., Colburn D. S., Sonett C. P., *Planet. Space Sci.*, **13**, 1111 (1965).
- 16*. Colburn D. S., Sonett C. P., *Space Sci. Rev.*, **5**, № 4, 439 (1966).
- 17*. Мустель Э. П., *Space Sci. Rev.*, **3**, 139 (1964).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА ДЭВИСА

Эксфорд. Замыкаются ли магнитные силовые линии?

Дэвис. $\text{div } \mathbf{B}$, несомненно, равна нулю. По-видимому, магнитные силовые линии замыкаются внутри Солнца. Любая магнитная силовая линия, которая входит в Солнце, также должна и выходить из него. Однако, если магнитное поле в течение нескольких месяцев выдувалось в одну из спиралей, показанных на рис. 5, то разумнее предположить, что магнитные силовые линии соединяются с силовыми линиями межзвездных полей и уходят в отдаленные части нашей Галактики. Вопрос о замкнутости этих силовых линий является бессмысленным, поскольку полный поток поля солнечной системы равен нулю.

Происхождение высокоскоростных потоков

Люст. Вы считаете, данные «Маринера-2» указывают, что на Солнце существуют области, из которых истечение газа идет особенно сильно. Одно время Снайдер тоже придерживался мысли, что почти вся наблюдаемая плазма испускается из ограниченного числа источников на Солнце. Поэтому очень важны результаты спутника «ИМП-1», поскольку они указывают, что солнечный ветер дует все время, даже в минимуме солнечной активности. Как совместить представление о солнечном ветре, дующем со всей поверхности Солнца, с представлением об устойчивом, интенсивном ветре, дующем лишь из определенных мест солнечной поверхности?

Дэвис. По-видимому, около Солнца существует много магнитных образований; дальше от Солнца эти магнитные образования «выметались» по той или иной причине, так что магнитные силовые линии приобретали более или

менее радиальное направление и имели различные полярности. Магнитное поле образует различного типа сопла. В одних местах такие сопла испускают потоки с более высокой скоростью и некоторой концентрацией, в других местах — потоки с меньшей скоростью и иной концентрацией. Солнечный ветер выходит со всей поверхности Солнца, но в различных местах обладает различными свойствами. Эта картина относительно устойчива. По мере эволюции полей иногда за период нескольких часов, а иногда нескольких месяцев картина меняется. Эта эволюция, по-видимому, может объяснить различия между данными «ИМП-1» и «Маринера-2».

Голд. О постоянных, долгоживущих структурах я хотел бы сказать, что скорость «отсечения» магнитных силовых линий сильно зависит от концентрации и скорости потока плазмы во всей области, в которой происходит отсечение.

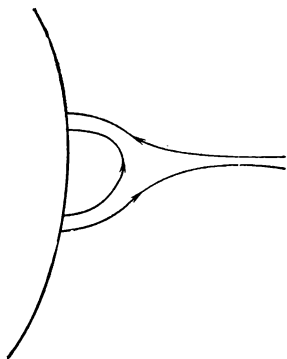


Рис. 6 Корональный выступ, связанный с «перетяжкой» магнитных силовых линий. Стрелками показано направление поля.

Если концентрация и скорость потока велики, то магнитной структуре довольно трудно оторваться. Если на Солнце существуют места, из которых газ все время выкачивается с довольно постоянной скоростью, то время жизни магнитных силовых линий будет очень большим. Но я видел снимки внезапных выбросов на Солнце, в которых газ выходит наружу с уровней хромосферы, где поля запутаны. Эти хромосферные выбросы вытягивают новые магнитные силовые линии, и до тех пор, пока они не отсекутся, полная напряженность поля Солнца на полюсах будет увеличиваться. К счастью, отсечение силовых линий происходит довольно быстро, когда выброс создает массу изверженного газа большой скорости, связанного с Солнцем лишь посредством магнитных силовых линий, на которых находится очень мало или почти нет газа.

Существует одна очень важная типичная корональная форма (рис. 6). Я хочу подчеркнуть, что часто наблюдаются не только вытянутые образования, но и образования типа выступов. Просмотрев примерно половину снимков

солнечного затмения, вы обнаружите по крайней мере одно такое образование на лимбе. Такое образование означает, что магнитные силовые линии были вытянуты и отсечены. Форма детали отчетливо указывает на существование выходящих магнитных силовых линий с одной стороны выступа и входящих магнитных силовых линий с другой его стороны.

Дэвис. Я не думаю, что существует большое расхождение. В течение цикла солнечной активности условия очень сильно меняются. Я полагаю, что в период полета «Маринера-2» имело место очень мало выбросов, которые привели бы к тому, что вещество уносилось с Солнца, поэтому неудивительно, что нам не удалось наблюдать в межпланетном пространстве отчетливого проявления таких выбросов. Однако в другие периоды солнечного цикла условия будут сильно отличаться.

Данжи. Високоскоростные потоки вытекают из флоккульных областей или из областей, расположенных между ними? Флоккульные области обладают как высокой температурой, так и большой напряженностью вертикальной составляющей поля. Кроме того, была обнаружена отрицательная корреляция между флоккулами и М-областями.

Дэвис. Легко и естественно создать модели, в которых имеется близкая связь между флоккульными областями и источниками высокоскоростных струй. Легко также придумать модели, в которых нет такой связи. Я пола-

гаю, что флоккулы включают в себя как фотосферные поля, так и энергию, необходимую для нагрева короны. Согласно моей картине, флоккулярная область расположена под основанием запутанного поля (см. рис. 4) и солнечный ветер вытекает из нее не так уж просто. Возможно, некоторая дополнительная энергия подается в корону посредством волн, распространяющихся из флоккулярной области¹⁾. Конфигурация магнитного поля может привести к созданию узкого сопла на небольшом расстоянии от источника энергии. В таком случае солнечный ветер будет выходить через это сопло, а не из области, где он приобретает большую часть своей энергии. Когда ветер достигает Земли, он действует на магнитосферу и вызывает магнитные бури, связанные с *M*-областями.

Данжи. Обнаружил ли Снайдер (см. гл. 2) источники между флоккулами?

Дэвис. Да, но я могу также объяснить полученные ими данные простым наклоном магнитного сопла. Я не знаю точно, куда поместить мои сопла, но, как мне кажется, их можно куда-нибудь «приспособить». [В настоящее время нам необходимы более точные наблюдения и тщательно разработанная теория течения газа в магнитном сопле; эта теория должна рассмотреть влияние кинетического момента газа и влияние наклона магнитных силовых линий.]

Дейч. Если я вас правильно понял, из флоккулярной области энергия должна передаваться вверх посредством волн, поскольку волны распространяются поперек поля легче, чем само вещество.

Дэвис. Я не рассматривал передачу энергии вдоль магнитных силовых линий, хотя этот процесс также играет важную роль.

Братенагл. Если рассмотреть достаточно серьезно модель Бэбкока и внимательно проследить ход его рассуждений, то можно распознать структуры такой же формы, как на рис. 6, но значительно меньших размеров. Можно представить всю иерархию таких структур в зависимости от предыдущей истории магнитного поля. Можно построить довольно хорошую модель спокойного протуберанца, образующегося из такой конфигурации. Я полагаю, можно приступить к изучению вопроса, как более мелкие элементы семейства «перетяжки» связаны со спокойными протуберанцами. Если топология поля этих мелкомасштабных элементов одинакова, то они обязательно должны располагаться на краях и линиях пересечения биполярных областей. Это, по-видимому, указывает на то, что сопла связаны с образованиями типа протуберанцев. Сопла могут иногда присоединяться к верхушкам спокойных протуберанцев. Но чаще всего они присоединяются к крупномасштабным элементам этого семейства еще выше в короне, где концентрация частиц настолько мала, что они больше не видны, за исключением высококачественных снимков солнечного затмения.

Атей. Я не понимаю попыток отнести характерные особенности, наблюдаемые в космическом пространстве, в нижние слои солнечной атмосферы. На большинстве фотографий короны многие образования в экваториальной области обнаруживают довольно сильное искривление. Если выбрать одно из таких образований в космическом пространстве на большом удалении от Солнца и попытаться привязать его к поверхности Солнца, то всегда можно обнаружить искривленность структуры, достаточную для смещения основания по крайней мере на угол, равный углу поворота Солнца за один-два дня. Поэтому я не думаю, что, используя какую-либо простую теорию, которая позволяет данную силовую линию, наблюдаемую в космическом пространстве, отнести к нижним уровням солнечной атмосферы, вы обнаружите совершенно точное соответствие характерных особенностей.

¹⁾ Вопрос о генерации магнитогидродинамических волн в солнечных пятнах рассмотрен М. Мариком [Астрон. ж., 43, № 2, 400 (1966)]. — *Прим. перев.*

Нейтральные точки и перетяжки

Петчек. Согласно картине Голда, должна существовать область, где ветер дует к Солнцу, а не от него. Можем ли мы наблюдать это?

Голд. Да. Возврат к Солнцу дугообразных силовых линий означает, что ветер дует внутрь. Если когда-либо удастся создать солнечные зонды, которые подойдут очень близко к Солнцу, то будет интересно обнаружить это явление.

Маловероятно, что такой процесс перетяжки имеет место в значительных масштабах за пределами 1 а. е., поскольку примерно на этом расстоянии возмущение столь велико, что процесс сжатия вещества очень длителен.

Паркер. Не может ли Голд подойти к доске и рассчитать, как он предполагает осуществить отсечение силовых линий?

Голд. В науке часто для объяснения наблюдаемых фактов прибегают к теоретическому механизму, детали которого порой недостаточно ясны. Тот факт, что мы не в состоянии рассчитать подробно некоторые процессы, совсем не означает, что было бы правильно игнорировать такую возможность или полностью ее исключать.

Я хотел бы переадресовать вопрос Петчеку, который имеет более глубокое и более ясное представление, чем я, о расчете процесса отсечения.

Петчек. Я намеревался рассмотреть эту проблему завтра в связи с границей магнитосферы (см. гл. 18). По моим расчетам, скорость сближения противоположно направленных магнитных силовых линий порядка альвеновской скорости, деленной на логарифм магнитного числа Рейнольдса. Поскольку логарифм может быть очень большим, то скорость сближения магнитных силовых линий может составлять всего лишь одну десятую альвеновской скорости. (Более полно этот основной процесс рассмотрен в гл. 15.)

Если нейтральная область уносится ветром, который движется со скоростью, в 10 раз превышающей альвеновскую, то область переместится на расстояние, в сто раз превышающее ее размеры, прежде чем будет отсечена. Несс (см. гл. 6) наблюдал, что обращение поля может произойти за ~ 1 час; при скорости солнечного ветра это соответствует расстоянию 0,01 а. е. Таким образом, вполне возможно, что силовые линии отсекаются на расстоянии от Солнца 1 а. е.

Я несколько обеспокоен картиной Голда, согласно которой поток, движущийся со скоростью, значительно превышающей альвеновскую, отсекается в одном и том же месте, а не в месте, переносимом солнечным ветром. Отсечение обязательно происходит со скоростью, меньшей альвеновской, тогда как скорость течения значительно выше альвеновской.

Паркер. Именно на этот момент обращал внимание Дэвис, и как раз это я имел в виду, когда просил Голда сделать расчет. Я хотел бы обратить его внимание на то, что неизбежность протекания этого отсечения с предполагаемой им скоростью не очевидна. Возможно, я не понял, сколько ему необходимо отсечь силовых линий. Сначала я думал, что требуется отсечь много силовых линий, но позднее решил, что не так много.

Голд. Я полагаю, что в период больших солнечных возмущений газ вырывается из областей, где напряженность поля порядка тысячи или по крайней мере нескольких сот гаусс. Если исходить лишь из этого и если газ в самом деле поднимается из хромосферы из областей, где поле равно 1000 гс, то надо допустить процесс отсечения силовых линий, чтобы сохранить среднюю напряженность поля на полюсах Солнца. Иначе массы газа, выдуваемого из одной возмущенной области, могло бы быть достаточно для создания всего магнитного поля межпланетного пространства. Поэтому облако газа с магнитным полем должно отсекаться примерно за время, в течение которого его заменит следующее такое облако, чтобы избежать увеличения общего потока поля, распространяющегося в космическое пространство.

Паркер. Почему вы считаете, что каждый выброс должен выносить новые силовые линии?

Голд. Я не вижу достаточно веских оснований в пользу того, что эти большие взрывы в хромосфере должны концентрироваться лишь в немногих местах, где магнитные силовые линии уже вышли на поверхность.

Паркер. Почему?

Голд. Поскольку на кинокадрах лимба наблюдается уярчение на уровнях, расположенных обычно ниже 10^4 км.

Паркер. Средняя высота вспышки составляет $3 \cdot 10^4$ км.

Голд. Но уярчение имеет место значительно ниже этого уровня, хотя я согласен, что большие скорости создаются вплоть до $3 \cdot 10^4$ — $4 \cdot 10^4$ км. Выбросы происходят в областях, где магнитные поля сильно локализованы и имеют высокую напряженность. Это области, где большинство силовых линий образуют крутые петли и возвращаются примерно в те места, откуда вышли. Я не убежден в том, что большие взрывы вытолкнул газ лишь в тех местах, где силовые линии уже вышли на поверхность.

Паркер. Значит, газ при выбросах фактически выходит из видимой части вспышки, а не с более высоких уровней короны?

Голд. Да. Думаю, что наблюдатели в общем согласятся с этой точкой зрения.

Паркер. Дуги при вспышках исключительно устойчивы.

Голд. Во вспышках на лимбе самая высокая скорость движения вещества чаще всего имеет место на более низких уровнях.

Дейч. Вы имеете в виду явление, связанное с выбросом, в котором направление движения вещества часто меняется на обратное?

Голд. Я считаю, что на кинокадрах мы наблюдаем такие же высокие скорости, которые, свойственны солнечному ветру. Максимальная скорость, которую нам удалось наблюдать, равна 1000 км/сек, часто наблюдается скорость 400 км/сек. Конечно, мы видим проекцию скорости. Хотя угол не известен, но все же в среднем видимая скорость меньше фактической. Эти наблюдения, как я полагаю, совместимы с теорией, из которой следует, что газ выбрасывается из Солнца в межпланетное пространство.

Дейч. Не наблюдаем ли мы обычно в таком случае вещество, которое поворачивает и возвращается обратно на Солнце?

Голд. Да, для большинства выбросов, но вспышки на лимбе наблюдаются очень редко. Лишь небольшая часть вспышек испускает газ. В противном случае в космическом пространстве скопилось бы слишком много газа, а напряженность магнитного поля была бы слишком высокой. [Тем не менее все же наблюдаются выбросы с большой скоростью, но без возвратного движения.]

Мид. На сколько градусов вектор скорости может отклоняться от радиального направления (см. рис. 5)? Может ли вектор скорости отклоняться от радиального направления, скажем, на 20° или же это отклонение составляет лишь несколько градусов?

Дэвис. Чтобы ответить на ваш вопрос, мне нужно затратить пару часов на расчет движения потока по уравнению Навье — Стокса. Некоторое преломление скорости имеет место, когда солнечный ветер проходит через наклонную ударную волну. Из выступлений, которые я слышал, остается предположить, что изменение направления будет составлять всего лишь несколько градусов, а не 20° . В соотношениях, которые я обсуждал ранее, число Маха дается выражением ¹⁾

$$M = \frac{v}{V_A} \sim v \frac{\sqrt{n}}{B}.$$

¹⁾ Автор имеет в виду альвеновское число Маха, хотя было бы более верно использовать магнитозвуковое число Маха. — *Прим. ред.*

Если магнитное поле обладает лишь радиальной составляющей, изменяющейся по закону $1/r^2$, то число Маха пропорционально $1/\sqrt{n}$ независимо от скорости солнечного ветра в момент его зарождения около Солнца. Концентрация частиц на расстоянии 1 а. е. составляет около 10 см^{-3} . Ветер образуется в нижних слоях короны, где концентрация на много порядков выше, а число Маха меньше 1. Процесс отсечения, о котором шла речь выше, может происходить очень эффективно на уровнях, упоминавшихся Голдом, — настолько эффективно, что, как мне кажется, вряд ли газ сможет выйти наружу. Сопло будет отсечено до того, как что-либо произойдет, если только этот процесс не будет приостановлен какими-либо свойствами структуры поля.

Уилкерсон. Как выглядит структура (см. рис. 6) в трехмерном пространстве?

Голд. В одной плоскости структура выглядит так, как показано на рис. 7, на котором изображена связь двух областей, когда магнитное поле



Рис. 7. Структура плазмы и магнитного поля, соответствующая корональному выступу, показанному на рис. 6.

отсекается. Имеются также возвратный поток и центральный нейтральный слой, который в идеализированном случае вытягивается на бесконечность в плоскости, перпендикулярной чертежу. Нейтральный слой извилистый, а не плоский, и кончается на смежных магнитных структурных образованиях. Нейтральный слой интересен тем, что он представляет собой довольно специфическую конфигурацию. Всякий выброс, при котором газ выносится далеко в космическое пространство, стремится унести магнитное поле. Это единственная причина, по которой такие выбросы обладают тенденцией создавать образования, подобные слою с нулевым полем.

Бирман. Связаны ли процесс отсечения и формирование намагниченного облака в моделях Голда и Дэвиса с подобными процессами, необходимыми Бэбкоку для его теории солнечного цикла? Мне казалось, что процессы, вероятно, протекают в больших масштабах, чем вы утверждали.

Дэвис. В понедельник среду и пятницу я верю в процесс вытягивания силовых линий, а во вторник, четверг и субботу или, вероятно, всего лишь раз в году, когда я думаю о модели Бэбкока, мне хочется нарисовать картинки с множеством пересоединений силовых линий над солнечными пятнами. В экваториальных широтах пересоединения нет. Относительно широтной зависимости этих процессов ничего неизвестно.

Братенягль. В модели Бэбкока важную роль играет пересоединение силовых линий между пятнами, а также пересоединение силовых линий поперек экватора. К сожалению, нет данных, указывающих на существование этого экваториального пересоединения по крайней мере в нижних слоях. Вероятно, его можно заметить в более высоких слоях короны на высококачественных снимках солнечного затмения

Я не вижу, почему бы этим пересоединениям не быть того типа, на который ссылается Бэбкок, даже если лишь их малая часть приведет к образованию новых полюсов. Большинство пересоединений довольно хаотичны и не дают вклада в дипольный момент Солнца. Таким образом, можно начертить

сколько угодно пересоединений, лишь бы не больше нескольких процентов из них давали вклад в поперечное поле.

Голд. Независимо от того, какая рассматривается модель, явления на поверхности Солнца показывают, что связанные структуры не могут быть долгоживущими. Необходимо разобраться в физике процесса пересоединения, чтобы затем понять необходимость перемены знака полярности солнечных пятен. Расчеты затухания поля вследствие диффузии показывают, что постоянная времени слишком велика; следовательно, мы имеем дело с другим процессом, а не с простым омическим затуханием. Я за теорию, согласно которой изменения возникают в результате процессов отсечения противоположно направленных смежных магнитных силовых линий. Мы наблюдали эти процессы вблизи Солнца в связи с изменениями поля в возмущенных областях солнечных пятен: мы видели их и в крупном масштабе в связи с необходимостью заполнения космического пространства полем без дополнительного вытягивания нового слишком большого потока поля. По-видимому, отсечение противоположно направленных магнитных силовых линий — это основной способ их пересоединения.

Бирман. Безусловно, в лабораторных экспериментах постоянство магнитного потока часто нарушается; и по причинам, которые мы недостаточно ясно понимаем, пересоединение магнитных силовых линий происходит значительно быстрее, чем это мы себе представляем. Следует изучить это явление в различных масштабах.

Что касается направления потока, то на расстоянии, превышающем, скажем, 0,5 а. е., данные о кометах показывают, что поток должен быть радиальным с точностью до нескольких градусов, исключая лишь периоды очень сильных возмущений. Однако в периоды бурь отклонение от радиального направления может оказаться значительно больше.

Люст. Важно знать временной масштаб процесса разъединения силовых линий в солнечном ветре, чтобы установить, где происходит разъединение: в солнечной атмосфере, во внешних ее частях или на некотором расстоянии от Солнца. Если временной масштаб процесса разъединения магнитных силовых линий примерно равен или меньше времени, затрачиваемого солнечным ветром на перемещение до Земли, то представление Голда о разъединении магнитных силовых линий в солнечном ветре является правильным. Если временной масштаб велик (порядка года), то в пределах орбиты Земли разъединение силовых линий невозможно. Тем не менее такое представление можно использовать в теории Эббока для объяснения знака магнитного поля Солнца.

Смит. Поскольку поля на рис. 4 являются трехмерными, мы возвращаемся к вопросу, как магнитные силовые линии соединяются в пространстве. Ваша модель, вероятно, позволяет магнитным силовым линиям возвращаться на другие широты. Однако если ограничиться наблюдениями, например в плоскости эклиптики, то можно и не увидеть возвращающиеся магнитные силовые линии. Мне кажется, что возможность возврата магнитных силовых линий на другие широты согласуется с данными наблюдений «Маринера-2».

Дэвис. Магнитные силовые линии, несомненно, могут возвращаться из пространства вне плоскости эклиптики. Если вы примете модель Голда и допустите, что существует множество выходящих наружу петель, то будете удивлены, не увидев одинакового числа плюсов и минусов. Они могут быть несвязанными, но их количество должно быть примерно одинаковым.

Если наблюдаются периоды в 10—12 дней, в течение которых в основном преобладает один знак поля, как это имело место в данных «Маринера-2», то говорят, что корни этих полей являются особыми. Кроме того, в то время на Солнце была большая униполярная область и мы не сможем

наблюдать такой эффект до тех пор, пока не появится другая подобная униполярная область.

Выступающий с места. Допустим, что пересоединение имеет место достаточно далеко от Солнца и может наблюдаться космическим зондом. Безусловно, нам хотелось бы измерить электрическое поле, которое является мерой скорости отсечения силовых линий, но это довольно трудная задача. Однако если такие электрические поля существуют, то частицы ускоряются. Соответствующие измерения ускоренных частиц могут дать представление об электрическом поле, а следовательно, и о скорости пересоединения.

Голд. Процессы пересоединения передают некоторое количество кинетической энергии частицам среды. Эта энергия сравнима с магнитной энергией газа в рассматриваемой области, что составляет 10% энергии течения. Некоторая часть турбулентности солнечного ветра может возникать за счет этого источника энергии. Иначе трудно объяснить наблюдаемые мелкомасштабные турбулентности в газе, который непрерывно испускается источником очень малой угловой протяженности.

ДАННЫЕ О БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ГИДРОМАГНИТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

К. П. Сонетт, Д. С. Колбон, Б. Р. Бриггс

Бесстолкновительная гидромагнитная ударная волна исследовалась теоретически и экспериментально [1—7]¹⁾. Это явление еще до конца не понято и большинство существующих моделей одномерны. Пока анализ явления должен основываться на наблюдениях. В данном сообщении будут приведены некоторые данные наблюдений и представлены полученные выводы.

Наблюдения

Рассматриваемое здесь событие наблюдалось почти одновременно в трех различных местах: на «Маринере-2», который находился на расстоянии $10,7 \cdot 10^6$ км от Земли и примерно на 33° восточнее линии Земля—Солнце; на Земле при помощи наземных магнитометров; на «Эксплорере-14», который в это время находился на орбите.

На рис. 1 показана модель этого события: приведены поток протонов и магнитное поле, наблюдавшиеся на «Маринере-2» 7 октября 1962 г. в течение 2 час. Время нарастает слева направо. На модели видны пять полосок, представляющих токи, которые наблюдались Нейгебауэр и Снайдером в различных энергетических каналах протонного анализатора (каналы 3—7). Сравнительно однородный поток регистрировался вплоть до 15 час. 47 мин. вс. вр., после чего имел место скачок преобладающего тока с 4-го на 5-й канал. Ток в канале наиболее низкой энергии (№ 3) уменьшился, и в это же время измеримый ток появился в 7-м канале. Этот скачок интерпретировался как следствие увеличения скорости направленного движения с 380 до 460 км/сек (см. гл. 1). В то же время концентрация увеличилась более чем в 2 раза (от 15 до 32 протон/см³) и существенно возросла температура протонов (от $1,2 \cdot 10^5$ до

¹⁾ См. также [9*—12*, 15*]. — *Прим. перев.*

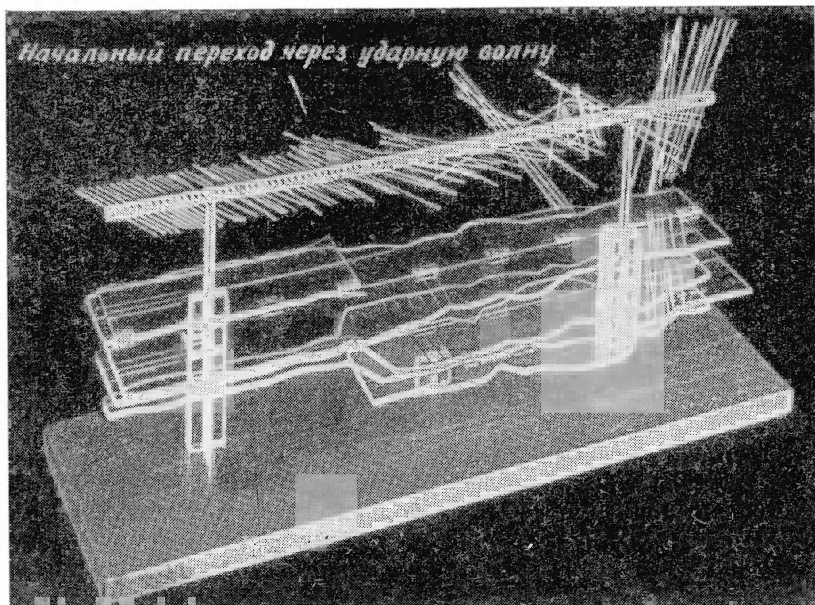


Рис. 1. Модель магнитного поля (*вверху*) и потока протонов (*внизу*) по наблюдениям на «Маринере-2» во время события 7 октября 1962 г.

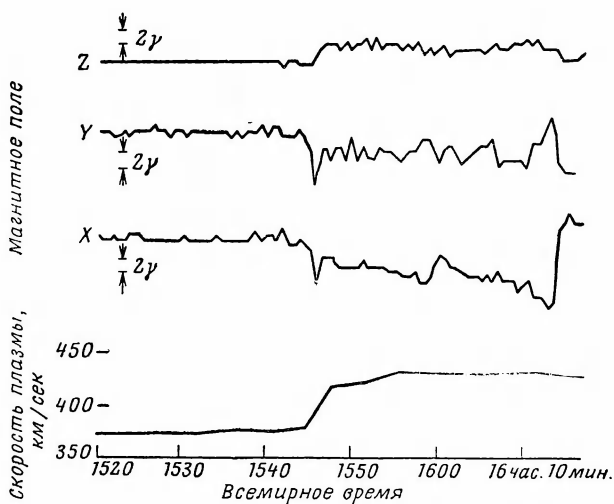


Рис. 2. Магнитное поле и скорость плазмы по наблюдениям на «Маринере-2» в период события 7 октября 1962 г.

$1,7 \cdot 10^5$ °К). Температура определяется по разбросу скоростей, наблюдаемому плазменным детектором.

В верхней части рис. 1 изображены векторы магнитного поля в рассматриваемый период. Эти величины исправлены по данным о смещении нуля магнитометра, которыми мы сейчас располагаем. Однако это исправление никак не влияет на вывод, что до 15 час. 47 мин. вс.вр. существовало однородное, устойчивое поле. В момент возрастания скорости плазмы в поле наблюдался магнитный импульс, после чего средний уровень поля изменился и стал колебаться. Хаотичность поля увеличилась со временем и длилась несколько часов.

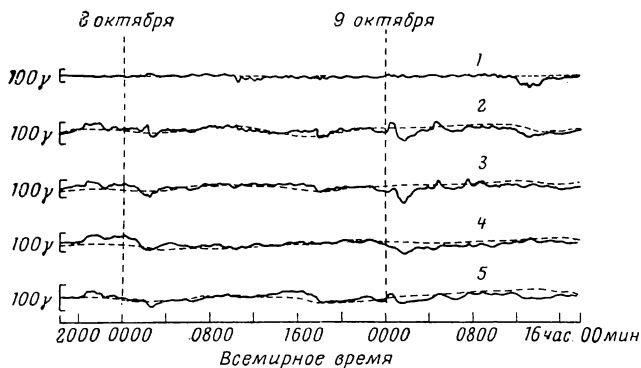


Рис. 3. Геомагнитные наблюдения на некоторых станциях (7—9 октября 1962 г.).

1 — Колледж, 2 — Фредериксберг, 3 — Тусон, 4 — Гонолулу, 5 — Сан-Хуан.

На рис. 2 представлены данные магнитометра в системе координат, связанной со спутником (определена в гл. 3). Как скачок, так и магнитный импульс характерны для многих теоретических анализов бесстолкновительных ударных волн. К тому же, по-видимому, наблюдается определенная структура поля с периодом, примерно в 2 раза превышающем 37 сек — интервал времени между двумя отсчетами магнитометра. Длина волны структуры должна составлять 35 000 км, что соответствует 100 гирорадиусам протона. Ширина фронта ударной волны несколько больше гирорадиуса, но, несомненно, значительно меньше средней длины свободного пробега.

На рис. 3 представлены магнитограммы наземных магнитометров за этот период. Внезапное начало было зарегистрировано на 51 станции в 20 час. 26 мин. вс. вр., т. е. 4,7 час спустя после наблюдения ударной волны на «Маринере-2». Это время запаздывания было использовано для вычисления скорости ударной волны.

На рис. 4 приведены соответствующие этому событию интенсивности потоков протонов, зарегистрированные Вольфом на «Эксплорере-14» при помощи плазменного зонда¹⁾. Сначала плазменный детектор не обнаруживал потока плазмы. Это объясняется тем, что зонд находился внутри магнитосферы Земли. Однако в пределах 2 мин, когда на наземных обсерваториях был зарегистрирован внезапный импульс, плазменный детектор начал регистрировать заметный поток протонов. Кроме того,

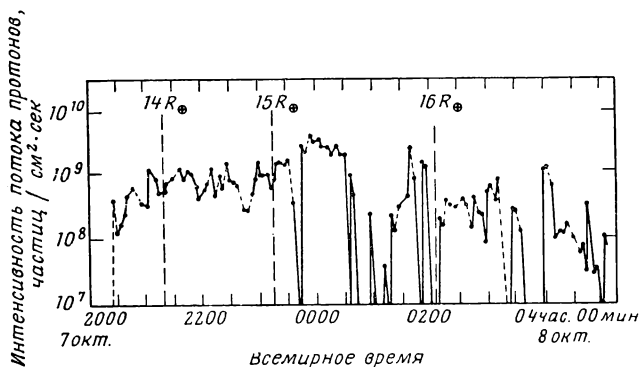


Рис. 4. Плазменные данные «Эксплорера-14», полученные 7 октября 1962 г. (по Вольфу).

поток был направлен в основном под углом 30° к линии Земля—Солнце и двигался от подсолнечной точки, что согласуется с движением протонов вокруг магнитосферы. Объяснить это явление можно тем, что внезапного изменения давления было достаточно для сжатия магнитосферы настолько, чтобы спутник «Эксплорер-14» оказался за пределами магнитосферы, где он зарегистрировал огибающие магнитосферу потоки протонов.

Свойства ударной волны

Положение «Маринера-2» показано на рис. 5. Линия Земля—Солнце определяет направление **R**; единичный вектор **T** лежит в плоскости эклиптики в направлении движения планеты, а **N** направлен к северу. Космический аппарат находился в стороне от линии Земля—Солнце на расстояниях, показанных на рисунке. Скорости движения космического аппарата и Земли

¹⁾ Более подробные сведения об измерении потоков протонов при помощи электростатического анализатора на «Эксплорере-14» в период геомагнитной бури 7 октября 1962 г. можно найти в работе Вольфа и Сильва [13*]. — *Прим. перев.*

были примерно равными (~ 30 км/сек). Направление распространения фронта ударной волны, полученное из данных маг-

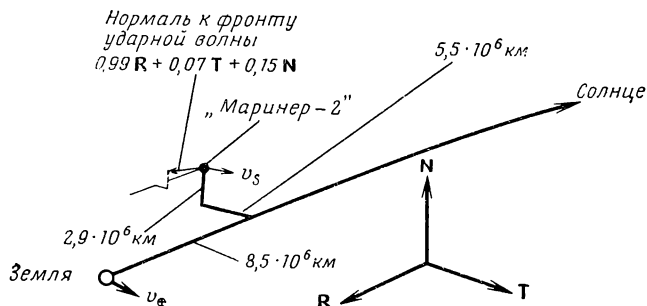


Рис. 5. Положение космического аппарата «Маринер-2» в гелиоцентрической системе координат.

нитного поля в соответствии с методикой, которая описывается ниже, несколько отклоняется от линии Земля — Солнце. Если построить плоскость фронта ударной волны в месте положения космического аппарата, то можно определить точку, в которой пересекается эта плоскость с линией Земля — Солнце. По времени запаздывания (4,7 час) и расстоянию между точкой пересечения и Землей вычислена скорость ударной волны, которая оказалась несколько больше скорости плазмы (число Маха для ударной волны равно $\sim 4,5$).

Зная магнитное поле перед ударным фронтом и за ним, можно установить положение фронта ударной волны следующим образом: фронт ударной волны должен содержать вектор $\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1$, где $\mathbf{B}_1$ и $\mathbf{B}_2$ — векторы магнитного поля перед ударным фронтом и за ним соответственно. Кроме того, можно показать, что плоскость, содержащая $\mathbf{B}_1$ и $\mathbf{B}_2$ (и их разность), пересекает под прямым углом фронт ударной волны. На рис. 6 показаны скорости и магнитные поля в системе координат, связанной с фронтом ударной волны.

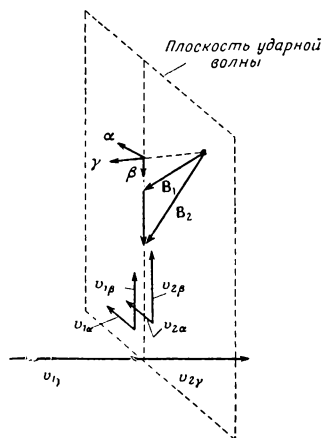


Рис. 6. Скорости и магнитные поля в системе координат, связанной с плоскостью фронта ударной волны. $B_2 \gamma = B_1 \gamma$;

$$|B_2 - B_1| = B_2 \beta - B_1 \beta,$$

$$B_1 \alpha = B_2 \alpha = 0, v_{2\alpha} = v_{1\alpha}.$$

Исследуем свойства рассматриваемого события в системе координат, связанной с фронтом ударной волны. Исходными параметрами будут магнитное поле с обеих сторон от фронта ударной волны; измеренная концентрация впереди ударной волны, принятая равной 15 протон/см^3 , и скорость впереди ударной волны, равная 380 км/сек . Предполагается, что скорость плазмы направлена вдоль солнечного радиуса. Чтобы получить значения скорости и концентрации частиц за фронтом ударной волны, мы использовали уравнения сохранения импульса и потока Ренкина—Гюгонио (см. [8])¹⁾. Затем вычисленные значения сравнивались с измеренными на «Маринере-2». Если это наклонная ударная волна, то изменение скорости должно происходить параллельно изменению магнитного поля. Поэтому позади фронта ударной волны вектор скорости должен иметь значительные составляющие T и N . Направление скорости нельзя определить по данным «Маринера-2», но численные значения можно сравнить. Результаты расчетов представлены в таблице.

Таблица

Измеренные и вычисленные параметры газа
перед и за ударной волной для $\gamma = 5/3$

Параметр	Перед ударной волной, измеренный	За ударной волной	
		вычисленный	измеренный
$B, 10^{-5} \text{ гц}$	$5R - 3,7T - 2,2N$	—	$5,9R - 9,3T - 6,1N$
$v, \text{ км/сек}$	$380R$	$450R + 10T + 14N$	$458R$
$n, \text{ см}^{-3}$	15 ± 2	34	32 ± 4
$T, ^\circ K$	$1,2 \cdot 10^5$ (измерено)	$2,4 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$
	$1,1 \cdot 10^5$ (вычислено)		
Число Маха	4,2	1,3	1,3

Замечание: Скорость ударной волны, равная $509R$, определена по времени распространения и вычисленному направлению нормали к фронту ударной волны.

Поправка на нуль магнитометра мало отличалась от приведенной Смитом (гл. 3). Позади фронта ударной волны вектор скорости плазмы отклонился от радиального направления примерно на 2° . Полученная концентрация согласуется с измеренной на «Маринере-2» при учете экспериментальных ошибок, вноси-

¹⁾ См. также [14*]. — *Прим. перев.*

мых преобразованием сигналов в цифровой код. При вычислении концентрации учитывались эффекты абберации вследствие движения спутника вокруг Солнца. Внесенная поправка в концентрацию соответствует отклонению потока от радиуса примерно на 2° . Оказывается, что этот эффект весьма незначителен. [Обнаружено, что альвеновское число Маха в газе позади ударной волны равно 1,3. Для расчета числа Маха, по-видимому, следует использовать скорость быстрой магнитозвуковой волны для данной ориентации поля¹⁾. Позади фронта ударной волны газ движется со скоростью, составляющей всего лишь 0,8 магнитозвуковой скорости. Определенное таким же образом магнитозвуковое число Маха до ударной волны равно 2,3.]

Проблема температуры

Для решения уравнения энергии необходимо было принять уравнение состояния. Мы взяли γ , равное $5/3$. Затем мы вычислили исходную и конечную температуры и сравнили полученные и измеренные значения. Из таблицы видно, что вычисленная разность температур фронта ударной волны значительно выше измеренной. При этом предполагалось, что для электронов наблюдается такой же скачок температуры, как для протонов.

На рис. 7 видно, как сказывается принимаемое значение γ на температуре. Если принять низкое значение γ , то получим более высокую вычисленную температуру, но меньшую разность температур. При больших значениях γ имеет место обратная картина. Некоторые теоретические исследования показывают, что $\gamma=2$, поскольку магнитное поле накладывает связь лишь на две степени свободы газа. Кроме того, было предположено, что энергия диссипирует в виде волн и что будет наблюдаться увеличение числа степеней свободы, связанное со структурой волны. Это привело бы к $\gamma=4/3$. Это наиболее слабое место в наших расчетах. Было бы интересно иметь другие признаки ударной волны²⁾ и другие расчеты, чтобы выбрать более точное подходящее значение γ .

Несмотря на все эти трудности, имелись определенные доказательства существования крутого фронта бесстолкновительной ударной волны, при переходе через который наблюдались

¹⁾ См. гл. 16. — *Прим. ред.*

²⁾ Эффекты, связанные с ударной волной, также наблюдались в межпланетном пространстве 8 июля 1966 г. на спутнике «Эксплорер-33» [16*]. — *Прим. перев.*

внезапные изменения скорости, концентрации частиц и магнитного поля. Крутизна фронта ударной волны сохранялась в течение 4,7 час, необходимых, чтобы достичь Земли, и на протяжении $\sim 0,05$ а. е. фронт двигался со сверхальвовенсовской скоростью

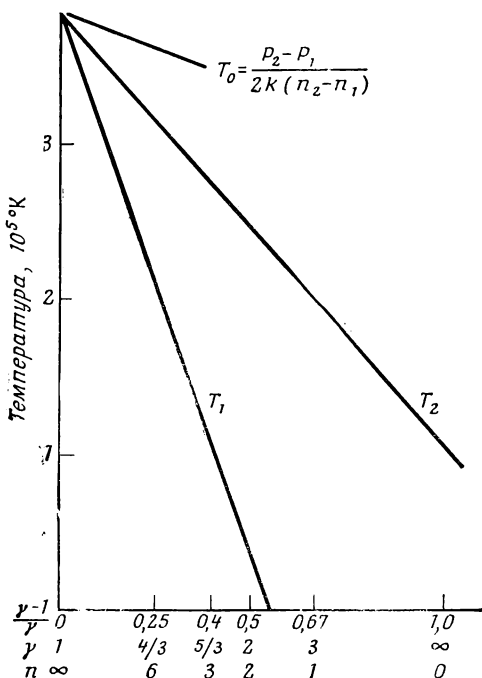


Рис. 7. Зависимость температуры от γ (отношение удельных теплоемкостей).

стью относительно газа, в котором он распространялся. Кроме того, соотношения Ренкина — Гюгонио, по-видимому, применимы для описания изменений поперек фронта ударной волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adlam J. H., Allen J. E., Phil. Mag., **3**, 448 (1958).
2. Auer P. L., Hurwitz H., Kilb R. W., Phys. of Fluids, **4**, 1105 (1961).
3. Davis L., Lüst R., Schlüter A. S., Zs. Naturforsch. **13a**, 916 (1958).
4. Dungey J. W., Phil. Mag., **4**, 585 (1959).
5. Sonett C. P., Colburn D. S., Davis L., Smith E. J., Coleman P. J., Phys. Rev. Letters, **13**, 153 (1964).
6. Gold T., Gas Dynamics of Cosmic Clouds, eds. H. C. van de Hulst, J. M. Burgers, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1955, p. 103.

7. Parker E. N., *Interplanetary Dynamical Processes*, Interscience Publishers, Inc., New York—London, 1963. (Русский перевод: Е. Паркер, Динамические процессы в межпланетной среде, М., изд-во «Мир», 1965.)
8. Thompson W. B., *An Introduction to Plasma Physics*, Pergamon Press, London, 1962, p. 92.
- 9*. Сагдеев Р. З., в сб. «Вопросы теории плазмы», вып. 4, Атомиздат, М., 1964, стр. 20.
- 10*. Jeffrey A., Taniuti T., *Non-Linear wave propagation*, Acad. Press, New York—London, 1964.
- 11*. Иванов К. Г., Геомагнетизм и аэрономия, **5**, № 3, 471 (1965).
- 12*. Colburn D. S., Sonett C. P., *Space Sci. Rev.*, **5**, № 4, 439 (1966).
- 13*. Wolfe J. H., Silva R. W., *J. Geophys. Res.*, **70**, № 15, 3575 (1965).
- 14*. Куликовский А. Г., Любимов Г. А., Магнитная гидродинамика, М., Физматгиз, 1962.
- 15*. Kennel C. F., Sagdeev R. Z., *J. Geophys. Res.*, **72**, № 13, 3303—3342 (1967).
- 16*. Van Allen J. A., Ness N. F., *J. Geophys. Res.*, **72**, № 3, 935 (1967).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА КОЛБОНА

Бирман. Что вы имеете в виду, говоря, что число Маха равнялось ~ 4 ?

Колбон. Если наблюдатель покоился относительно газа, то фронт ударной волны перемещался по направлению к наблюдателю со скоростью, в четыре раза превышающей альвеновскую скорость. Для газа за фронтом ударной волны число Маха должно быть меньше 1, хотя расчеты показали, что оно было немного больше 1. По-видимому, к этому привели некоторые допущения.

Дэвис. 509 км/сек — это скорость, с которой фронт ударной волны двигался от Солнца вдоль радиуса-вектора, или скорость, с которой фронт ударной волны двигался вдоль нормали?

Колбон. Это радиальная скорость и она на 4% больше скорости вдоль нормали, поскольку ударная волна была слегка наклонной.

Дэвис. Использовались ли вами какие-либо уравнения Максвелла?

Колбон. Да. Наряду с уравнениями сохранения потока, импульса и энергии мы решили уравнение непрерывности тангенциальной составляющей электрического поля.

Ольберт. Вы использовали формулу $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ для электрического поля по обе стороны ударной волны?

Колбон. Да.

Дэвис. У меня есть еще одно замечание, относящееся к некоторым вопросам, обсуждавшимся вчера (см. гл. 3). Только что представленные расчеты зависят от напряженности магнитного поля перед фронтом ударной волны и за ним. В свою очередь эта величина зависит от поля смещения самого аппарата. К моменту, когда Сонетт, Колбон и Бриггс приступили к исследованиям, мы не располагали оценками, представленными вчера. Они сделали интересный и подробный расчет, используя различные смещающие поля, и обнаружили, что для большинства смещающих полей космического аппарата результаты, по-видимому, не согласуются (см. гл. 3). Примерно к моменту, когда они были готовы сказать, какое смещающее поле согласуется с данными, мы почти могли сказать, каково было поле смещения. Эти величины согласуются очень хорошо, поэтому я отношусь с большим доверием к смещающим полям, приведенным Смитом во вчерашнем докладе, по крайней мере к данным 7 октября.

Несс. Но если вы делаете такого рода поправки на нуль магнитометра и доказываете, что они верны, лишь на основе внутреннего согласия, то вы

приходите к той же физике, из которой исходили. Если получаются довольно различные характеристики ударной волны при различных смещениях нуля феррозондового магнитометра, установленного на «Маринере-2», то это означает, что результаты сильно зависят от величины смещающих полей и что нужно точно знать эти величины, прежде чем можно будет понять физику явления.

Дэвис. Если данные не так хороши, как хотелось бы, то есть два выхода. Либо вообще не рассматривать их и ждать 11 лет до следующего солнечного цикла, либо исследовать все имеющиеся данные. Один из способов исследования состоит в том, что данные сравниваются с какой-либо надежной моделью и выясняется, согласуются ли они. Рассматриваемые данные соответствуют ударной волне и согласуются с большинством характеристик, которые, по-видимому, присущи ей. Расхождения таковы, что о них не стоит спорить.

Уилкерсон. С одной стороны, вы утверждаете, что получили согласие, за исключением небольших расхождений, о которых не следует говорить, однако, с другой стороны, температура отличается в 2 раза. Поскольку данные о температуре (т. е. согласие или несогласие с соотношениями Ренкина — Гюгонно) были очень полезны в прошлом при изучении ударных волн в лаборатории, я не понимаю, как можно одновременно пользоваться обоими доводами.

Я согласен с тем, что следует попытаться найти все возможное. Но поскольку мы мало знаем об ударных волнах такого типа, то рискованно использовать такие самосогласованные доводы для проверки справедливости экспериментальных данных и теории.

Дэвис. Температура — удобный параметр для описания энергии хаотического движения газа. Измеряемые температуры могут несколько отличаться от вычисленных значений.

Несс. В момент регистрации протонов на «Эксплорере-14» находился ли спутник внутри головной ударной волны Земли?

Колбон. Да. Данные согласуются с представлением о том, что «Эксплорер-14» находился вне магнитосферы, но перед фронтом ударной волны, ибо если бы он был за пределами фронта головной ударной волны, то следовало бы ожидать, что поток двигался от Солнца. Позднее на «Эксплорере-14» действительно наблюдался поток, который приходил прямо от Солнца. Это означает, что в это время спутник находился за пределами фронта головной ударной волны.

Уилкерсон. Если вы считаете, что уравнения состояния справедливы, то следует предусмотреть изменчивость γ , чтобы объяснить дополнительные степени свободы (т. е. турбулентность), создаваемые ударной волной. Может быть, стоило бы проанализировать влияние изменения γ ?

Смит. Температуры, наблюдаемые перед и за ударной волной, согласуются лишь с одним значением γ ?

Колбон. Нет.

Петчек. Нельзя ли решить проблему, предположив, что часть энергии перешла к электронам? Из уравнения сохранения энергии мы знаем лишь суммарную температуру электронов и ионов.

Колбон. Если считать, что электронам и протонам сообщается одинаковое количество энергии, то мы получаем результат, изложенный мною выше. Если бы можно было утверждать, что большая часть энергии переходит к электронам, то вычисленная температура лучше согласовывалась бы с экспериментом. По-видимому, один из зондов при прохождении через головную ударную волну регистрировал главным образом электроны, а не протоны. Отсюда можно предположить, что электроны получили основную часть энергии.

Дэвис. Из обсуждения различия температур α -частиц и протонов (доклад Нейгебауэр, гл. 1) следует, что должно наблюдаться сильное отклоне-

ние от максвелловского распределения по обе стороны от фронта ударной волны.

Весьма заманчиво предположить, что газ начинает двигаться со сравнительно небольшой энергией хаотического движения и что при прохождении газа через ударную волну часть энергии направленного движения преобразуется в более или менее хаотическое движение. Если в этом процессе избыточная энергия переходит в круговое движение частиц вокруг силовых линий, то температура α -частиц будет в 4 раза больше температуры протонов. Это очень хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Ольберт. Хотелось бы узнать, идентичны ли температура, определенная Снайдером и Нейгебауэр, и температура, используемая в этой статье при $\gamma = 5/3$. Я считал, что вычисленные Снайдером и Нейгебауэр температуры основаны исключительно на одномерном хаотическом движении.

Нейгебауэр. Мы вычисляли температуру по разбросу скоростей в радиальном направлении, который определяется по ширине максимума скорости. В нашей последней работе мы предположили, что хаотическое движение является изотропным, хотя мы могли измерять лишь одну координату. Таким образом, оба определения температуры идентичны.

Несс. Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли дает нам дополнительную информацию, согласно которой γ заключено между $5/3$ и 2. Я рассмотрю этот вопрос завтра в моем выступлении (см. гл. 22).

Колбон. Я хотел бы добавить, что, несмотря на неопределенности в наших расчетах, цель рассмотрения одного-единственного явления состояла не в том, чтобы разобраться в его физике, а чтобы наметить пути и методы последующих исследований.

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В СОЛНЕЧНОЙ ФОТОСФЕРЕ ¹⁾

Р. Б. Лейтон

После доклада Дэвиса (см. гл. 9) развернулась довольно горячая дискуссия относительно того, как магнитные силовые линии, начинающиеся в фотосфере Солнца, соединяются и как они могут пересоединяться в зависимости от фазы солнечной активности. Исследователи в Калтече, на обсерватории Маунт Вилсон и в других местах измеряли магнитные поля в солнечной фотосфере и построили довольно хорошую картину полей на этом уровне. Исследователи, которые пытались проследить магнитные силовые линии в космическом пространстве, по-видимому, не всегда в достаточной степени учитывали то, что мы знаем о структуре магнитного поля. Поэтому стоит кратко описать представления о магнитных силовых линиях.

На рис. 1 приведена запись магнитных полей в области группы солнечных пятен. Если пренебречь крупномасштабными дефектами (полосы и т. д., которые не являются магнитными полями) и мелкими деталями (которые представляют собой шумы и пылинки), то останутся темные и светлые области неправильной формы. Допустим, что темные площади соответствуют полям северной полярности, а светлые площади — полям южной полярности. Видно, что имеется ряд биполярных областей, полярность которых в двух полушариях Солнца противоположная (экватор проходит примерно по середине картинки). На рис. 1 видно, что магнитные поля обладают пятнистой структурой, но имеют одинаковую полярность над довольно обширными областями. Отдельные северные и южные области достигают значительных размеров, разрастаясь из небольших областей северной и южной полярности, образовавшихся из солнечных пятен.

В правой части рис. 2 представлена магнитная структура с яркими областями, скажем, южной полярности и темными — северной полярности. Этот рисунок показывает, что представление о магнитных полях можно в известном смысле получить,

¹⁾ Более полные сведения о магнитных полях на Солнце можно получить из работ [1*—6*]. — *Прим. перев.*



Рис. 1. Карта фотосферных магнитных полей. Светлые и темные площади имеют противоположные полярности.

наблюдая хромосферу (рис. 2 слева). При внимательном рассмотрении видно, что везде, где существует область концентрированного магнитного поля, наблюдается соответствующая область излучения в хромосфере. Я обращаю внимание на это соответствие, потому что, изучая спектрогелиограмму, можно догадаться, где магнитное поле входит в Солнце и где оно покидает Солнце. Это означает, что напряженность магнитного

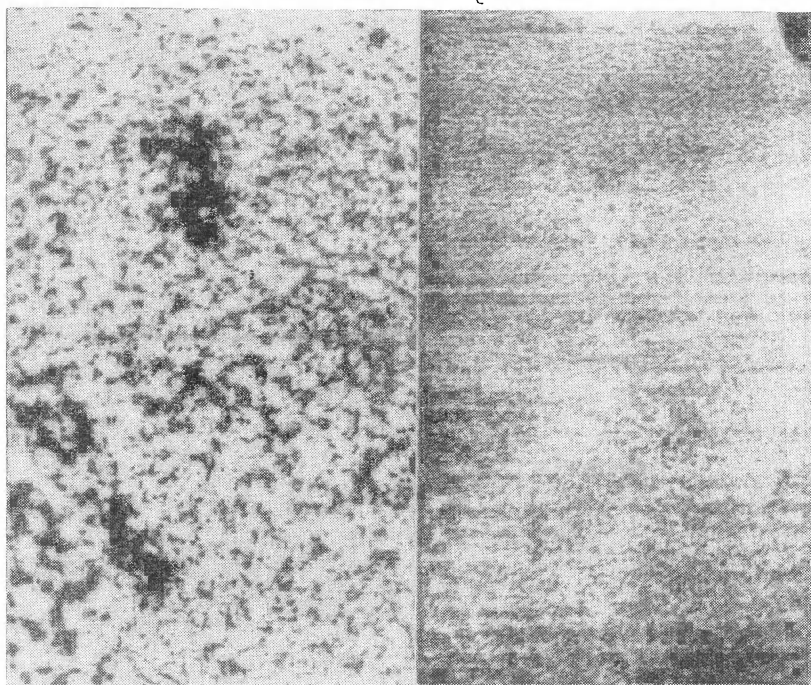


Рис. 2. Магнитная карта (*справа*) и спектрогелиограмма хромосферной эмиссии (*слева*) активной области на Солнце.

поля в области хромосферных факелов, окружающих группы солнечных пятен, высока.

На рис. 3 показана спектрогелиограмма в свете линии $H\alpha$. Здесь яркие области представляют собой концентрации магнитного поля. Но на этом рисунке видны также темные волокна, которые, по-видимому, постоянно разделяют области полей противоположной полярности. Таким образом, можно сказать с некоторой уверенностью, что силовые линии, выходящие из яркой области и расположенные по одну сторону этой предпо-



Р и с. 3. Спектрогелиограмма активной области с волокнами на диске в свете линии $H\alpha$.

лагаемой границы нулевого магнитного поля, должны заканчиваться недалеко по другую сторону волокна.

В таком случае можно вообразить магнитные силовые линии, начинающиеся близко с одной стороны от таких границ и петляющие на другую сторону границы. Эти силовые линии связаны со спокойными протуберанцами, располагающимися вдоль линии раздела между областями полей разной полярности. Эти границы очень устойчивы в течение нескольких солнечных оборотов, протуберанец будет появляться почти на том же месте, что и в предыдущем обороте. При этом будет наблюдаться вытягивание и изменение вследствие дифференциального вращения Солнца.

Я пытаюсь установить некоторые принципы, по которым можно определить, где проходят силовые линии. На рис. 3 вы видите эффект концентрации силовых линий около групп солнечных пятен.

На рис. 4 показан более ранний вариант магнитографического представления магнитного поля на Солнце. При помощи этого рисунка, вероятно, можно понять мелкомасштабные поля с вариациями напряженности в пределах области от 10 000 до 20 000 км, которые представляют концентрации магнитного поля, показанные на предыдущих рисунках. Однако мы обратили внимание, что поля сохраняют одинаковую полярность над значительной областью Солнца, они не могут входить и выходить на сравнительно небольшой площади. Безусловно, существуют места, где магнитные поля значительно сильнее, соответствующие областям, в которых недавно наблюдались группы солнечных пятен. В полярных областях существует тенденция, заключающаяся в том, что средняя величина поля не равна нулю; это наталкивает на мысль о существовании общего дипольного момента Солнца.

Таким образом, если бы я начертил картину магнитных силовых линий на основе уравнения $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, с которым все согласны, то биполярные области магнитного поля иногда были бы вкраплены в более обширные области более слабого поля. Около полюсов Солнца могли бы существовать сравнительно протяженные области противоположных полярностей.

В таком случае силовые линии концентрировались бы в виде узких каналов, но с одинаковой полярностью в довольно обширных областях. В некоторых других местах на Солнце наблюдалась бы аналогичная концентрация силовых линий, но направление их было бы иным. Вероятно, вы могли бы нарисовать небольшие петли, соединяющие части биполярной области, но поскольку эта область может располагаться внутри более обширной области, то некоторые силовые линии будут прости-

ратся на очень большие расстояния, прежде чем пересоединятся. Где именно они пересоединятся, я не знаю. Однако всякий раз, когда вы вычерчиваете силовую линию, которая удаляется в космическое пространство, следует также начертить силовую линию, которая возвращается в область аналогичного типа. Силовые линии, покидающие протяженную униполярную область, должны автоматически возвращаться в другую униполярную область почти таких же размеров.

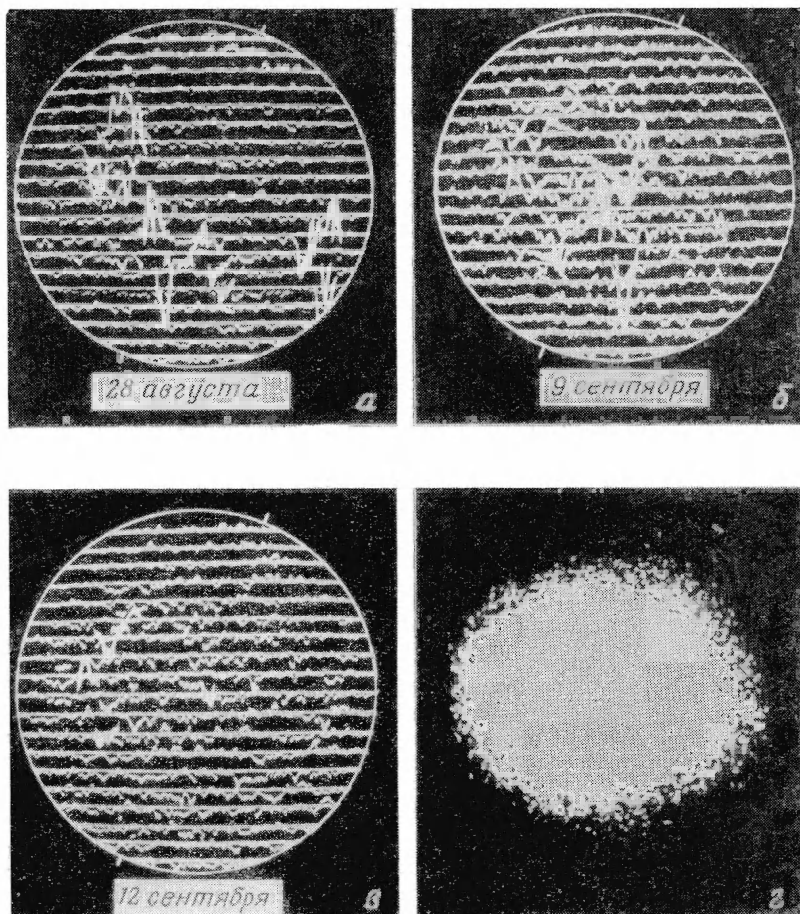


Рис. 4. Солнечные магнитограммы (а — в) и спектрогелиограмма (г). Фотографии получены на обсерваториях Маунт Вилсон и Маунт Паломар в 1952 г.

Интересно было бы изучить, как силовые линии видоизменяются выбросом вещества в самом начале событий взрывного характера, которые имеют место в прифотосферном слое.

ЛИТЕРАТУРА

- 1*. de Jager C., Structure and Dynamics of the Solar Atmosphere, Handbuch der Phys., Bd. 52, Springer, Berlin, 1959. (Русский перевод: К. де Ягер, Строение и динамика атмосферы Солнца, М., ИЛ, 1962.)
- 2*. Thomas R. N., Athey R. G., Physics of the Chromosphere, Interscience Publ. Inc., New York, 1961. (Русский перевод: Р. Томас, Р. Атей, Физика солнечной хромосферы, М., изд-во «Мир», 1965.)
- 3*. Пикельнер С. Б., Основы космической электродинамики, М., Физматгиз, 1961.
- 4*. Жулин И. А., Иошпа Б. А., Могилевский Э. И., Геомагнетизм и аэрномия, 2, № 4, 585, 1962.
- 5*. Северный А. Б., Успехи физ. наук, 88, вып. 1, 3, 1966.
- 6*. Bray R., Loughhead R., Sunspots, Chapman and Hall Ltd., London, 1964. (Русский перевод: Р. Брей, Р. Лоухед, Солнечные пятна, М., изд-во «Мир», 1967.)

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА ЛЕЙТОНА

Смит. Считаете ли вы, что некоторые силовые линии, соединяющие большие униполярные области, пересекают экватор?

Лейтон. Да. Силовые линии должны возвращаться к Солнцу.

Смит. Я заметил, что волокна поворачивались на некоторый угол. Направлены ли силовые линии под прямым углом к волокнам?

Лейтон. Волокно является границей между двумя областями противоположной полярности. Силовые линии пересекают волокно почти под прямым углом к нему.

Смит. Следовательно, можно найти силовые линии, которые выходят из Солнца на одной широте и входят в Солнце на другой широте?

Лейтон. Да.

Смит. В таком случае некоторые силовые линии в конце концов окажутся направленными из плоскости эклиптики. По-видимому, мы все были до некоторой степени жертвами того факта, что вынуждены чертить фигуры на плоскости, так что мы смотрим либо в плоскость эклиптики, либо в плоскость, перпендикулярную ей.

Если следовать модели Лейтона, то по мере вращения Солнца мы будем наблюдать поля преимущественно одной полярности. Поскольку мы производим наблюдения лишь в плоскости эклиптики, нам не удастся увидеть направленные в противоположную сторону магнитные силовые линии, которые возвращаются на Солнце на некоторой другой широте. Отсюда следует, что результаты, наблюдавшиеся на «Маринере-2», могут оказаться справедливыми, причем это зависит главным образом от того, каково смещающее поле космического аппарата. Тот факт, что поле, по-видимому, направлено преимущественно от Солнца в течение полного солнечного оборота, не противоречит физике. Трудно установить, сохраняется ли магнитный поток лишь по наблюдениям в плоскости эклиптики.

Я хотел бы прокомментировать некоторые различия между существующими моделями межпланетного магнитного поля. Некоторые различия скорее кажущиеся, чем реальные. Голд и другие предпочитают говорить о вытягивании петель магнитных силовых линий из Солнца. Они хотят придать направ-

ление силовым линиям и представить себе область в межпланетном пространстве, где силовые линии искривляются и возвращаются к Солнцу.

Раз магнитные силовые линии покинули Солнце, то они могут вытягиваться на большое расстояние. Протяженность межпланетной полости неизвестна; по вычислениям Дэвиса, радиус полости равен 50, а то и 100 а. е. Данные «Маринера-2» показывают, что на Солнце существовало несколько долгоживущих областей. Плазма из такой области непрерывно вытекает в космическое пространство, так что место, в котором магнитные силовые линии меняют направление, вскоре пронесется мимо орбиты Земли и оказывается за пределами наблюдаемого космического аппарата, вероятно, на расстоянии многих десятков астрономических единиц.

Поскольку Солнце вращается, то следует ожидать существования спиральной структуры силовых линий из долгоживущей области. Я представляю себе модель, которую описал Пиддингтон и по которой Десслер высказал свои критические замечания. Можно ожидать, что на расстоянии орбиты Земли спиральное магнитное поле направлено под углом $\sim 45^\circ$ к радиусу-вектору Солнца. Поскольку испускание плазмы продолжается, то этот угол может достиг 90° далеко за пределами 1 а. е. Если магнитные силовые линии возникли в небольшой биполярной области на Солнце (например, в группе солнечных пятен), то будут наблюдаться близко расположенные, но противоположно направленные спиральные силовые линии. Если бы имелось несколько таких долгоживущих возмущенных областей, то в течение 27-дневного периода было бы зарегистрировано несколько таких изменений полярности магнитного поля. В таком случае в области космического пространства в пределах 1 а. е. наблюдалась бы картина, весьма схожая с моделью Паркера, хотя Паркер не рассматривал вопрос о возвращении силовых линий.

Однако, как показал Лейтон, нет оснований предполагать, что эта ситуация является простой. Дэвис сделал аналогичное замечание относительно своих исследований солнечных магнитограмм, которые показали, что простирающееся наружу магнитное поле солнечного пятна становится очень слабым. Силовые линии, которые начинаются около плоскости эклиптики в одном месте, могут возвращаться в другое место значительно дальше от плоскости эклиптики, так что возвращение силовой линии может быть и не обнаружено на космическом аппарате.

Уилкокс. Базисная линия для магнитометра, установленного на «Маринере-2», была выбрана таким образом, что радиальная составляющая магнитного поля была всегда положительной в течение нескольких солнечных оборотов. Однако если изучить магнитограммы для любой широты в течение нескольких оборотов Солнца, то почти всегда можно обнаружить приближенное равенство между положительной и отрицательной полярностями: почти невозможно найти два оборота Солнца, в течение которых наблюдалась бы исключительно положительная полярность. Даже если учесть полностью ваши замечания относительно магнитных силовых линий, выходящих из плоскости эклиптики, то трудно ожидать, что в течение двух оборотов будет постоянно наблюдаться положительная полярность.

Колеман. Мы¹⁾ исследовали ориентацию составляющей магнитного поля, перпендикулярной к радиусу Солнца. Если принять грубое спиральное поле любого типа, то следует ожидать, что эта составляющая будет иметь одно направление для силовой линии, покидающей Солнце, и противоположное направление для силовой линии, возвращающейся к Солнцу. В течение первых 60 дней мы наблюдали такие изменения в этой поперечной составляющей поля. Нам хорошо известны нули магнитометров в этот период. Мы не искали какой-либо еще корреляции между направлением и напряженностью поля, чтобы установить, равняется ли нулю грубо усредненный поток поля.

¹⁾ Экспериментаторы, работающие с магнитометром «Маринера-2».

Но мы все же знаем, что в течение двух первых оборотов Солнца в малом временном интервале направление поля менялось на противоположное.

Уилкокс. Могут ли объяснить что-либо магнитограммы?

Колмен. Глядя на рисунки, показанные Лейтоном, хотелось бы думать, что на Солнце могут существовать условия, при которых одна полярность видна лучше другой в течение любого данного оборота. Вряд ли такие условия могут сохраняться очень долго, но, возможно, они существовали в период наблюдений на «Маринере-2».

Лейтон. Такие условия могут сохраняться очень долго. Северный и южный полюса Солнца отнюдь не обладают одинаковой напряженностью поля или одинаковым потоком магнитного поля. Если вы полагаете, что силовые линии, выходящие из одного полюса, должны возвращаться куда-нибудь еще, но не на другой полюс, то лучшее место — это экватор. Очень трудно измерять полный поток магнитного поля, выходящего из любой области, поскольку калибровка магнитограмм никогда не бывает достаточно хорошей. Не будет ошибкой считать, что несколько лет подряд может существовать в среднем поле южной полярности, хаотически распределенное вблизи экватора.

ПРОНИКНОВЕНИЕ ГАЛАКТИЧЕСКИХ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СОЛНЕЧНУЮ СИСТЕМУ¹⁾*Е. Н. Паркер***Межпланетные магнитные поля**

Силовые линии межпланетных магнитных полей берут свое начало на Солнце и вытягиваются солнечным ветром в космическое пространство. Магнитные поля движутся от Солнца с солнечным ветром, унося с собой все заряженные частицы. Галактические космические лучи, заполняющие межзвездное пространство, проникают в солнечную систему через несущиеся от Солнца магнитные поля, так что интенсивность космических лучей сильно уменьшается в глубине солнечной системы [1, 2]. Изменение условий на Солнце оказывает влияние как на солнечный ветер, так и на магнитные поля и приводит к вариациям интенсивности космических лучей.

Представление о структуре межпланетного магнитного поля основано на предположениях, что:

а) истечение ионизованного газа из Солнца происходит почти радиально;

б) магнитные силовые линии, переносимые газом, обычно прикреплены к Солнцу по крайней мере в течение нескольких дней после того, как они его покинули;

в) Солнце вращается с угловой скоростью Ω . Следовательно, магнитные силовые линии в межпланетном пространстве имеют форму архимедовых спиралей [2—4]

$$r = \frac{v (\varphi - \varphi_0)}{\Omega}. \quad (1)$$

Составляющие магнитного поля можно записать в следующем виде:

$$B_r \sim \left(\frac{B_\odot}{r} \right)^2, \\ B_\theta = 0 \quad (2)$$

¹⁾ С экспериментальными и теоретическими исследованиями космических лучей можно познакомиться по монографиям Л. И. Дормана [23*] и В. Л. Гинзбурга и С. И. Сыроватского [24*]. — *Прим. перев.*

и

$$B_{\varphi} \sim \frac{R_{\odot} \Omega}{v} \frac{R_{\odot}}{r} \sin \theta$$

для любой спиральной силовой линии. Здесь r — радиальное расстояние, θ — полярный угол и φ — азимут, измеряемый вокруг Солнца. Общий вид структуры магнитного поля показан на рис. 1.

Эта общая спиральная структура поля, по-видимому, простирается в космическое пространство на расстояние, которого

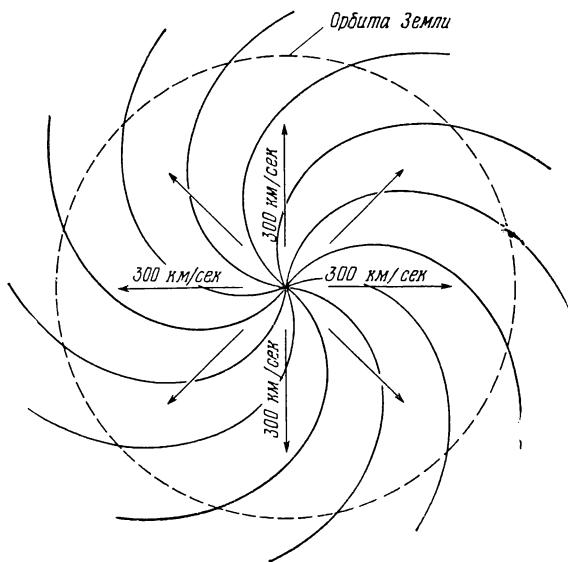


Рис. 1. Силовые линии спокойного межпланетного магнитного поля, возникающего в результате вытягивания общего солнечного поля идеализированным однородным спокойным солнечным ветром со скоростью ~ 300 км/сек.

достигает солнечный ветер (~ 10 — 100 а. е. [2, 5]¹⁾). На основную структуру поля накладывается целый ряд малых и больших нерегулярностей, вызванных вариациями v в зависимости от θ , φ и t , вариациями $B(\theta, \varphi)$ с t , неустойчивостями в солнечном ветре и т. д. [2, 6].

Эффект Форбуша

Основное гладкое поле само по себе не должно сильно препятствовать проникновению космических лучей внутрь солнеч-

¹⁾ Фаус считает, что до 15—500 а. е. [25*]. — Прим. ред.

ной системы. Однако возмущения в магнитном поле могут оказать чрезвычайно эффективное сопротивление. Например, внезапный выброс в солнечной короне приводит к возникновению ударной волны, которая распространяется через всю солнечную систему за ее пределы. На рис. 2 показано искажение основной структуры магнитного поля идеализированной ударной волной (число Маха равно бесконечности, сферическая симметрия и т. д.); ударная волна подталкивается с постоянной скоростью

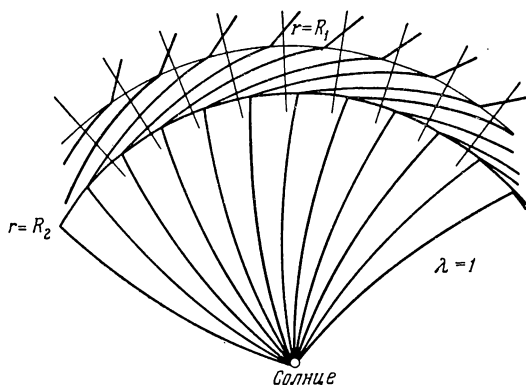


Рис. 2. Искажение спокойного межпланетного поля ударной волной. Радиус ударной волны R_1 определяется отношением v/Ω и для скорости спокойного солнечного ветра 440 км/сек равен 1 а. е.

возмущенной короной. Важная особенность этой волны состоит в том, что она сжимает магнитное поле, которое вследствие этого становится отражателем космических лучей. При сжатии магнитного поля в f раз коэффициент отражения $1 - 1/f$ может достигать 90% или больше. При такой высокой отражательной способности наблюдается тенденция изоляции пространства между волной и Солнцем, так что отдельные частицы космических лучей остаются в этой области в течение нескольких часов. В период такого «заклучения» частицы испытывают адиабатическое расширение, приводящее к уменьшению плотности энергии космических лучей на 50%¹⁾.

¹⁾ Вопросы адиабатического охлаждения космических лучей, переносимых магнитными полями в солнечном ветре, и последующего изменения их энергетического спектра в солнечной системе рассмотрены в одной из последних работ Паркера [26*]. — Прим. перев.

На рис. 3 представлен энергетический спектр этого уменьшения ($\Delta\mu/\mu_0$), вычисленный для идеализированной ударной волны, показанной на рис. 2. Протяженность плоской части спектра зависит от толщины ($R_1 - R_2$) области сжатого магнитного поля. Плоская часть спектра может простирается

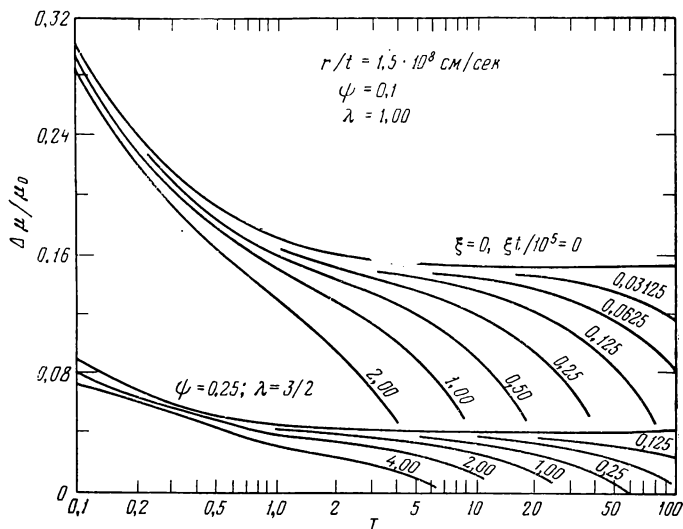


Рис. 3. Энергетический спектр относительного понижения $\Delta\mu/\mu_0$ плотности космических лучей в случае ударной волны, сильно подталкиваемой возмущенной короной ($\lambda=1,0$; $\psi=0,1$), и в случае свободно распространяющейся волны ($\lambda=1,5$; $\psi=0,25$) с учетом дрейфа частиц (эффективность дрейфа характеризуется параметрами для частиц в области за ударной волной). (Здесь радиус ударной волны пропорционален $t^{1/\lambda}$, определяя λ ; ψ является эффективным коэффициентом прозрачности ударной волны.)

Приведенные кривые применимы к протонам, так что T представляет энергию, измеряемую в единицах энергии покоя протона ~ 931 Мэв. Средняя скорость взрывной волны r/t при ее движении между Солнцем и Землей принята равной $1,5 \cdot 10^8$ см/сек. Для случая $\lambda=1$ кривые изображают временные изменения энергетического спектра $\Delta\mu/\mu_0$ при замене ξ на $\xi t/10^5$. В других случаях кривые соответствуют понижению после прохождения волны в момент $t=10^5$ сек.

вплоть до энергий 10^{11} эв. Полное понижение устанавливается за время, в течение которого взрывная волна проносится мимо наблюдателя (этот временной период может изменяться от нескольких часов в случае одиночной ударной волны до нескольких дней в случае нескольких последовательных ударных волн). В период фазы восстановления кривая $\Delta\mu/\mu_0$ постепенно ста-

новится круче, что показано на рис. 3. Для эффекта Форбуша характерны резкое начало и плоский энергетический спектр ¹⁾ [2, 7].

Одиннадцатилетние вариации

Движение наружу мелкомасштабных неоднородностей (от 10^5 до 10^7 км) в рассматриваемой структуре магнитного поля непрерывно понижает интенсивность космических лучей в области солнечной системы в пределах земной орбиты. Для иллюстрации некоторых общих физических свойств этого понижения используем идеализацию Моррисона [8], предложенную им много лет назад при рассмотрении конвективного переноса космических лучей внутри облаков с неупорядоченным магнитным полем. Он предположил, что движение частицы изотропно и беспорядочно, а длина свободного пробега ²⁾ сравнима с размером неоднородностей. По-видимому, поле не настолько неупорядоченно, чтобы можно было считать строгой такую трактовку движения частиц. Эффективный коэффициент диффузии, вероятно, больше вдоль поля, чем перпендикулярно ему. Но этот анализ пригоден для иллюстрации физических следствий неупорядоченности магнитного поля. Коэффициент диффузии принимается равным одной трети произведения длины свободного пробега на скорость частицы. В системе координат, движущейся вместе с магнитной неоднородностью, результирующий диффузионный поток частиц равен $-KVN$, где N — число частиц космических лучей в единице объема. Неоднородности движутся примерно со скоростью солнечного ветра v , так что при рассмотрении настоящей задачи следует учесть дополнительный член, связанный с переносом космических частиц Nv . В таком случае полный переносимый поток F составляет $Nv - KVN$. Для стационарных условий закон сохранения количества частиц дает $\nabla \cdot F = 0$. В идеальном случае сферической симметрии относительно Солнца получаем $F = 0$. В результате интегрирования этого выражения получим $N(r) = N_0 e^{-n}$, где n — интеграл от v/K , взятый от r до межзвездного пространства, а N_0 — концентрация космических лучей в межзвездном пространстве. Типичное значение транспортного пробега для рассеяния $10^{11} - 10^{12}$ см дает $K = 10^{21} - 10^{22}$ см²/сек, причем понижение интенсивности потока космических лучей заключено в пределах от

¹⁾ Эффект Форбуша, который наблюдается после вспышки на Солнце, не следует смешивать с рекуррентными 27-суточными бурями космических лучей, которые характеризуются более плавным началом и более мягким спектром.

²⁾ Иногда вместо выражения «длина пробега» пользуются выражением «транспортный пробег для рассеяния» [23*]. — *Прим. ред.*

$e^{6,0}$ до $e^{0,6}$ соответственно для скорости солнечного ветра 400 км/сек на протяжении 10 а.е.

Таким образом, понижение интенсивности галактических космических лучей в солнечной системе велико и неопределенно. Предполагаемые вариации σ и K с солнечной активностью должны создать наблюдаемую 11-летнюю вариацию космических лучей [1, 2]. Недавний анализ, выполненный Симпсоном [9], позволил обнаружить запаздывание вариации интенсивности космических лучей по отношению к вариациям солнечной активности. Это запаздывание различно для восходящей и нисходящей ветви цикла солнечной активности и зависит от энергии частиц, но общая величина запаздывания указывает на то, что диффузия космических лучей через межпланетные магнитные поля может начинаться с расстояния 30 а.е., куда солнечный ветер прибывает примерно через 4 месяца после прохождения орбиты Земли.

Энергетический спектр понижения интенсивности космических лучей, вызванного неоднородностями магнитного поля, зависит до некоторой степени от формы и размеров неоднородностей [2, 10]. Понижение интенсивности уменьшается с увеличением энергии частиц и не является таким плоским, как спектр при эффекте Форбуша. Для простых моделей [1, 2] энергия изменяется пропорционально $E^{-\gamma}$, где γ равно 0,5—2. Анализ наблюдений дал целый ряд результатов, но все они заключены в этих пределах.

27-дневные вариации

27-дневные повторяющиеся понижения плотности космических лучей, по-видимому, являются следствием усиления скорости солнечного ветра и увеличения неупорядоченности магнитного поля, связанного с активными областями на Солнце. Сарабайя [11] высказал мнение, что быстро движущийся солнечный ветер, испускаемый из некоторых горячих областей короны, скапливается внутри более медленно движущегося солнечного ветра, испущенного из других областей на Солнце, и что это скопление может быть ответственно за большую часть рекуррентных вариаций.

Суточные вариации

Хорошо известная суточная вариация интенсивности космических лучей [12, 13] представляет собой поток космических лучей, движущийся со скоростью 400 км/сек в направлении орбитального движения Земли. Этот поток — следствие нало-

жения двух эффектов. Во-первых, в окрестности земной орбиты межпланетное магнитное поле является полурегулярным [14, 15], так что частицы стремятся двигаться вдоль силовых линий, а не диффундировать перпендикулярно к ним. Во-вторых, существующие за пределами орбиты Земли неоднородности магнитного поля [1, 16] допускают диффузию, достаточную для нейтрализации любых градиентов интенсивностей космических лучей по θ и ϕ , которые могут быть созданы поляризационным полем $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}/c$ по мере проникновения частиц в солнечную систему [17]. Конечный результат сводится к тому, что основной поток космических лучей в окрестности Земли ограничивается электрическим дрейфом $\mathbf{u} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} = \mathbf{v}_\perp$ и движением с произвольной скоростью $\mathbf{v}_\parallel$ вдоль магнитных силовых линий. Тот факт, что не существует общего радиального потока при стационарных условиях, определяет $\mathbf{v}_\parallel$. Легко показать, что общая скорость потока $\mathbf{V} + \mathbf{v}_\parallel$ равна $\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}$ и является скоростью жестко связанного с Солнцем вращения, что согласуется с наблюдениями.

Нерешенные задачи

Выше мы рассмотрели физику проникновения межзвездных космических лучей в солнечную систему. Чтобы развить количественную сторону модели, необходимы дополнительные, в основном численные данные о межпланетных магнитных полях как в окрестности земной орбиты, так и вдали от нее. Теория, поясненная идеализированными примерами, показывает, что изменение интенсивности космических лучей на расстоянии 1 а. е. зависит главным образом от неоднородностей, накладывающихся на основную спиральную конфигурацию магнитного поля [определенного уравнениями (1) и (2)]. Чтобы получить более глубокое представление о вариациях космических лучей, необходимо сконцентрировать наблюдения на природе этих магнитных неоднородностей. Проводимые в настоящее время экспериментальные исследования ([18—20] и гл. 1, 4, 6, 8) помогут лучше понять условия в период низкой солнечной активности. Будущие наблюдения позволят больше узнать об условиях в периоды возрастания солнечной активности.

Следует указать на несколько нерешенных задач. Во-первых, на повестке дня стоит вопрос улучшения модели изотропного беспорядочного движения. Эта модель пригодна лишь для качественного анализа распространения космических лучей, но ее нельзя использовать для количественных расчетов. Эффективный коэффициент диффузии $K_\parallel$ (вдоль магнитного поля) должен превышать коэффициент диффузии $K_\perp$ [2, 10]. Другая трактовка вопроса была недавно предложена

Эксфордом [21]. Он предполагает, что скорость направленного движения космических лучей $\mathbf{u}$ определяется из условия:

$$0 = e(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}/c) + m\kappa(\mathbf{v} - \mathbf{u}), \quad (3)$$

где κ — частота столкновений отдельных космических частиц с магнитными неоднородностями. Он получил член, стоящий в правой части, рассмотрев аналогичную диффузионную ситуацию в частично ионизованном газе, в котором $\mathbf{u}$ — скорость ионов, $\mathbf{v}$ — скорость нейтральных атомов, а κ — частота столкновений ион—нейтральный атом.

Во-вторых, нужно решить: насколько выше концентрация межзвездных космических лучей по сравнению с концентрацией космических лучей, наблюдаемых в окрестностях Земли в период минимума активности солнечных пятен? Часто полагают, что эти концентрации равны. Однако в настоящее время имеются некоторые указания на то, что концентрация межзвездных космических лучей, вероятно, значительно выше концентрации космических лучей, наблюдаемых около Земли в период минимума пятнообразовательной деятельности¹⁾. Мы не располагаем данными наблюдений в космическом пространстве, которые свидетельствовали бы о том, что солнечный ветер значительно слабее в течение настоящего минимума солнечной активности²⁾, чем за несколько лет до минимума³⁾. Таким образом, можно ожидать, что относительное изменение $-\Delta n/n$ в n [$n = \int (v/K) dr$] было малым, скажем, меньше 0,1. Однако концентрация космических лучей около Земли $\exp[-n(1 - \Delta n/n)]$ увеличилась примерно на 40%. Если $\Delta n/n$ будет значительно меньше 1, тогда как e^{-n} изменяется на 40%, то n должно быть несколько больше 1. Кроме того, в период минимума солнечной активности суточная вариация по существу не уменьшается, указывая на то, что n по крайней мере порядка единицы. Поэтому возможно, что концентрация космических лучей в межзвездном пространстве значительно выше концентрации, наблюдаемой в окрестности Земли в период минимума пятнообразовательной деятельности Солнца.

Сравним теперь энергию частиц космических лучей в окрестности Земли с энергией частиц космических лучей в межзвезд-

¹⁾ В одной из последних работ Паркер высказывает мнение, что плотность энергии и давление галактических космических лучей в межзвездном пространстве ненамного превышает соответствующие значения в окрестности Земли [27*]. — *Прим. перев.*

²⁾ Имеется в виду 1963—1964 гг. — *Прим. ред.*

³⁾ Данные «Маринера-2» и «ИМП-1», по-видимому, свидетельствуют о том, что солнечный ветер был сильнее в 1962 г. по сравнению с 1963 г. [28*, 29*]. — *Прим. перев.*

ном пространстве. Недавно мы вычислили, как долго частица космических лучей межзвездного пространства может находиться в межпланетном поле, прежде чем она будет зарегистрирована на Земле [22]. Используя простую модель, в которой магнитное поле за пределами орбиты Земли полностью неупорядоченное (эта модель дает верный порядок величины), найдем, что типичная космическая частица, наблюдаемая на Земле, проводит в солнечной системе несколько дней. В течение этого времени она испытывает адиабатическое замедление в расширяющихся магнитных полях, которые переносятся солнечным ветром. А когда частица наблюдается на Земле, ее энергия может быть в два раза меньше той энергии, которой она обладала до проникновения в солнечную систему.

Вообще мы предполагаем, что плотность энергии космических лучей в межзвездном пространстве может быть гораздо больше плотности энергии, наблюдаемой в окрестности Земли в период минимума пятнообразовательной активности Солнца. Этот вопрос представляет интерес не только для изучения проникновения космических лучей в солнечную систему, но также и для изучения динамики галактического пространства. Даже если давление космических лучей в межзвездном пространстве равнялось бы лишь 10^{-12} *дин/см²* (как наблюдается с Земли), то давление космических лучей преобладало бы над газовым давлением [1]. Таким образом, последствия более высокой плотности энергии космических лучей в межпланетном пространстве (скажем, 10^{-11} *эрг/см³*) были бы весьма существенны. Доводы в пользу более высокой плотности энергии ни в коем случае нельзя считать надежными, и мы привели их скорее для того, чтобы указать на существующие трудности. Плотность энергии космических лучей межзвездного пространства неизвестна, и для нас очень важно определить ее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Parker E. N., Phys. Rev., **110**, 1445 (1958).
2. Parker E. N., Interplanetary Dynamical Processes, Interscience Publ., a division of John Wiley and Sons, Inc., New York—London, 1963. (Русский перевод: Е. Н. Паркер, Динамические процессы в межпланетной среде, М., изд-во «Мир», 1965.)
3. Parker E. N., Astrophys. J., **128**, 664 (1958).
4. Parker E. N., Phys. Rev., **109**, 1328 (1958).
5. Parker E. N., Astrophys. J., **134**, 20 (1961).
6. Parker E. N., Phys. Rev., **109**, 1874 (1958).
7. Parker E. N., Astrophys. J., **133**, 1014 (1961).
8. Morrison P., Phys. Rev., **101**, 1397 (1956).
9. Simpson J. A., Proceedings of the Study Week on the Problem of Cosmic Rays in Interplanetary Space, Pontifical Academy of Science, Vatican City, 1962, p. 323.

10. Parker E. N., J. Geophys. Res., **69**, 1755 (1964).
11. Sarabhai V., J. Geophys. Res., **68**, 1555 (1963).
12. Rao U. R., McCracken K. G., Venkatesan D., J. Geophys. Res., **68**, 345 (1963).
13. Bercovitch M., J. Geophys. Res., **68**, 4366 (1963).
14. Steljes J. F., Carmichael H., McCracken K. G., J. Geophys. Res., **66**, 1363 (1961).
15. McCracken K. G., J. Geophys. Res., **67**, 447 (1962).
16. Meyer P., Parker E. N., Simpson J. A., Phys. Rev., **104**, 768 (1956).
17. Parker E. N., Planet. Space Sci., **12**, 735 (1964).
18. Coleman P. J., Davis L., Smith E. J., Sonett C. P., Science, **138**, 1099 (1962).
19. Neugebauer M., Snyder C., Science, **138**, 1095 (1962).
20. Bonetti A., Bridge H. S., Lazarus A. J., Rossi B., Scherb F., J. Geophys. Res., **68**, 4017 (1963).
21. Axford W. I., Planet. Space Sci., **13**, 115 (1965).
22. Parker E. N., Planet. Space Sci., **13**, № 1, 9 (1965).
- 23*. Дорман Л. И., Вариации космических лучей и исследование космоса, М., Изд-во АН СССР, 1963.
- 24*. Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И., Происхождение космических лучей, М., Изд-во АН СССР, 1963.
- 25*. Faus A. A., Planet. Space Sci., **14**, № 2, 143 (1966).
- 26*. Parker E. N., Planet. Space Sci., **14**, № 4, 371 (1966).
- 27*. Parker E. N., Astrophys. J., **144**, № 3, 916 (1966).
- 28*. Neugebauer M., Snyder C. W., J. Geophys. Res., **71**, 4469 (1966).
- 29*. Wilcox J. W., Ness N. F., J. Geophys. Res., **70**, 5793 (1965).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА ПАРКЕРА

Эксфорд. Как указывал Паркер, наши мнения о суточной вариации совпадают, хотя существует небольшая разница в наших результатах. Я нашел, что скорость потока космических лучей параллельно орбите Земли равна

$$\frac{\Omega r}{1 + \left(\frac{1}{\omega \tau \sin \chi} \right)^2},$$

где ω — гирочастота, τ — время соударений, а χ — угол струи, вытекающей из садового шланга. Это выражение допускает некоторую свободу, поскольку можно менять ω , τ и χ . Я допустил существование анизотропной диффузии, так, чтобы частицам было легче двигаться вдоль силовых линий, чем диффундировать поперек поля. Кроме того, я предположил, что диффузия имеет место в межпланетной среде всюду.

Замечание относительно концентрации космических лучей в межзвездной среде довольно интересно, хотя значение K и размер полости солнечного ветра¹⁾ точно не известны. Если градиент концентрации около Земли составляет 10% на 1 а. е. и если такой градиент сохраняется вплоть до 100 а. е., то концентрация космических лучей в межзвездном пространстве превосходит бы в 10 раз концентрацию, наблюдаемую около Земли, хотя, по-видимому, это завышенная оценка. Как сказал Паркер, это означает, что концен-

¹⁾ Или межпланетная полость, размер которой 50 а. е. [W. I. Axford, New Sci., **25**, 357 (1965)]. (См. также примечание редактора на стр. 216 и 228.) — *Прим. ред.*

трация космических лучей во вселенной может быть несколько выше, чем это следует из локальных измерений.

Отсюда возникают трудности, связанные с напряженностью магнитного поля Галактики. При соответствующих предположениях относительно электронной компоненты космической радиации из данных о космическом радиоизлучении следует довольно высокое значение напряженности магнитного поля Галактики 3γ . Прямые наблюдения указывают на то, что напряженность магнитного поля около $0,5\gamma$. Максимальная интенсивность космических лучей, наблюдаемая в период минимума солнечных пятен, такова, что плотность энергии космических лучей равна плотности энергии магнитного поля напряженностью $0,5 \gamma$. Поэтому, если интенсивность космических лучей выше наблюдаемой и если $0,5 \gamma$ — действительная напряженность поля, то космические лучи будут либо «раздувать» Галактику (поскольку они не могут удерживаться магнитным полем), либо их концентрация одинакова всюду во вселенной.

Другая интересная особенность состоит в том, что если концентрация космических лучей действительно высока за пределами солнечной системы, то совсем не обязательно, чтобы солнечный ветер удерживался галактическим магнитным полем, как обычно полагают. Его будут удерживать космические лучи. Запишем уравнение количества движения для солнечного ветра в виде

$$\rho v \frac{\partial v}{\partial r} = -g\rho - \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{\partial p_{\text{к. л.}}}{\partial r},$$

где последний член, который обычно не включается, — градиент давления космических лучей. Хотя локальный градиент космических лучей довольно мал, интегральный эффект может оказаться значительным.

Бирман. Можно ли рассматривать суточную вариацию, как независимое доказательство спиральной структуры межпланетного магнитного поля?

Паркер. Поскольку угол спирали сокращается в алгебраическом выражении, то почти любое упорядоченное поле, связанное с Солнцем, даст одинаковый результат.

Бирман. Следует ли из данных «Маринера-2» или «ИМП-1», что магнитные силовые линии могут быть связаны с Солнцем в течение 50% времени, но не более?

Паркер. Суточная вариация не исключает такой вывод, однако я исключаю его по другой причине.

Бирман. Я сказал об этом лишь потому, что почти общепринято, что силовые линии связаны.

Паркер. Я сделал такое предположение именно в этой аудитории, ожидая, что если кто-либо не согласен, то выступит.

Бирман. Я предпочитаю вывод о половине времени.

Колеман. Если в вашей модели эффекта Форбуша одна ударная волна следует за другой с большей скоростью, то частицы, захваченные между двумя взрывными волнами, должны адиабатически сжиматься в противоположность механизму, который вы использовали для замедления. В таком случае не следует ли ожидать, что восстановление от первого эффекта Форбуша было бы более быстрым, чем это обычно имеет место? Наблюдался ли когда-либо такой эффект?

Паркер. Я уверен, что примеры такого явления можно найти.

Люст. Ваша точка зрения относительно того, что плотность энергии космических лучей в межзвездном пространстве примерно в 10 раз больше предполагаемого значения, несомненно, интересна, хотя не совсем удобна. Насколько мы можем быть уверены в том, что плотность столь велика?

Паркер. Предположение о большой концентрации космических лучей в межзвездном пространстве не вполне надежно, но и не настолько призрачно,

чтобы от него можно было легко отказаться. Когда при наблюдениях на высокоширотных станциях космических лучей приемный конус охватывается падающим образом, то никто больше не сомневается в существовании анизотропии космических лучей в космическом пространстве. Я считаю эти результаты правильными. Эти обстоятельства заставляют меня сказать, что плотность энергии космических лучей в межзвездном пространстве может быть равной 10^{-11} эрг/см³. Однако я не собираюсь настаивать на этом значении. Мне самому не очень нравится эта идея.

Снайдер. Обычно мы согласны с тем, что наблюдаемая около Земли интенсивность космических лучей преобладает во вселенной. Однако открытие радиоисточников, излучающих огромное количество энергии, устраняет эту трудность.

Клайн. Гамма-лучи, измеренные на «Эксплорере», можно приписать ядерным соударениям космических лучей с межзвездным веществом. Если 50% гамма-лучей, наблюдавшихся на «Эксплорере-11», были бы действительно первичными гамма-лучами, то в таком случае либо концентрация межзвездных космических лучей в самом деле в 10 раз выше концентрации, регистрируемой внутри солнечной системы, либо межзвездное вещество в 10 раз плотнее, чем это ранее предполагалось. Этот множитель 10 может быть простым совпадением, но тем не менее он согласуется с величиной Паркера.

Андерсон. Космическим лучам какой энергии соответствует множитель 10?

Паркер. Я имел в виду частицы с энергией порядка 2 Бэв, поскольку наибольшая плотность энергии космических лучей, по-видимому, соответствует частицам с такой энергией.

Бирман. 10^{-31} г/см³ — это недавно полученное значение плотности вещества во вселенной. Если бы это вещество было полностью преобразовано из водорода в гелий с высвобождением энергии $10^{18,8}$ эрг/г, идущей главным образом на космические лучи, то плотность энергии космических лучей была бы несколько меньше 10^{-12} эрг/см³. Я не симпатизирую идее о том, что вся вселенная заполнена космическими лучами с плотностью энергии даже 10^{-12} эрг/см³.

Эксфорд. Ваше значение 10^{-31} г/см³ спорно с точностью до 10^3 . Если бы оно соответствовало действительности, то вряд ли проблема об источнике энергии была бы более загадочной, чем проблема происхождения массы в холодной вселенной.

Лейтон. Мы все согласны с тем, что существует отток газа в плоскости эклиптики, но что можно сказать о потоке в направлении к полюсам? Сильно ли меняются числа, о которых идет речь при отказе от сферической симметрии в вашей модели.

Паркер. Мы не располагаем прямыми наблюдениями симметричного истечения солнечного газа, так что я должен обратиться к анализу кометных хвостов, выполненному Бирманом. Газу, по-видимому, легче покидать Солнце у полюсов, поскольку около них нет магнитного поля, задерживающего поток плазмы. Однако вполне возможно, что истечение газа там было бы несколько более медленным, поскольку полярная корона в период минимума солнечных пятен, по-видимому, холоднее экваториальной. Я рассмотрел сплюснутую у полюсов, а не сферическую модель. Не думаю, что отсутствие сферической симметрии что-либо изменит. Я пытался получить таким образом интересные нас эффекты, но безуспешно.

Слутц. Спиральная структура, обнаруживаемая в потоке солнечного ветра, по-видимому, указывает на довольно интересное влияние магнитного поля на направление течения. На расстоянии 1 а. е. магнитное давление слишком мало, чтобы оказывать какое-либо влияние на солнечный ветер. Однако ближе к Солнцу, где оба давления почти равны друг другу, возмущение магнитного поля таково, что тангенциальная и радиальная составляющие скорости

солнечного ветра увеличиваются, тем самым вводя механизм для создания цилиндрического расширения.

Паркер. Существует несколько эффектов, которые вносят вклад не в сферическое расширение, а в то, что вы называете цилиндрическим расширением. Например, я уже говорил, что магнитные силовые линии приполюсных областей Солнца стремятся замкнуться. Ни один из этих эффектов, вероятно, не изменяет порядок величины ни скорости, ни поля. Данные наблюдений довольно трудно получить, поскольку необходимо отделить слабые эффекты от основного эффекта.

Слутц. Влияние магнитного поля на направление потока — это лишь возможный механизм для того, чтобы выделить преобладание цилиндрического расширения над сферическим. Необходимы дополнительные наблюдения в этой области.

Дэвис: По-видимому, электроны галактических космических лучей подвержены воздействию этого механизма диффузии сильнее, чем протоны, и электронам потребовалось бы больше времени для проникновения в солнечную систему за счет механизма диффузии. Таким образом, галактическому электрону, по-видимому, довольно трудно достичь Земли, но это было бы слишком плохо, поскольку они, кажется, все же наблюдаются.

Паркер. Прежде чем рассматривать вопрос о способности электронов проникать внутрь солнечной системы, мы должны лучше определить природу неоднородностей в пространстве между земной орбитой и бесконечностью. В общем способность частицы войти в солнечную систему не зависит всецело ни от ее скорости, ни от ее жесткости. Итак, электроны обладают одним незначительным преимуществом по сравнению с протонами: их скорость всегда равна c , тогда как скорость протонов с энергией 100 Мэв равна $c/2$.

Я согласен с тем, что электронам с энергией 100 Мэв труднее проникнуть в солнечную систему, чем протонам с той же энергией. Если проэкстраполировать концентрацию электронов, наблюдаемую на расстоянии орбиты Земли, то вы получите весьма необычные межзвездные потоки электронов. Однако электроны, которые мы наблюдали, могут быть и солнечного происхождения.

Эксфорд. Поскольку в межпланетном поле существуют нейтральные слои, то возможна генерация быстрых электронов в локальном межпланетном газе, а не на Солнце. Не исключено, что электроны, наблюдавшиеся Клайном и другими, приходят от такого источника.

Фогт. В связи с июльской группой солнечных вспышек 1961 г. Мейер и я наблюдали увеличение числа высокоэнергичных электронов (несколько сот мегаэлектронвольт). Эти частицы, по-видимому, были ускорены на Солнце. В других случаях о высокоэнергичных электронах нельзя сказать, какого они происхождения — галактического или солнечного.

Клайн. У меня есть замечание относительно электронов солнечной вспышки. Вслед за радиовсплеском IV типа 16 марта 1964 г. мы обнаружили на «ИМП-1» солнечные протоны. Относительное содержание электронов в потоке частиц было очень низким (верхний предел составлял 2—3%). Однако мы думаем, что по крайней мере 50% этих электронов порождались локально созданными гамма-лучами, а остальные также, возможно, были вторичными частицами.

Андерсон. Ваш довод о существовании сильного потока космических лучей в межзвездном пространстве зависит частично от утверждения, что относительное изменение потока космических лучей, наблюдаемого на Земле, велико по сравнению с относительным изменением в потоке солнечного ветра. Разве какие-либо экспериментальные данные показывают, что изменение в солнечном ветре между максимумом и минимумом солнечного цикла действительно так мало? Не хотите ли вы сделать какие-либо прогнозы?

Паркер. Я согласен, что вариации солнечного ветра фактически не известны. Но при сравнении данных «Маринера-2» с данными «ИМП-1» оказалось, что разность в скорости солнечного ветра не велика, тогда как интенсивность космических лучей изменилась довольно сильно за время между наблюдением на «Маринере-2» и на «ИМП-1».

Братенагл. Что можно сказать об индексе K_p как индикаторе скорости солнечной плазмы?

Паркер. Солнечный ветер может измениться совсем немного, тогда как индекс K_p изменяется очень сильно. Данные «Маринера-2» не позволили провести калибровку индекса K_p для скоростей выше 750 км/сек, так что я не знаю, насколько надежен этот индекс как индикатор скорости.

Чемберлен. Насколько я понимаю, ваша цифра 40 а.е. для протяженности солнечного ветра от Солнца была основана на отставании максимума космических лучей относительно максимума активности солнечных пятен. Однако максимум активности полярных сияний и магнитных бурь, вероятно, запаздывает на 2 года по отношению к максимуму активности солнечных пятен.

Кроме того, насколько справедливо предположение, что фронт межпланетной ударной волны расположен в том месте, где давления уравниваются? Перед Землей, по-видимому, существует как граница магнитосферы, так и фронт ударной волны. Разве не могут также существовать обе границы между межпланетным и межзвездным газами?

Паркер. Теория равновесия давлений очень хорошо согласуется с данными измерений границы магнитосферы. Формальное решение гидродинамических уравнений дает положение ударной волны примерно в том месте, где давление межзвездного газа равняется давлению солнечного ветра в точке, в которой скорость радиального потока солнечной плазмы равна нулю.

Чемберлен. Но в таком случае нет ли турбулентной области за пределами этой границы?

Паркер. Несомненно.

Чемберлен. К какой границе следует применять теорию равновесия давлений?

Паркер. Для границы между солнечным ветром и межзвездными газами фронт ударной волны располагается в районе равновесия давлений. Для солнечного ветра и геомагнитного поля граница магнитосферы располагается приблизительно на расстоянии $10 R_{\oplus}$, где имеет место равновесие давлений. Разница, по-видимому, меньше чем в 2 раза независимо от предположений. 40 а. е. — менее надежная величина, поскольку межзвездное давление неизвестно. По этой причине я обычно привожу 10—100 а. е. в качестве вероятного расстояния, до которого дует солнечный ветер¹⁾.

¹⁾ Фаус высказывает мнение, что переходная область межпланетной полости начинается с 1—3 а. е., а фронт ударной волны расположен в пределах 15—500 а. е. [A. A. Faus, Planet. Space Sci., 14, № 2, 143 (1966)]. — *Прим. ред.*

Часть III

ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И КОРОНЫ

ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА¹⁾

Ф. Л. Скарф

Модели короны и солнечный ветер

Для описания циркуляции, распределения температуры, давления и т. д. в плотной атмосфере планеты, где состояние газа определяется столкновительными эффектами, обычно пользуются гидродинамическими уравнениями или уравнениями сплошной среды. За последние несколько лет стало очевидно, что аналогичные условия преобладают в нижней короне Солнца, и были довольно подробно рассмотрены различные решения уравнений для жидкости. Наиболее важным результатом гидродинамического приближения было предсказание Паркера [1] о существовании постоянного стационарного истечения всей короны. В частности, Паркер показал, что наличие градиентов давления может привести к ускорению потока до сверхзвуковых скоростей и непрерывному плазменному ветру в межпланетном пространстве. Солнечный ветер отождествлялся с потоком, существование которого предположил Бирман на основе исследования кометных хвостов [2]. Последующие измерения и расчеты надежно подтверждают первоначальную теорию, что межпланетный ветер можно рассматривать как гидродинамическое расширение светящейся короны.

Количественные модели основаны на решении моментных уравнений для сохранения массы и импульса энергии²⁾. Эти уравнения справедливы для области, где распределение скорости частиц корональной плазмы не сильно отклоняется от локально-максвелловского распределения³⁾. Это ограничение

¹⁾ Происхождение солнечного ветра, его природа, различные существующие в настоящее время модели и сведения о динамических процессах, происходящих в нем, изложены также в [21*—31*]. — *Прим. перев.*

²⁾ Наиболее универсальным методом, позволяющим в принципе замкнуть систему макроскопических уравнений при произвольных числах Кнудсена, является метод моментов, широко используемый в динамике разреженного газа. Его описание и пределы применимости можно найти в монографии Когана [32*]. — *Прим. перев.*

³⁾ Многие вопросы кинетики и переноса простой и замагниченной плазмы рассмотрены Брагинским [33*]. — *Прим. перев.*

означает, что длина среднего свободного пробега частиц мала по сравнению со шкалой высот¹⁾, а это в свою очередь указывает на то, что локальные температуры и давления имеют определенный смысл. Кроме того, передача энергии за счет теплопроводности и вязкая диссипация являются значительными. Если градиенты скорости достаточно малы, то коэффициенты теплопроводности и вязкости можно определить следующим образом:

$$\mathbf{Q} = -K(T) \nabla T, \\ \tau_{ij} = \eta(T) \left[\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \nabla \cdot \mathbf{v} \right], \quad (1)$$

и в результате получаем уравнения Навье—Стокса [3].

Большинство теоретических исследований было основано на идеализированных моделях, которые содержат предположения, что устанавливается стационарный, сферически-симметричный поток и что нет необходимости учитывать в явном виде эффекты, связанные с вращением Солнца, магнитными полями и вязкостью. Последнее допущение обычно делают потому, что безразмерное число Прандтля ($\eta C_p / mK$), являющееся мерой эффекта вязкости, очень мало: для полностью ионизованного водородного газа Чепмен [4] определил, что²⁾

$$K(T) \approx 10^{-6} T^{5/2} \text{ эрг/см} \cdot \text{сек} \cdot ^\circ\text{K}, \quad (2)$$

$$\eta(T) \approx 10^{-16} T^{5/2} \text{ э/см} \cdot \text{сек}. \quad (3)$$

Первая количественная гидродинамическая модель короны была предложена в 1957 г. Чепменом и Зирином [5]. Течение газа не рассматривалось, так что

$$\nabla \cdot \mathbf{Q} = -\nabla \cdot \{K[T(r)] \nabla T(r)\} = 0. \quad (4)$$

Из (2) и (4) легко получить специфическое распределение температуры в форме $T(r) \approx T(a) (r/a)^{-2/3}$. Если это распределение подставить в уравнение гидростатического равновесия, то около Земли при $a = R_\odot$ и $T(a) \approx 2 \cdot 10^6$ °K получаем неожиданно высокую концентрацию коронального газа $n_e \approx 300 \text{ см}^{-3}$.

В последующей модели Паркера [1] была принята во внимание возможность ограниченного течения газа. Он исследовал характер потока, используя распределение температуры, задан-

¹⁾ Шкалу высот называют также высотой однородной атмосферы. — Прим. ред.

²⁾ Оценки этих коэффициентов довольно произвольны, поскольку дебаевское экранирование, изменяющее кулоновский потенциал, вводится довольно специфическим образом. Для численных расчетов, проводимых ниже, используются $K T^{-5/2} = 7,4 \cdot 10^{-7}$ и $\eta T^{5/2} = 1,2 \cdot 10^{-16}$.

ное *ad hoc*. Предполагалось, что нижняя корона почти изотермична с $T_0 \approx (1-2) \cdot 10^6$ °К вплоть до $10-20 R_\odot$ и что во внешней области температура уменьшается по адиабатическому закону. На рис. 1 представлены типичные решения уравнений количества движения и непрерывности (при $\eta=0$). У основания короны частицы сильно ускоряются наружу за счет градиентов давления и замедляются силой солнечного тяготения. Течение

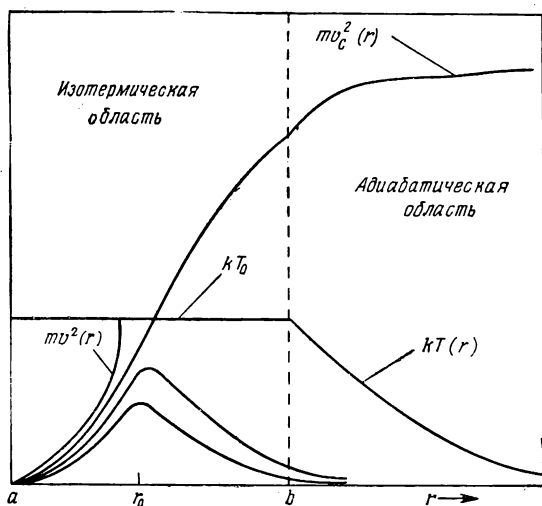


Рис. 1. Решения уравнений количества движения и непрерывности для модели солнечной короны с изотермично-адиабатическим распределением температуры.

напоминает движение потока газа через сопло Лавала. Для большинства граничных условий скорость течения остается дозвуковой, причем она быстро снижается после прохождения через эффективное сопло в области около r_0 . К настоящему времени все эти дозвуковые решения довольно тщательно исследованы¹⁾. Еще до того как было подтверждено существование непрерывного солнечного ветра, Чемберлен [6] высказал мнение, что корону можно описать посредством самого слабого свободного или бризового решения, которое соответствует обычному испарению. Однако до получения хороших измерений

¹⁾ Возможности существования медленных решений для короны недавно рассмотрены Паркером [34*] и Чемберленом [35*]. Некоторые вопросы также рассмотрены Паркером применительно к звездным коронам и звездному ветру [36*]. — *Прим. перев.*

Паркер обращал внимание на возможность описания короны на основе критического решения, в котором достигается сверхзвуковая скорость течения. Он показал, что плазма в таком случае

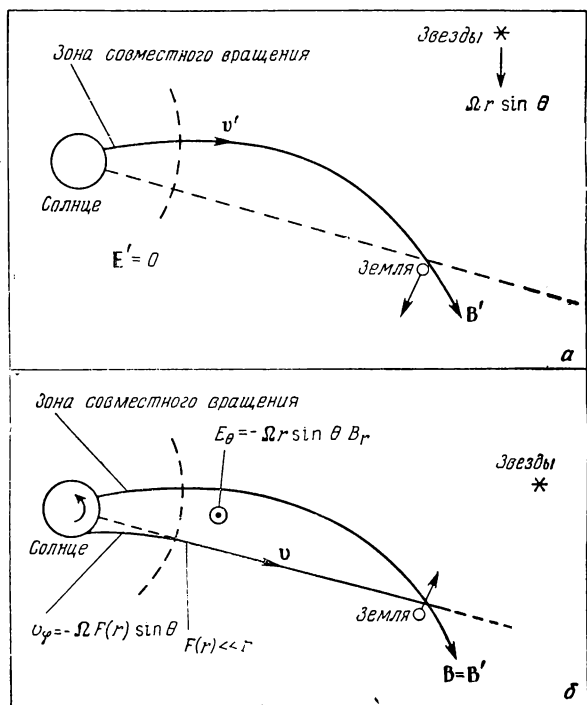


Рис. 2. Доказательство отсутствия электромагнитного взаимодействия между спиральным магнитным полем и примерно радиальным течением плазмы в системе координат, связанной с Солнцем (а), и в инерциальной системе (б).

должна течь мимо Земли со скоростью 300—600 км/сек, что соответствует современным наблюдениям (см. гл. 1). Паркер исследовал также эффекты вращения и общего магнитного поля Солнца и указал, что данная конфигурация вращающегося магнитного поля не дает результирующей электромагнитной силы, которая действовала бы на почти радиальный плазменный поток. На рис. 2 показано, как это все происходит. В системе координат, связанной с Солнцем (штрихованные переменные), электрическое поле отсутствует, $\mathbf{v}'$ параллельно $\mathbf{B}'$; оба вектора напоминают форму струи воды, испускаемой вращающимся садовым шлангом, поскольку на больших расстояниях корона

не должна вращаться вместе с Солнцем. В инерциальной системе отсчета E_0 не будет равняться нулю, $\mathbf{v}$ почти радиально (за пределами некоторого радиуса совместного вращения), а $\mathbf{B}$ существенно не изменяется. Последние измерения напряженности и направления магнитного поля около Земли подтверждают в общих чертах справедливость этой модели (см. гл. 3 и 6)¹⁾.

Сейчас нас в основном будет интересовать вопрос происхождения солнечного ветра. Прежде всего можно спросить, почему солнечная корона непрерывно течет именно со сверхзвуковой, а не с дозвуковой скоростью. Хотя совершенно строгий ответ на этот вопрос не был дан (для этого требуется формулировка и анализ исключительно сложных начальных и граничных условий задачи), тем не менее появилось много интересных гипотез, основанных на эквивалентных стационарных моделях (и в частности, на дальнодействии членов давления). Однако все эти доводы зависят от подробных расчетов характера течения. Поскольку за последние годы был сделан значительный прогресс в понимании уравнения баланса энергии и количества движения для стационарных условий, то сначала мы обратимся к этому аспекту проблемы происхождения солнечного ветра.

Проблема нагрева короны

Одна очевидная трудность модели Паркера связывалась с необходимостью существования большей, почти изометрической области в короне. Вряд ли когда-либо казалось вероятным, что любой солнечный источник тепла, расположенный вне короны, сам по себе может поддерживать почти однородную температуру вплоть до 10 или 20 $R_\odot$ [7]. Однако в одном из исследований решений Чемберлена [8], которое соответствовало испарению, было дано интересное и обнадеживающее рассмотрение уравнения динамического равновесия энергии²⁾. Чемберлен постулировал, что источник солнечного тепла имеет вид тонкой оболочки у основания короны. Он исследовал распределение скорости и температуры, которое определяется на основе решения полной системы уравнений энергии и количества движения в отсутствие вязкости и внешнего теплового источника. Для

¹⁾ См. также работу [37*], где дано описание квазистационарной структуры межпланетной среды, полученной на основе данных «ИМП-1». — *Прим. перев.*

²⁾ Дальнейшее развитие экзосферной модели солнечного ветра было сделано Брандтом и Кассинели [26*]. — *Прим. перев.*

радиального потока уравнения записываются (в принятых обозначениях) в виде

$$nmv \frac{dv}{dr} + \frac{dp}{dr} + \frac{GnmM_{\odot}}{r^2} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{GmM_{\odot}}{r} + \frac{5}{2} kT - \frac{Kr^2}{c} \frac{dT}{dr} = \text{const}, \quad (6)$$

где $p = nkT$, а константа $c = nvr^2$. По существу модель Чепмена переноса тепловой энергии за счет теплопроводности объединена с моделью Паркера для ограниченного течения газа, чтобы получить динамическое распределение температуры.

Анализ этих уравнений источника тепла в виде тонкой оболочки указывает на то, что в нижней короне может переноситься достаточное количество тепла за счет теплопроводности для поддержания приблизительно однородной температуры вплоть до $10\text{--}20 R_{\odot}$ даже при наличии быстрого течения. Де Ягер [9] и Паркер [10] попытались подтвердить это предположение, используя аналитические методы, а Ноубл и Скарф [11] исследовали его численными методами. В нашем первоначальном численном рассмотрении эффекты вязкости не учитывались; были выбраны приемлемые значения концентрации, температуры и скорости на расстоянии 1 а.е., и уравнения интегрировались от Земли до Солнца. Температурный градиент на расстоянии 1 а.е. изменялся до тех пор, пока не были найдены такие значения, которые удовлетворяли бы требованию плавного перехода к дозвуковому потоку в нижней короне.

Теоретический профиль электронной концентрации, приведенный на рис. 3, является результатом одного из первых интегрирований уравнений (5) и (6) для случая 10% гелия и температуры $2 \cdot 10^6$ °К у основания короны. Скорость на расстоянии $1,25 R_{\odot}$ равна 9,14 км/сек, переход через звуковой барьер имеет место около $5 R_{\odot}$, скорость и концентрация около Земли равны 352 км/сек и $3,4$ ион/см³ соответственно. Параметр A равен $2K(T_0)GM_{\odot}m/k^2T_0(nvr^2)$.

В работе [11] перечислены статьи, из которых были взяты экспериментальные кривые, приведенные на рис. 3. Теоретическая кривая нашего первого численного расчета, очевидно, отличается от экспериментальных кривых $n_e(r)$ по крайней мере на постоянный множитель. Однако общее согласие по форме уже в значительной степени поддерживает модель нагревания за счет теплопроводности от источника тепла в виде тонкой оболочки. Поскольку $A \sim K(T_0)/n$, то профиль, приведенный на рис. 3, отчетливо указывает на необходимость дальнейшего интегрирования при меньших значениях A ; к настоящему времени

такие расчеты выполнены. Однако, прежде чем представить результаты этого интегрирования, уместно сделать некоторые замечания относительно кривой, обозначенной «дозвуковое» решение. Здесь n_e , T и dT/dr на расстоянии $r=1,25 R_\odot$ были

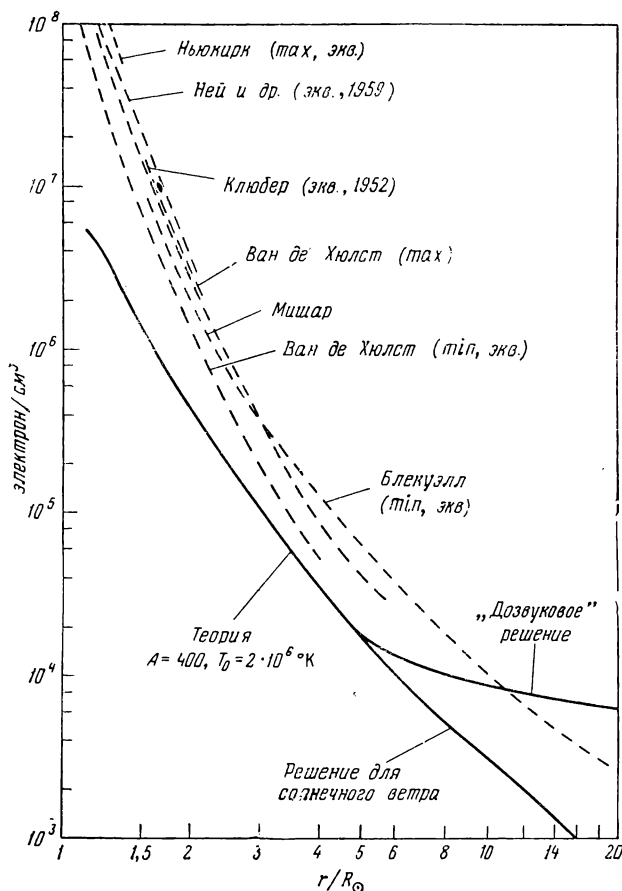


Рис. 3. Экспериментальные и теоретические профили электронной концентрации; вязкость не учитывалась.

фиксированы при значениях, соответствующих расширению в виде солнечного ветра, но v (при $1,25 R_\odot$) было уменьшено от 9,14 до 9,04 км/сек. В этом случае скорость остается очень близкой к критическому значению вплоть до переходной точки ($r=5 R_\odot$), а затем она быстро падает, вызывая увеличение концентрации. На расстоянии $20 R_\odot$ концентрация, соответствующая

дозвуковому течению, в 50 раз превышает соответствующее значение при сверхзвуковом течении. Так что отсутствие резкого изгиба в наблюдаемой кривой концентрации короны весьма отчетливо показывает, что расширение является сверхзвуковым. Распределение температуры в обоих случаях по существу одинаково, так что дозвуковое давление в ~ 50 раз превышает сверхзвуковое на расстоянии $20 R_{\odot}$. Мы вернемся к этому вопросу позднее.

На рис. 4 приведены результаты дополнительного численного интегрирования уравнения теплопроводности [12]¹⁾. Кривая с $A=100$ достаточно хорошо согласуется с наблюдаемыми значениями за пределами $2 R_{\odot}$, однако ясно, что ближе $2 R_{\odot}$ вычисленные значения концентрации слишком низки. Это непосредственно указывает на то, что внешний источник тепла проникает в корону до $1,5\text{--}2,5 R_{\odot}$, но возможно и другое объяснение этого расхождения (около хромосферы концентрация гелия может оказаться значительно выше; ближе $2 R_{\odot}$ поле тяготения Солнца может быть ослаблено за счет эффектов совместного вращения; в этой области может оказаться крайне важным отклонение от сферической симметрии). Таким образом, в настоящее время было бы преждевременно устанавливать определенное положение границы области нагрева.

[В области сверхзвукового течения ($r > 5 R_{\odot}$) кривая вычисленных значений концентрации все время немного ниже кривой, полученной Блекуэллом. Теоретическая кривая понижается еще сильнее, если учесть эффекты вязкости. Однако в дискуссии Брандт и другие отмечали, что Блекуэлл в настоящее время считает необходимым исправить свои данные в сторону снижения. Окончательное теоретическое распределение хорошо согласуется с последними радиоастрономическими определениями концентрации за пределами $\sim 6 R_{\odot}$ [13].]

Влияние вязкости

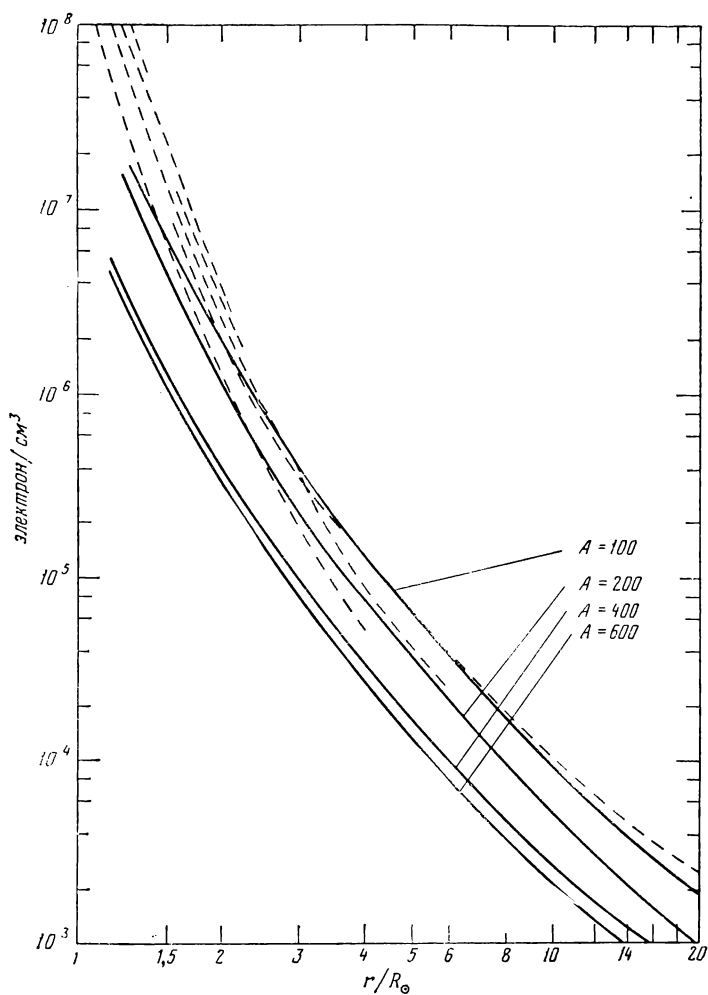
Для радиального истечения полные уравнения Навье — Стокса имеют вид

$$nmv \frac{dv}{dr} + \frac{dp}{dr} + \frac{GnmM_{\odot}}{r^2} = \frac{4}{3} \frac{d\eta}{dr} r \frac{d}{dr} \left(\frac{v}{r} \right) + \frac{4}{3} \eta \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 v) \right] \quad (7)$$

и

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{GmM_{\odot}}{r} + \frac{5}{2} kT - \frac{Kr^2}{mv^2} \frac{dT}{dr} - \frac{4}{3} \frac{\eta r^2}{rvr^2} \left(v \frac{dv}{dr} - \frac{v^2}{r} \right) = \text{const.} \quad (8)$$

¹⁾ Более полное изложение результатов этой работы можно найти в [38*]. — Прим. перев.



Р и с. 4. Экспериментальные и теоретические профили электронной концентрации.

Теоретические кривые соответствуют различным значениям параметра A ; вязкость не учитывалась. $T_0 = 1,5 \cdot 10^6$ °К для $A = 100$ и 200 ; $T_0 = 2,0 \cdot 10^6$ °К для $A = 400$ и 600 .

Первоначально исследовались поправки на вязкость, поскольку (5) и (6) имеют аномальные решения [$T(\infty) > 0$ или $T(r < \infty) = 0$], и мы надеялись, что учет членов вязкости в стационарном течении газа устранил их. Вскоре стало ясно, что даже для очень низких значений η/K члены, зависящие от η , подавляют члены, связанные с проводимостью, если течение

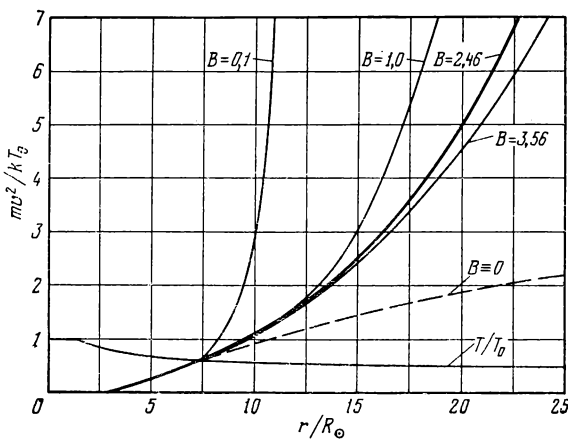


Рис. 5. Влияние «вязких» членов на скорость течения солнечного ветра около Солнца.

Здесь $A=200$, а $B=2,46$ — коэффициент вязкости для короны, содержащей 10% гелия.

газа является сверхзвуковым (при $r \rightarrow \infty$, $\eta v^2 \gg KT$). Возможное физическое объяснение такого большого влияния состоит в том, что даже если для полностью однородного расширения вязкая диссипация исчезает, то радиальное течение обычно не создает однородного расширения элемента объема; таким образом, вязкие напряжения являются конечными.

На рис. 5 показано, как вязкий член видоизменяет скорость течения газа около Солнца. Параметр B равен $2\eta kA/3Km$, кривая, обозначенная $B \equiv 0$, представляет собой профиль концентрации с $A=200$, соответствующий уравнениям (5) и (6). Жирная кривая ($B=2,46$) является решением (7) и (8) с коэффициентом вязкости, соответствующим короне, содержащей 10% гелия ($B/A=0,0178$ для чистого водорода, а для смеси, содержащей 10% гелия, B следует умножить на 0,69); кривые $T(r)$ в этой области по существу не зависят от B . Если анализируются лишь кривые $B \equiv 0$ и $B=2,46$, то рис. 5, по-видимому, является бессмысленным, поскольку вязкость создает кажу-

щийся эффект ускорения потока. Были найдены решения для других значений B , которые показали, что если пренебречь кривой $B \equiv 0$, то члены, связанные с вязкостью, действительно создают заметное замедление течения. Случай теплопроводности с $B \equiv 0$ является особым. Рис. 5 иллюстрирует хорошо известный специалистам по аэродинамике факт: существует большая разница между течением жидкости с произвольным малым значением вязкости и течением жидкости с полным отсутствием вязкости.

Рассмотрение области за пределами $15R_{\odot}$

Перераспределение диссипируемой энергии за счет вязкости имеет два важных следствия. Во-первых, как указывалось выше, это приводит к отличному согласию вычисленной кривой $n_e(r)$ (см. примечание на стр. 232) с наблюдениями за пределами $2R_{\odot}$ (для $A=100$, $T_0=1,5 \cdot 10^6$ °K и $m=0,62 m_p$, или 10% гелия). Во-вторых, это создает очень резкие градиенты скорости в области за $15R_{\odot}$. При таких резких градиентах скорости $\eta(T)$ определяется недостаточно хорошо. Полное выражение для тензора вязкости τ_{ij} имеет вид [13]

$$\tau_{ij} = \tau_{ij}^0 + \frac{\eta(T)}{nkT} \left[\tau^{ij} (\nabla \cdot \mathbf{v}) - (\mathbf{v} \cdot \nabla) \tau^{ij} - \right. \\ \left. - \tau^{ki} \frac{\partial v^j}{\partial x^k} - \tau^{kj} \frac{\partial v^i}{\partial x^k} + \frac{2}{3} \partial^i \tau^{kl} \frac{\partial v^l}{\partial x^k} \right] +$$

+ Диффузионные члены + Моменты более высокого порядка, (9)

где τ_{ij}^0 определяется уравнением (1). Обычная связь между напряжениями и деформацией устанавливается лишь в том случае, если членами в скобках в (9) можно пренебречь. Таким образом, использование уравнения Навье — Стокса нельзя обосновать, когда $\eta(T) (\nabla \cdot \mathbf{v})$ становится сравнимым с nkT . Рис. 5 показывает, что «скользящее течение» начинается между 15 и $20R_{\odot}$.

Различные формальные поправки к уравнениям Навье — Стокса дают очень сложное приближение Барнетта или тринадцатимоментные уравнения¹⁾, которые, как предполагают, применимы к области «скользящего течения». Однако специалисты по аэродинамике не уверены в выгодности их применения на практике [14]. Часто утверждается, что уравнения Навье — Стокса справедливы далеко за установленными пределами их применимости. Мы наблюдаем, что величина $(\lambda/T) (dT/dr)$, где

¹⁾ Более подробно о барнеттовском приближении см. [32*]. — *Прим. перев.*

λ — средняя длина свободного пробега электрона, очень мала довольно далеко за пределами 15 или $20R_{\odot}$, так что поддерживается некоего рода течение жидкости, даже когда коэффициенты переноса плохо определяются. Кроме того, можно показать, что поправка, зависящая от скорости, стремится уменьшить как η , так и K . По этим причинам мы предварительно «отсекаем» как Q , так и τ на расстоянии радиуса разрыва $r_1 \approx 15-20R_{\odot}$ и за пределами r_1 присоединяем адиабатическое решение. Поскольку уравнения (7) и (8) фактически имеют другие решения, которые на больших расстояниях проявляют адиабатический характер поведения, то вполне можно предположить, что изменения K и η обуславливают смещение из одной области решений уравнений Навье — Стокса в другую. (Однако у нас нет реального обоснования справедливости крутого сопряжения адиабатической кривой; и этот метод следует рассматривать как путь для получения минимальной скорости течения.)

Построенные таким образом некоторые распределения скорости и температуры представлены на рис. 6. Наилучшее согласие с данными Блекуэлла и Эриксона достигается при $T(2R_{\odot}) \approx 1,5 \cdot 10^6$ °K, $v(2R_{\odot}) \approx 18$ км/сек при $r_1 \approx 18-20R_{\odot}$. Для случая с 10%-ным содержанием гелия, где $A=100$ и $B=1,26$, $v(1 \text{ а. е.}) \approx 300-400$ км/сек, а $n(1 \text{ а. е.}) \approx 5-6$ ион/см³.

Эти расчеты показывают, что детальная структура короны и солнечного ветра в области $2R_{\odot} < r < 20R_{\odot}$ достаточно хорошо понятна, и мы довольно уверенно можем полагаться на теоретические расчеты концентрации и скорости течения внешней короны. Однако очень трудно предвидеть, как будет меняться с увеличением расстояния от Солнца распределение температуры или скорости.

Распределение скоростей и влияние поля

Для распределения скоростей, показанного на рис. 6, средняя длина свободного пробега становится сравнимой со шкалой высот в области между 0,25 и 0,5 а. е. Это обычно должно означать установление свободного молекулярного течения, к которому понятие температуры больше неприменимо, поскольку, когда соударения слишком редки, для восстановления статистического распределения скоростей сразу же становится существенной анизотропия, связанная со сферической геометрией.

В действительности ситуация значительно сложнее и, вероятно, много ближе к гидродинамической ситуации из-за наличия слабого магнитного поля, которое пронизывает бесстолкно-

вительную плазму. Если образующаяся анизотропия такова, что $nkT(T_{\parallel} - T_{\perp}) > B^2/4\pi$ или $nkT_{\perp}^2/T_{\parallel} > B^2/8\pi$ (индексы соответствуют движению параллельно и перпендикулярно $\mathbf{B}$), то возникает ряд магнитогидродинамических неустойчивостей. Магнитное поле становится неупорядоченным, а рассеяние частиц

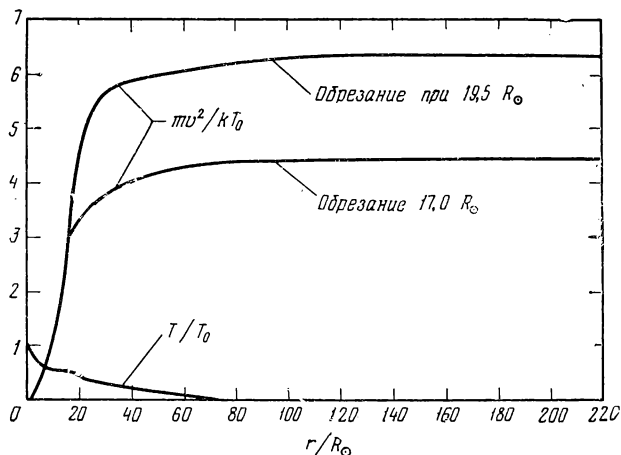


Рис. 6. Распределение скоростей без учета теплопроводности и вязкости (и сопряжение с адиабатическим решением) на расстояниях 17 и $19,5R_{\odot}$.

на магнитных неоднородностях тогда начинает играть ту же роль по отношению к восстановлению локального равновесия и тепловой анизотропии, что и обычное рассеяние при соударениях частиц друг с другом. Как утверждал Паркер, этот механизм приводит к тому, что гидродинамическая модель справедлива далеко за пределами, устанавливаемыми условием $\lambda dT/dr \approx T$.

Анализ данных по захвату солнечных космических лучей [15, 16] действительно указывает на то, что протяженная область сильно неупорядоченного магнитного поля может «начинаться» около 1,5 или 2,5 а. е., а данные «ИМП-1» и «Маринера-2» по магнитным флуктуациям (см. гл. 3 и 6) показывают, что умеренная неупорядоченность поля существует между 0,7 и 1 а. е. Примерное равенство между nkT и $B^2/8\pi$, наблюдавшееся на «Маринере-2» (гл. 1), также в значительной степени поддерживает представление о магнитной связи. Однако недостаточно хорошо известно, в какой степени неупорядоченность поля приводит к локальному равновесию, и вполне возможна остаточная

анизотропия¹⁾). Если справедливо, что $T_\alpha \approx 4T_p$, то ясно, что магнитная термализация не эквивалентна термализации за счет соударений.

Предел солнечного ветра

Маловероятно, что умеренные изменения, созданные полями в функции распределения скоростей частиц, могли бы извлечь значительное количество энергии направленного движения во внешней области. Обычно предполагается, что солнечный ветер продолжает течь по инерции наружу до тех пор, пока его не остановит какая-либо внешняя сила, например сила, создаваемая межзвездными частицами и полями.

Формально возможно, что ветер «остановится сам», претерпевая разрывы, бесстолкновительную ударную волну и становясь горячей плазмой, движущейся со скоростью v порядка $V_A = \sqrt{B^2/4\pi n m} \approx 50\text{—}100 \text{ км/сек}$ на расстоянии $r \geq 1\text{—}2 \text{ а. е.}$ Слабое возмущение, по-видимому, может служить пусковым механизмом для создания такой ударной волны. Хотя такая возможность обусловит некоторые весьма интересные следствия, но тем не менее процесс вряд ли протекает в идеализированной форме Гоффмана — Теллера. Бесстолкновительная ударная волна — маловероятное явление даже в упорядоченном магнитном поле²⁾, а поле, которое настолько сильно неупорядоченно, что связывает бесстолкновительную плазму в жидкость, не должно играть важной роли в уравнении баланса энергия — количество движения.

Некоторые не очень убедительные данные свидетельствуют о том, что солнечный ветер течет по крайней мере вплоть до 5 а. е. Радиоизлучение Юпитера [17] и активность кометы Швасмана — Вахмана [18] обнаруживают корреляцию с солнечной активностью с временным запаздыванием, согласующимся со скоростью солнечного ветра. Эта величина приемлема, поскольку межзвездная среда настолько разрежена ($n = 1 \text{ атом/см}^3$, $T \approx 100^\circ \text{ К}$, $p \approx 10^{-14} \text{ дин/см}^2$), что на основе баланса динамического давления минимальное расстояние остановки солнечного ветра порядка 50 а. е.³⁾. Наиболее вероятным механизмом остановки солнечного ветра в таком случае должен быть быстрый

¹⁾ Существование анизотропии температуры в солнечном ветре установлено на основе плазменных измерений с помощью электростатических анализаторов на космическом аппарате «Пионер-6» [39*] и на спутнике «Вела-3» [40*]. А вопросы плазменной неустойчивости, связанной с наличием тепловой анизотропии, рассмотрены в [41*]. — *Прим. перев.*

²⁾ См. гл. 10 и примечания редактора и переводчика к ней. — *Прим. ред.*

³⁾ См. гл. 12, 24, 26 и примечания редактора и переводчика к ним. — *Прим. ред.*

обмен зарядами между протонами и межзвездным водородом [19] или, как отметил Паркер (см. гл. 12), взаимодействие с космическими лучами.

Дозвуковое или сверхзвуковое?

Понятие баланса динамического давления опять приводит нас к вопросу о происхождении и стабилизации солнечного ветра. Хотя соотношение $p(\text{межзв.}) \approx n(mv^2 + kT)$ может быть удовлетворено лишь при решении, относящемся к солнечному ветру при $r \geq 50$ а.е., соответствующее равновесие давления для любого дозвукового решения требует значительно большего радиуса из-за значительно большей концентрации (см. рис. 3). Паркер [1] указывал на это несоответствие и предположил, что поскольку корона расширяется почти в вакуум, то течение, которое дает самое низкое давление при любом данном радиусе (решение, соответствующее солнечному ветру), должно быть получено в конечном итоге. Это означает, что любая звезда, которая обладает соответствующей атмосферой (у основания тепловая скорость и скорость течения меньше скорости убегания частиц; концентрация достаточно высока, для того чтобы течение было непрерывным; температура достаточно велика для создания значительной проводимости) и общим магнитным полем (обеспечивающим магнитную связь ионизированной среды, когда средняя длина свободного пробега частиц становится большой), в конечном итоге создает звездный ветер.

Очень трудно говорить о надежности доводов, касающихся давления, поскольку необходимо сделать определенные предположения относительно «начальных» условий, окружающих Солнце. Все стационарные решения (как дозвуковое, так и сверхзвуковое) удовлетворяют требованию сохранения энергии и импульса, и в любом случае давление в конце концов в достаточной степени уменьшается, приводя к равновесному стационарному состоянию. При попытке построить дозвуковой аналог спирального магнитного поля Паркера большие трудности связаны с самосогласованностью: спираль накручивается, $\nabla \times \mathbf{B}$ велико, нерадиальные токи становятся значительными, а закон Ома не удовлетворяется тривиальным образом. Это, по-видимому, исключает любое установившееся дозвуковое течение [20] для вращающейся магнитной звезды, подобной Солнцу. Я считаю, что аргументы относительно давления менее важны, поскольку в начале гипотетической оболочки неупорядоченного магнитного поля (скажем, $\nabla B/B \approx 1$ около 2,5 а.е.) динамическое давление ветра все еще по крайней мере на 3—4 порядка превышает гидростатическое межзвездное давление. При

движении ветра по крайней мере до 45 а. е., т. е. до гипотетической области остановки, могут иметь место сложные неравновесные явления, которые будут смазывать поток. Трудно себе представить магнитную неупорядоченность, которая связывает такую разреженную плазму ($n \approx 10^{-3}$ частиц/см³ на расстоянии 50 а. е.) в настоящую жидкость в столь протяженной области ($\Delta r \approx 50$ а. е.). Тем не менее вполне вероятно, что даже если магнитные силы были бы несущественны, то принцип «минимального давления» мог бы действовать в стохастическом смысле. Это означает, что условия у основания короны постоянно меняются и после очень длительного времени следует ожидать, что эффекты крупномасштабных и мелкомасштабных флуктуаций n , T , v и $\mathbf{B}$ должны привести к установлению среднего течения, которое соответствует самому низкому асимптотическому давлению. В соответствии с другой точкой зрения пределы изменения характера течения ограничены, поскольку любая сильная взрывная волна может возбуждать ветер [11].

Устойчивость течения

Раз установилось быстрое расширение газа, то возникает вопрос о его устойчивости. Выше было показано, что если T , dT/dr и n на расстоянии $2R_\odot$ фиксируются при критических значениях, а $v(2R_\odot)$ уменьшается на 1%, то жидкость остается в дозвуковом режиме, а сразу же за пределами $5R_\odot$ скорость стационарного течения становится очень незначительной по сравнению со скоростью ветра. Фронту потребуется около одного дня, чтобы достичь расстояния $5R_\odot$, где, по-видимому, его движение является дозвуковым. Невероятно, чтобы флуктуации $v(2R_\odot)$ порядка 1% были бы редки в течение такого временного интервала. Ясно, что постоянно должны действовать некая стабилизирующая сила. Значительная вязкость и электромагнитные силы могут объяснить полностью эту локальную стабилизацию путем ускорения медленно движущихся областей фронта до значений, характерных для области сверхзвукового перехода [11]. Но прежде чем вопросы происхождения, устойчивости и остановки ветра будут полностью решены, необходимо дальнейшее исследование временной зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Parker E. N., *Astrophys. J.*, **128**, 664 (1958).
2. Biermann L., *Observatory*, **77**, 109 (1957).
3. Burgers J., *Plasma Dynamics*, ed. F. Clauser, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, Mass., 1960, p. 119.

4. Chapman S., *Astrophys. J.*, **120**, 151 (1954).
5. Chapman S., Zirin H., *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, **2**, № 1, 1 (1957).
6. Chamberlain J. W., *Astrophys. J.*, **131**, 47 (1961).
7. Noble L. M., Scarf F. L., *J. Geophys. Res.*, **67**, 4577 (1962).
8. Chamberlain J. W., *Astrophys. J.*, **133**, 675 (1961).
9. de Jager C., *Space Research III*, ed. W. Priester, Interscience Publ., a division John Wiley and Sons, Inc., New York, 1963, p. 491.
10. Parker E. N., *Astrophys. J.*, **139**, 72 and 93 (1964).
11. Noble L. M., Scarf F. L., *Astrophys. J.*, **138**, № 4, 1169 (1963).
12. Scarf F. L., Noble L. M., *AIAA J.*, **2**, № 6, 1158 (1964). [Русский перевод в журн. «Ракетная техника и космонавтика», М., изд-во «Мир», № 6, 233 (1964).]
13. Erickson W. C., *Astrophys. J.*, **139**, 1290 (1964).
14. Schaaf S. A., Chambré P. L., *Flow of Rarefied Gases*, Princeton Univ. Press, Princeton, N. J., 1961.
15. Meyer P., Parker E. N., Simpson J. A., *Phys. Rev.*, **104**, 768 (1956).
16. McCracken K. G., *J. Geophys. Res.*, **67**, 447 (1962).
17. Carr T. D., Smith A. G., Bollhagen H., Six N. F., Chatterton N. E., *Astrophys. J.*, **134**, 105 (1961).
18. Richter N., *Astr. Nachr.*, **277**, 12 (1949).
19. Axford W. I., Dessler A. J., Gottlieb B., *Astrophys. J.*, **137**, 1268 (1963).
20. Scarf F. L., *Space Physics*, eds. D. P. Le Galley, A. Rosen, John Wiley and Sons, Inc., New York—London—Sydney, 1964, p. 437. (Русский перевод: Космическая физика, под ред. П. Ле Гэлли и А. Розена, М., изд-во «Мир», 1966.)
- 21*. Parker E. N., *Interplanetary Dynamical Processes*, Interscience Publ., a division of J. Wiley and Sons, Inc., New York, 1963. (Русский перевод: Е. Паркер, Динамические процессы в межпланетной среде, М., изд-во «Мир», 1965.)
- 22*. Parker E. N., *Space Sci. Rev.*, **4**, № 5/6, 666 (1965).
- 23*. Parker E. N., *Astrophys. J.*, **145**, № 3, 811 (1966).
- 24*. Whang Y. C., Chang C. C., *J. Geophys. Res.*, **70**, № 17, 4175 (1965).
- 25*. Sturrock P. A., Hartle R. E., *Phys. Rev. Letters*, **16**, № 14, 628 (1966).
- 26*. Brandt J. C., Cassinelli J. P., *Icarus*, **5**, № 1, 47 (1966).
- 27*. Michel F. C., *J. Geophys. Res.*, **72**, № 7, 1917 (1967).
- 28*. Dessler A. J., *Rev. Geophys.*, **5**, № 1, 1 (1967).
- 29*. Мустель Э. П., *Space Sci. Rev.*, **3**, № 2, 139 (1964).
- 30*. Конюков М. В., *Труды Физ. инст. АН СССР*, **38**, 132 (1967).
- 31*. Yeh K. T., *AIAA J.*, **5**, № 5, 1009 (1967).
- 32*. Коган М. Н., *Динамика разреженного газа*, М., изд-во «Наука», 1967.
- 33*. Брагинский С. И., *Вопросы теории плазмы*, вып. 1, М., Атомиздат, 1963, стр. 183.
- 34*. Parker E. N., *Astrophys. J.*, **141**, № 1, 320 (1965).
- 35*. Chamberlain J. W., *Astrophys. J.*, **141**, № 1, 322 (1965).
- 36*. Parker E. N., *Astrophys. J.*, **141**, № 4, 1463 (1965).
- 37*. Wilcox J. M., Ness N. F., *J. Geophys. Res.*, **70**, № 23, 5793 (1965).
- 38*. Scarf F. L., Noble L. M., *Astrophys. J.*, **141**, № 4, 1479 (1965).
- 39*. Wolfe J. H., Silva R. W., McKibbin D. D., Mason R. H., *J. Geophys. Res.*, **71**, № 13, 3329 (1966).
- 40*. Hundhausen A. J., Asbridge J. R., Bame S. I., Gilbert H. E., Strong I. B., *J. Geophys. Res.*, **72**, № 1, 87 (1967).
- 41*. Scarf F. L., Wolfe J. H., Silva R. W., *J. Geophys. Res.*, **72**, № 3, 193 (1967).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА СКАРФА

Люст. Учитывал ли Блекуэлл течение плазмы при расчетах электронных концентраций по интенсивности зодиакального света? Не содержат ли его распределения концентраций ошибки?

Атей. Зависимость течения от гидростатического равновесия учитывалась. Яркость рассеянного света включает лишь концентрацию.

Зирин. Берется наблюдаемое распределение яркости в короне и устанавливается связь с концентрацией при помощи интегрального уравнения. Это уравнение включает модель концентрации в форме Баумбаха, в которой концентрация равна коэффициенту, умноженному на r^3 , плюс член, умноженный на r^7 , и т. д. Но, как сказал Атей, в этих моделях вряд ли допускается гидростатическое равновесие.

Дейч. Что можно сказать о свойствах пересчета в области, где течение приближенно адиабатическое? Является ли поток относительно нечувствительным к температуре или к концентрации? Применима ли эта же модель к течению на большом расстоянии от других звезд?

Скарф. Мне не хотелось бы делать подобные заявления, поскольку зависимость асимптотического течения от условий на поверхности крайне нелинейна и сложна. В рассмотренной мною задаче есть несколько особых предположений, которые неприменимы в другом случае. Во-первых, скорость убегания меньше тепловой скорости, которая в свою очередь меньше скорости течения. Это может оказаться несправедливым для другой звезды. Во-вторых, поскольку температура у основания короны настолько высока, что перенос энергии за счет теплопроводности велик во всей нижней короне, это обуславливает переход через звуковой барьер. Если температура падает очень быстро с расстоянием, то градиент давления может и не создать ветра. Кроме того, плотность звезды должна быть достаточно высокой, чтобы этот переход имел место там, где плазма все еще ведет себя как жидкость. Если переход имеет место вне экзосферы, где можно пренебречь соударениями, то об этом не следует беспокоиться. Мы хотели применить наш метод к другой звезде, но мы всегда оказывались в тупике, поскольку не располагали достаточными данными, касающимися поверхностных условий.

Дейч. Разве звездные ветры обычно аппроксимируются адиабатическими течениями на больших расстояниях?

Скарф. Да, в общем теплопроводность и вязкость должны быть отброшены либо вследствие зависимости эффектов от скорости, либо вследствие влияния магнитных полей. Магнитные поля подавляют оба эти коэффициента, это еще одна причина для перехода к адиабатическому решению. По-видимому, адиабатическое решение становится преобладающим.

Люст. Почему вы не были убеждены доводами Паркера и других об отсутствии возможных дозвуковых решений для солнечного ветра?

Скарф. Следует различать две возможности. Если звезда вращается и обладает сравнительно сильным магнитным полем, как наше Солнце, то решение, соответствующее наименьшему давлению или солнечному ветру, характеризует неизбежное конечное состояние. Это, по-видимому, обусловлено тем, что невозможно удовлетворить уравнениям $\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{j}$ и $\mathbf{F} = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0$ как для протонов, так и для электронов, где поле сильное и наматывается в виде плотноупакованных спиралей. Эта конфигурация поля была бы необходима для дозвукового течения, поскольку $v(r)$ в таком случае стало бы очень малым по сравнению с Ωr в области, где магнитное поле еще способно оказывать сильное влияние [скажем, $r \approx (7-10)R_{\odot}$]. Для гипотетической немагнитной, невращающейся звезды единственными свойствами, отличающими различные виды стационарных течений, являются те, которые включают давление и градиенты давления на больших расстояниях. Даже «дозвуковые» решения с конечным потоком энергии становятся сверхзвуковыми, поскольку

эквивалентная температура жидкости формально уменьшается на больших расстояниях и в этом смысле сверхзвуковой ветер обычно неизбежен. Однако этот довольно отдаленный «переход» должен произойти, когда поведение течения сильно отличается от поведения истинной жидкости. Поступают не очень строго, описывая такой характер течения, как солнечный ветер. На рис. 3 гл. 13 обозначен этот случай как «дозвуковое» решение, и вопрос, который я имею в виду, связан с возможностью, что такое распределение может иметь смысл для гипотетической звезды. Это ни решение наименьшего давления, ни наиболее устойчивое решение, однако у нас нет строгих представлений о временном масштабе формирования обычного ветра. Итак, я думаю, что мы не можем исключить этот тип решения.

Паркер. Если скорость течения около поверхности Солнца выбрана совершенно произвольно, то в общем нельзя найти решение, которое применимо от Солнца до бесконечности. Решения для данной температуры конечны и нужно подобрать точное решение. Однако можно не беспокоиться об этом, поскольку условия в критической точке определяют весь характер течения в целом. Предоставьте поток самому себе, и он автоматически достигнет равновесия при соответствующем критическом решении.

Замечание редакторов. Петчек указал, что в бесстолкновительной внешней короне микроскопические плазменные неустойчивости могут играть более важную роль, чем гидромагнитные неустойчивости, рассмотренные Скарфом. Он также отметил, что роль флуктуаций магнитного поля не только в том, чтобы просто поддерживать ионизованный газ в состоянии, подобном жидкости. Он высказал мнение, что можно определить коэффициенты переноса, связанные с этими эффектами.

Скарф. В самом начале анализа следует рассмотреть магнитные эффекты. Однако неизвестно, какими должны быть теплопроводность или вязкость. Несомненно, они не должны включать коэффициенты, связанные с соударениями за счет кулоновских сил дальнего действия. Частицы могут влиять друг на друга путем рассеяния на неоднородностях магнитного поля, а это означает, что возможно преобразование некоторого количества энергии в тепло, однако пока еще невозможно написать уравнения или коэффициенты переноса, описывающие это явление.

Зирин. Физиков Солнца уже давно беспокоит следующее противоречие: разница между температурой короны, определяемой по доплеровскому уширению спектральной линии, и температурой короны, вычисленной на основе ионизационного баланса.

Бюргес¹⁾ недавно отметил, что в условиях короны коэффициент диэлектронной рекомбинации²⁾ примерно в 20 раз превышает коэффициент радиационной рекомбинации. Теперь можно сказать, что наблюдаемый ионизационный баланс соответствует значительно более высокой температуре (~1,5 млн. градусов), которая согласуется с доплеровской температурой. Другие расчеты были выполнены Джеффрисом в Боулдере и Треффтом в Мюнхене, при этом были получены примерно такие же результаты.

При диэлектронной рекомбинации захват электронов ионом может привести либо к излучению фотона, либо к возбуждению иона на более высокий уровень. В последнем случае захваченный электрон передает часть своей энергии одному из связанных электронов. Образовавшееся дважды возбужденное состояние иона предшествующего порядка ионизации может затем преобразоваться путем обычного излучения фотона.

¹⁾ A. Burgess, *Astrophys. J.*, 139, 776 (1964).

²⁾ Представление о процессах диэлектронной рекомбинации можно получить в работе: I. Mcdaniel, *Collision Phenomena in Ionized Gases*, New York, 1964. (Русский перевод: И. Мак-Даниель, *Процессы столкновений в газах*, М., изд-во «Мир», 1967.) — *Прим. ред.*

ВЛИЯНИЕ ДИФФУЗИИ НА СОСТАВ
СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ И СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Дж. Р. Джокипи

В этом сообщении подведены итоги исследований влияния радиальной диффузии на солнечную корону и солнечный ветер. Мы предположили, что на расстоянии 1 а. е. существует солнечный ветер с интенсивностью потока протонов $3 \cdot 10^8$ протон/см² · сек, и получили кинематическое описание эффектов диффузии. Влияние диффузии на динамику солнечного ветра не исследовалось. Некоторые аспекты последней проблемы были рассмотрены Паркером на симпозиуме в Клаудкрофте [1].

Провести эту работу нас побудил тот факт, что плазменные данные «Маринера-2» постоянно давали отношение концентрации α -частиц к концентрации протонов меньше принятого для Солнца значения 0,1¹). Настоящее исследование показывает, что радиальная диффузия в короне может вызвать существенное уменьшение содержания α -частиц и других тяжелых ионов в солнечном ветре. Кроме того, содержание этих элементов может существенно увеличиться в нижней короне. Иными словами, солнечный ветер оставляет эти ионы в нижней короне, стремясь увеличить их содержание в короне и уменьшить в солнечном ветре²).

Чтобы получить количественную оценку заселенности, была разработана простая, но довольно общая модель. Корона течет наружу от Солнца и образует солнечный ветер. Точные детали течения несущественны, оно не должно статистически зависеть от времени, если произвести усреднение за интервалы времени, достаточно большие по сравнению с временем хаотических флуктуаций в короне. Таким образом, для данного элемента уравнение непрерывности имеет следующий вид: $nvr^2a(r) = \text{const}$,

¹) Данные «Маринера-2» показывают, что среднее значение отношения $n_\alpha/n_p \approx 0,046$ (см. гл. 1), а данные спутника «Вела-3» дают $n_\alpha/n_p \approx 0,042$ при диапазоне изменения от 0,00 до 0,15 [2*]. — Прим. перев.

²) Увеличение содержания тяжелых элементов в солнечной короне Брандт объяснил естественной способностью более легких элементов ускользать с поверхности Солнца вместе с солнечным ветром [3*]. — Прим. перев.

где $a(r)$ — мера отклонения от сферической симметрии, а n и v — усредненные по времени концентрация частиц и радиальная скорость соответственно. Деля уравнение непрерывности для элемента A на соответствующее уравнение для протонов, получаем

$$\left(\frac{n_A}{n_p}\right)_{r_1} = \left(\frac{n_A}{n_p}\right)_{r_0} \left[\frac{(v_A/v_p) r_0}{(v_A/v_p) r_1} \right]. \quad (1)$$

Очевидно, если член в квадратной скобке отличен от единицы, то следует ожидать изменений содержания протонов в элементе A . Заметим, что соотношение (1) не требует сферической симметрии потока.

Поскольку средняя длина свободного пробега частицы в короне мала, то воспользуемся уравнениями газодинамической диффузии. Мы рассмотрим только α -частицы, хотя аналогичные результаты были получены для более тяжелых ионов.

Допустим, что магнитное поле почти радиально. Корональный газ — это смесь трех компонент: протонов, α -частиц и электронов. Радиальную составляющую уравнения диффузии можно записать в форме

$$\frac{v_p - v_a}{v_p} = \frac{v_D}{v_p} = \frac{T^{3/2}}{n_p v_p r^2} \left[f \left(\frac{n_a}{n_p} \right) - g \left(\frac{n_a}{n_p} \right) \frac{r^2}{R_\odot^2} \frac{dT}{dr} + \right. \\ \left. + h \left(\frac{n_a}{n_p} \right) \frac{r^2}{R_\odot^2} \frac{T}{1 - (v_D/v_p)} \frac{d}{dr} \left(\frac{v_D}{v_p} \right) \right]. \quad (2)$$

Три члена в правой части соответствуют диффузии за счет градиентов давления, температуры и концентрации¹⁾, f , g и h — медленно меняющиеся функции n_a/n_p . Если ввести сферическую симметрию, то $n_p v_p r^2 = \text{const}$ и численное значение можно получить из данных «Маринера-2». Зависимость v_a/v_p от n_a/n_p , T и $\partial T/\partial r$ в таком случае можно определить из уравнения (2). Характер этой зависимости для $n_a/n_p = 0,1$ показан на рис. 1. Как видно, скорость диффузии v_D может составлять заметную часть скорости протонов в короне. Кроме того, заметна слабая зависимость от градиента температуры короны.

Справедливость уравнения (2) для солнечного ветра на больших расстояниях сомнительна. Однако разумно предположить, что скорость диффузии стремится к нулю при больших r либо вследствие справедливости уравнения (2) и падения температуры, либо вследствие подавления диффузии хаотическими магнитными полями.

¹⁾ Иначе говоря, бародиффузия, термодиффузия и просто диффузия. Вопрос о термодиффузии рассматривался Ситоном [4*]. — *Прим. ред.*

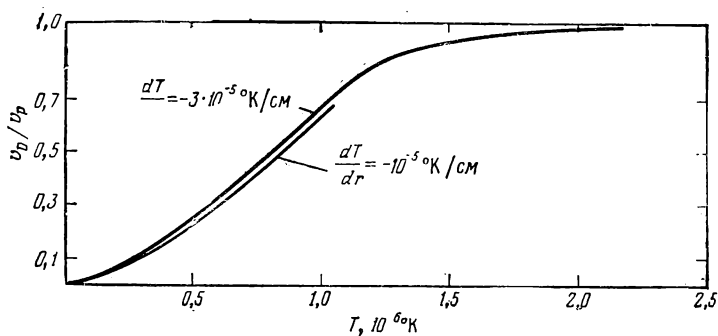


Рис. 1. Относительная скорость диффузии α -частиц и протонов в зависимости от температуры для интенсивности потока протонов в солнечном ветре $n_p v_p = 3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ на расстоянии 1 а. е. для $n_\alpha/n_p = 0,1$.

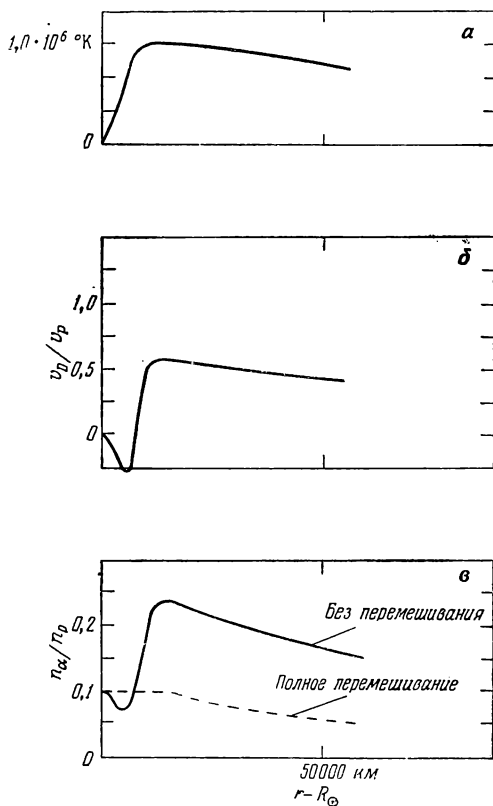


Рис. 2. а — принятое для расчетов изменение температуры в зависимости от радиального расстояния; б — вычисленная относительная скорость диффузии в функции высоты над фотосферой; в — вычисленное относительное содержание α -частиц в функции высоты над фотосферой.

Итак, уравнения (1) и (2) можно использовать для вычисления n_α/n_p в зависимости от радиального расстояния. Результаты для типичного профиля температуры, представленного на рис. 2, а, показаны на рис. 2, б и в. Для фотосферы n_α/n_p было принято равным 0,1, хотя аналогичное поведение ожидается при других значениях этого отношения. По мере перемещения наружу большие температурные градиенты в хромосфере приводят к отрицательным значениям v_D/v_p и к слабому уменьшению n_α/n_p . В короне температура очень высока, и n_α/n_p увеличивается. Наконец, при больших r n_α/n_p опять возвращается к 0,1. Это поведение n_α/n_p показано на рис. 2, в сплошной линией.

Физически это можно объяснить так. Слой с высоким содержанием α -частиц неустойчив и стремится перемешаться с нижележащими областями, т. е. области с большим содержанием α -частиц опускаются вследствие их более высокой плотности. Такое перемешивание стремится поддерживать в короне $n_\alpha/n_p \approx 0,1$. Если бы перемешивание было идеальным, то изменение n_α/n_p в зависимости от r соответствовало бы прерывистой кривой рис. 2, в. Действительное поведение n_α/n_p , вероятно, описывается кривой, которая расположена где-то между прерывистой и сплошной кривыми рис. 2, в. Это означает, что перемешивание будет иметь место, но оно недостаточно эффективно, чтобы поддерживать n_α/n_p на уровне фотосферного значения. Таким образом, по-видимому, происходит как увеличение концентрации α -частиц (а следовательно, и других тяжелых ионов) в солнечной короне, так и уменьшение их концентрации в солнечном ветре.

Следует подчеркнуть, что эти результаты относятся лишь к средним значениям, так что следует ожидать временных флуктуаций. Данные «Маринера-2», по-видимому, указывают на существование таких флуктуаций¹⁾.

ЛИТЕРАТУРА

1. Parker E. N., The Solar Corona, ed. J. W. Evans, Academic Press, New York, 1963, p. 11.
2. Hundhausen A. J., Asbridge J. R., Bame S. J., Gilbert H. E., Strong I. B., J. Geophys. Res., 72, № 1, 87 (1967).
3. Brandt J. C., Astrophys. J., 143, № 1, 265 (1966).
4. Seaton M. J., Observatory, 84, 229 (1964).
5. Neugebauer M., Snyder C. W., J. Geophys. Res., 71, № 19, 4469 (1966).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА ДЖОКИПИ

Атей. Следует помнить, что основную информацию о содержании гелия на Солнце мы получаем на основе спектров протуберанцев, которые конден-

¹⁾ Наличие таких флуктуаций следует из [5*]. — Прим. перев.

сируются в короне, и спектров хромосферы. Содержание гелия как в хромосфере, так и в короне одинаково. Другое дело, что динамические процессы важнее, чем диффузия. Подача вещества в нижнюю корону спикулами происходит с такой скоростью, что вещество всей короны может быть заменено в течение часа. Аналогично, если бы вещество текло вниз со скоростью, которую мы наблюдаем в протуберанцах, то корона была бы полностью опустошена в течение 10 час.

Дэвис. Желательно иметь корону, перемешанную какими-либо процессами, а не опрокинутую вследствие разделения. Такие процессы позволяют получить хорошо перемешанную нижнюю часть. Однако если перемешивание простирается во внешние слои настолько, что оно захватывает слой, в котором происходит диффузия, то невозможно объяснить низкую плотность тяжелых ионов в солнечном ветре.

Зирин. В последнее время большой интерес вызвал вопрос о предполагаемом различии обилия железа в короне и в фотосфере. Определение содержания железа в короне дает гораздо более высокие значения, чем анализ кривой роста спектра фотосферы.

Джокипи. Наиболее интересная часть этого расчета — механизм, ответственный за высокую концентрацию железа в короне. Этот же механизм может привести к уменьшению концентраций в солнечном ветре.

Голд. Любое значительное разделение ионов, происходящее в короне, обеспечило бы способ определения источника газа в каждом случае. Вероятно, иногда газ выходит с очень глубоких уровней солнечной атмосферы, а иногда из более внешних областей короны. Не плохо было бы, если бы мы могли определять источник любой отдельной массы газа, производя измерения при помощи космического зонда. Измеряя отношение α -частиц к протонам или отношение ионов, мы могли бы установить величины обилия этих частиц в плазме, выбрасываемой вспышками или *M*-областями.

Паркер. Как отмечалось¹⁾, имеются данные, указывающие на то, что отношение элементов в солнечных энергичных частицах от гелия и выше сохраняет исключительное постоянство от одного события к другому. Это очень определенно указывает на то, что вы видите истинное солнечное содержание элементов.

¹⁾ С. E. Fichtel, D. E. Guss, Phys. Rev. Letters, **6**, 495 (1961). S. Biswas, P. S. Freier, J. Geophys. Res., **66**, 1029 (1961). S. Biswas, J. Geophys. Res., **67**, 2613 (1962). E. P. Ney, W. A. Stein, J. Geophys. Res., **67**, 2087 (1962). S. Biswas, P. S. Freier, W. A. Stein, J. Geophys. Res., **67**, 13 (1962).

ПЕРЕСОЕДИНЕНИЕ И ИСЧЕЗНОВЕНИЕ
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Х. Е. Петчек

Рассмотрим довольно идеализированную конфигурацию плазмы, в которой магнитные поля двух смежных областей имеют противоположно направленные магнитные силовые линии. Задача состоит в определении скорости сближения противоположно направленных магнитных силовых линий и их пересоединения. Эта задача, очевидно, близко связана с вопросом отрыва магнитных силовых линий от поверхности Солнца. Однако применимость этого анализа еще не разработана окончательно¹⁾.

Из анализа Паркера [1, 2] и Свита [3] следует, что скорость сближения силовых линий равна альвеновской скорости, деленной на квадратный корень из магнитного числа Рейнольдса. Для разумных значений проводимости солнечной плазмы и для разумных размеров конфигурации, параллельной границе, магнитное число Рейнольдса очень велико. Таким образом, скорость сближения составляет очень малую часть альвеновской скорости.

Настоящий анализ, включающий механизм распространения волн в плазме, показывает, что скорость сближения магнитных силовых линий примерно равна альвеновской скорости, деленной на логарифм магнитного числа Рейнольдса²⁾. Поскольку значения логарифмов редко превышают 10, скорость сближения оказывается равной примерно $1/10$ альвеновской скорости. Иными словами, сближение магнитных силовых линий происходит значительно быстрее, и скорости сближения не слишком отличаются от ожидаемых скоростей гидродинамического течения³⁾.

¹⁾ Различные аспекты как теории пересоединения и исчезновения магнитных полей, так и других теорий применительно к солнечным вспышкам рассмотрены на симпозиуме по солнечным вспышкам, проведенном в США в 1963 г. [5*], а также в одной из последних работ Старрока и Коппи [6*]. Рассмотрение механизма диссипации магнитных полей Петчека применительно к межзвездным облакам и к общему галактическому полю выполнено Вентцелем [7*]. — *Прим. перев.*

²⁾ Детали этого анализа приведены в [4].

³⁾ Более общая двумерная задача о течении намагниченной плазмы рассмотрена С. И. Сыроватским [8*]. — *Прим. перев.*

Диффузионная модель

Конфигурация, предложенная Паркером и Свитом, представлена на рис. 1. В этой модели жидкость движется к границе

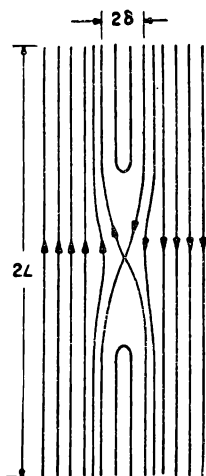


Рис. 1. Модель Паркера — Свита «схлопывания» магнитных полей в нейтральной точке.

$$B_x = 0; \quad J_z = \sigma E_z;$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \rightarrow E_z = \frac{-u_{x0} B_{y0}}{c};$$

$$\frac{4\pi J_z}{c} 2\delta = 2B_{y0};$$

$$u_{x0} = \frac{c^2}{4\pi\sigma\delta};$$

$$u_{x0}L = v\delta; \quad \frac{1}{2}\rho v^2 = p - p_0 = \frac{B_{y0}^2}{8\pi} = \frac{1}{2}\rho V_A^2;$$

$$M_0 = \frac{u_{x0}}{V_A} = \sqrt{\frac{c^2}{4\pi\sigma V_A L}} = \frac{1}{\sqrt{R_m}}.$$

двух противоположно направленных магнитных полей со скоростью u_{x0} , а затем течет вдоль границы со скоростью v . Для определения стационарной картины они приравнивали скорость, при которой магнитное поле диффундирует наружу через жидкость,

к скорости, при которой жидкость движется к границе. Скорость диффузии магнитного поля примерно равна $c^2/4\pi\delta\sigma$, где 2δ — ширина граничной области. Исключая δ при помощи уравнения непрерывности и замечая, что уравнение Бернулли для этой конфигурации означает примерное равенство скорости течения жидкости вдоль границы и альвеновской скорости, они пришли к результату $M_0 = u_{x0}/V_A = 1/\sqrt{R_m}$.

Однако в этом анализе не учитывается тот факт, что существует механизм распространения волн, который позволяет получить конечную конфигурацию магнитного поля из первоначальной. Под механизмом распространения волн подразумевается конфигурация установившегося течения, в которой существуют стоячие волны, в том же самом смысле, в каком головная ударная волна магнитосферы является стоячей волной в плазменном потоке. Это означает, что волна распространяется относительно жидкости, но остается неподвижной в системе координат, которая неподвижна относительно магнитосферы. Скорость распространения волн не зависит от электрической проводимости среды. Если пересоединение происходит главным образом за счет волн, то скорость пересоединения значительно увеличится и будет гораздо меньше зависеть от проводимости.

Волны в плазме

Остановимся кратко на типах волн, которые могут существовать в плазме¹⁾. Если записать магнитогидродинамические уравнения и определить из них скорости распространения линейных волн под различными углами к магнитному полю, то в результате получим векторную диаграмму скоростей, представленную на рис. 2. Внешняя окружность представляет «быструю» волну²⁾, которая нам известна лучше всего, и движется примерно с одинаковой скоростью во всех направлениях. Ее скорость по порядку величины равна либо скорости звука, либо альвеновской скорости в зависимости от соотношения магнитного и статического давлений. Кроме того, существуют промежуточные и медленные волны. (Промежуточные волны — это те волны, которые впервые рассмотрел Альвен³⁾.) Промежуточные и медленные волны вообще не распространяются перпендикулярно к магнитному полю, т. е. когда волны строго перпендикулярны

¹⁾ Более подробное представление о характере волн в плазме и их распространении можно получить в [9*—12*]. — *Прим. перев.*

²⁾ Быструю магнитозвуковую волну в соответствии с терминологией, принятой в [9*]. — *Прим. ред.*

³⁾ См. [10*]. — *Прим. перев.*

к полю, скорость их распространения стремится к нулю. Однако если допустить существование малой перпендикулярной к границе составляющей магнитного поля, — а такая составляющая

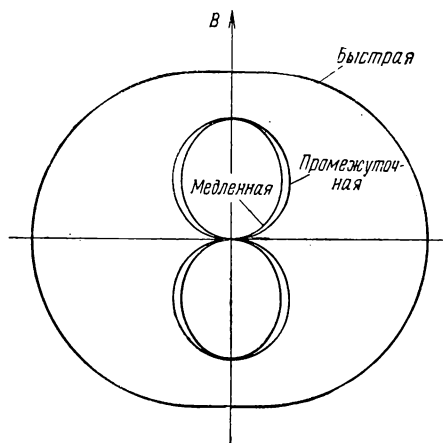


Рис. 2. Векторная диаграмма скорости распространения волн под различными углами к магнитному полю. Скорость волны пропорциональна расстоянию от начальной точки.

существует даже в конфигурации Паркера, — обе волны будут иметь малые, но конечные скорости распространения.

Конфигурация стоячей волны

Итак, посмотрим, можно ли построить такую структуру, в которой комбинация этих волн привела бы к изменению направления магнитного поля. Возьмем частный случай, в котором концентрация частиц по обе стороны от границы одинакова. (Различие концентраций частиц означает лишь, что необходимы слабо отличающиеся волны; это различие влияет только на детали структуры.) Возможная конфигурация магнитного поля и волны представлена на рис. 3. Мы исследуем эту структуру на самосогласованность. Сначала не будем учитывать область в непосредственной близости от нейтральной точки, где, как позже будет видно, волновое решение необходимо согласовать с диффузионным решением, чтобы избежать особенности. На рис. 3 представлена симметричная структура с двумя волнами, распространяющимися от границы. На волновом фронте наблюдается резкое изменение направления магнитного поля и соответствующее внезапное изменение скорости течения вдоль гра-

ницы. Иначе говоря, область, заключенная между волнами, содержит жидкость, быстро движущуюся вдоль оси y , и магнитное поле, направленное вдоль оси x .

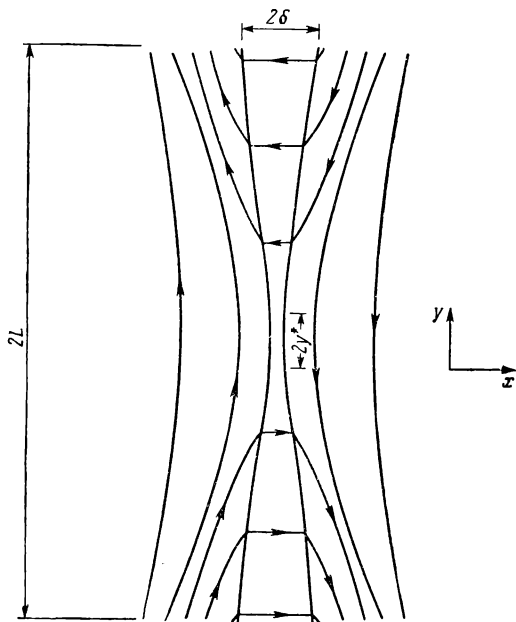


Рис. 3. Конфигурация стоячей волны, связанная с потоком, направленным в нейтральную точку.

Если y — расстояние, измеряемое вдоль границы, а δ — полутолщина граничного слоя, то требование сохранения массы приведет к соотношению

$$u_{x0}y = v\delta, \quad (1)$$

где мы предположили, что концентрация между волнами является такой же, как и вне их. (Сжимаемость не изменяет существенно скорость соединения.)

Уравнение количества движения в направлении оси y можно записать в виде

$$\frac{d}{dy}(\rho v^2 \delta) = -\frac{B_{y0} B_x}{4\pi}, \quad (2)$$

где B_x — составляющая магнитного поля внутри граничного слоя. Уравнение (2) выражает равенство скорости изменения потока количества движения в граничном слое и магнитных сил.

Градиент давления не учитывался, поскольку давление в граничном слое не зависит от y . Уменьшение давления до значения в окружающей среде, которое рассматривалось в предыдущих анализах, должно произойти вблизи границы. Уравнения (1) и (2) можно объединить в виде

$$M_0^2 \frac{d}{dy} \left(\frac{y^2}{\delta} \right) = -b_x, \quad (3)$$

где $b_x = B_x/B_{y0}$ и $M_0 = u_{x0}/V_A$. На значительном расстоянии от нейтральной точки следует ожидать, что будет преобладать распространение волн. В этом случае, приравнявая скорость втекания жидкости в граничный слой к скорости распространения волн, получаем

$$M_0 = |b_x|. \quad (4)$$

Скорость распространения волны зависит только от нормальной составляющей магнитного поля, а не от его полной величины. В уравнении (4) необходимо использовать абсолютное значение b_x , поскольку волна может распространяться в любом направлении вдоль магнитного поля. Для течения, мало отличающегося от однородного, это уравнение требует, чтобы $|b_x|$ было постоянным вдоль граничного слоя. Подставляя (4) в (3), получаем

$$\delta = 2M_0 |y|. \quad (5)$$

Иными словами, толщина граничного слоя увеличивается по линейному закону с ростом y .

Область диффузии

Поскольку существование нейтральной точки типа X требует, чтобы b_x была нечетной функцией y , постоянство $|b_x|$ подразумевает разрывный скачок b_x в нейтральной точке, что, безусловно, абсурдно. Таким образом, в нейтральной точке волновая структура разрушается и следует рассматривать диффузию.

Если в диффузионной области полностью пренебречь волновым распространением, то в пределах этой области применим анализ Паркера. Однако высота диффузионной области $2y^*$ мала по сравнению с полной длиной граничной области $2L$. Если в уравнении $u_{x0}L = v\delta$ (см. рис. 1) L заменить на y^* , то это уравнение определяет согласованное значение y^* для данной скорости сближения u_{x0} магнитных силовых линий. Легко проверить, что с точностью до множителя 2 решение для диффузионной

области согласуется с решением для волновой области в соответствии с двумя другими связанными критериями: а) значения толщины границы, определенные диффузионным методом (см. рис. 1) и методом, характерным для волновой области [уравнение (5)], равны при $y=y^*$; б) значение b_x растет линейно в пределах диффузионной области, и при $y=y^*$ оно равно M_0 , т. е. значению, которое требуется по анализу в волновой области [уравнение (4)].

Поле внешнего течения

Структура, полученная объединением волновой и диффузионной областей, описывает условия в граничной области для произвольных значений скорости втекающего потока. В эти условия включено требование об определенном изменении нормальной составляющей магнитного поля b_x . Необходимо определить, согласуется ли это b_x с характером течения во внешней по отношению к границе области. Очевидно, требование, чтобы магнитные силовые линии пересекали границы, приводит к тому, что магнитные силовые линии изгибаются в нейтральной точке, как показано на рис. 3. Поскольку во внешней области сильные токи отсутствуют и поскольку среда обладает высокой проводимостью, внешнее течение можно рассматривать как бесконечно проводящую среду, пренебрегая джоулевой диссипацией. Кроме того, поскольку магнитные силовые линии должны изгибаться очень слабо, то внешнее течение будет лишь слегка возмущено по сравнению с однородным течением к границе, и его можно рассматривать как линейное возмущение такого однородного течения. Легко проверить, что для несжимаемого течения как поле течения, так и магнитное поле являются решениями уравнения Лапласа с точностью до членов первого порядка в таком разложении. Для противоположного предельного случая пренебрежимо малого газового давления по сравнению с магнитным давлением магнитное поле по-прежнему является решением уравнения Лапласа, поскольку в этом случае течение не может допустить значительных сил $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$. Соответствующее решение уравнения Лапласа определяется из условия, что нормальная составляющая магнитного поля дается выражением (4) для $|y| > y^*$ и изменяется линейно между $-y^*$ и y^* . Во внешнем течении наибольшее изменение магнитное поле претерпевает около нейтральной точки сразу же вне диффузионной части границы. Вычисляя изменение магнитного поля в этой точке вышеуказанным методом, находим

$$\frac{\Delta B_y}{B_{y0}} = - \frac{2M_0 \ln R_m}{\pi}. \quad (6)$$

Предельная скорость течения

Вышеприведенный анализ определяет поле течения через скорость сближения магнитных силовых линий M_0 и, по-видимому, справедлив для некоторого диапазона значений M_0 . Это вполне разумно, поскольку всегда можно представить себе такие случаи, когда скорость течения ограничивается внешними условиями до значения более низкого, чем скорость, при которой допускается пересоединение магнитных силовых линий в нейтральной точке. Нас интересует предельная скорость, определяемая пересоединением в нейтральной точке в отсутствие внешних ограничений. Иными словами, нужно выяснить, существует ли предельное значение M_0 , выше которого течение не может существовать.

Уравнение (6), взятое для значения на поверхности, подразумевает изменение знака B_y при достаточно больших значениях M_0 . Однако следует помнить, что как во внешнем течении, так и в граничной области принято $\Delta B_y/B_{y0} \ll 1$, поэтому выше некоторого значения M_0 анализ не действителен. Можно приблизительно определить, стремятся ли нелинейные члены ограничить течение в этом разложении. Скорость течения в области диффузии пропорциональна альвеновской скорости, а следовательно, напряженности магнитного поля сразу же за ее пределами. Поскольку V_A уменьшается с увеличением M_0 , то можно ожидать, что процесс ограничивается, когда $\Delta B_y/B_{y0}$ становится значительным. Точное определение предела требует более сложного статистического анализа. Однако можно получить разумное приближение, если установить, что нелинейные члены становятся существенными и ограничивают течение, когда $\Delta B_y/B_{y0} = 1/2$. Подставляя это значение в (6), мы находим для предельной скорости пересоединения

$$M_0(\max) = \frac{\pi}{4 \ln R_m}. \quad (7)$$

Как указывалось во введении, этот результат показывает, что скорость, при которой магнитные силовые линии пересекают границу и пересоединяются, уменьшается лишь логарифмически с увеличением магнитного числа Рейнольдса и поэтому даже при экстремальных значениях проводимости и характерных длин эта скорость все еще будет составлять десятую часть альвеновской скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Parker E. N., J. Geophys. Res., **62**, 509 (1957).
2. Parker E. N., Astrophys. J., Suppl. Ser. **77**, **8**, 177 (1963).
3. Sweet P. A., Proceedings of the IAU Symposium on Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics, № 6, ed. B. Lehnert, Cambridge Univ. Press, New York, 1958, p. 123.

4. Petschek H. E., AAS-NASA Symposium on the Physics of Solar Flares, SP-50, ed. W. H. Hess, NASA, Washington, D. C., 1964.
- 5*. NASA, Proc. AAS-NASA Symposium on the Physics of Solar Flares, ed. W. N. Hess, NASA CP-50, Washington, D. C., 1964, p. 389—457.
- 6*. Sturrock P. A., Coppi B., *Astrophys. J.*, **143**, № 1, 3 (1966).
- 7*. Wentzel D. G., *Astrophys. J.*, **145**, № 2, 595 (1966).
- 8*. Сыроватский С. И., *Астрон. ж.*, **43**, № 2, 340 (1966).
- 9*. Куликовский А. Г., Любимов Г. А., *Магнитная гидродинамика*, М., Физматгиз, 1962.
- 10*. Alfvén H., Fälthammar C.-G., *Cosmical Electrodynamics*, 2nd ed., Oxford Univ. Press, London, 1963. (Русский перевод: Г. Альвен, К.-Г. Фельтхаммар, *Космическая электродинамика*, М., изд-во «Мир», 1967.)
- 11*. Гинзбург В. Л., *Распространение электромагнитных волн в плазме*, 2-е изд., М., изд-во «Наука», 1967.
- 12*. Франк-Каменецкий Д. А., *Лекции по физике плазмы*, М., Атомиздат, 1964.

Часть IV

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР И МАГНИТОСФЕРА

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
С МАГНИТОСФЕРОЙ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

У. И. Эксфорд

Солнечный ветер в гидродинамическом приближении

Поток солнечного ветра, огибающего магнитосферу, вполне разумно рассматривать как поток жидкости. С первого взгляда это может показаться странным, поскольку средняя длина свободного пробега в межпланетной среде в окрестности Земли порядка 1 а.е. Однако представление, что средняя длина свободного пробега служит характерным размером, который определяет, ведет ли себя среда как жидкость, лишь вводит в заблуждение.

Рассмотрим два предельных случая потока, огибающего препятствие. В случае ньютоновского потока отдельные частицы газа движутся совершенно независимо, и если они наталкиваются на какое-либо препятствие, то отражаются. Каждая частица в отдельности наталкивается на тело, поскольку они не были «предупреждены» о том, что оно существует на их пути, и не могут уклониться. Если газ ведет себя подобно жидкости, то частицы «принимают меры». Большинство из них избегают столкновения с препятствием и огибают его. Частицы узнали о препятствии и среагировали на это, поэтому жидкость можно рассматривать как «обученный газ». Нет необходимости говорить о соударениях, скорее ключом является *информация*. Ситуация в какой-то степени подобна движению транспорта. Когда поток автомобилей достигает светофора, показывающего красный свет, то останавливается первая машина, затем следующая и так далее. Автомобили узнают о сигнале светофора, не сталкиваясь [1].

Как информация распространяется в жидкости? При помощи волн. Препятствие в потоке стремится генерировать спектр волн с максимумом на длине волны, сравнимой с некоторым характерным размером препятствия. Если большинство волн генерированного таким образом спектра могут распространяться и если частицы могут получить информацию, переносимую волнами, и

реагировать соответствующим образом, то в таком случае частицы ведут себя как сплошная жидкость.

Рассмотрим движение бейсбольного мяча в воздухе, в котором распространяются лишь звуковые волны. Мяч генерирует вокруг себя поле давления. Это поле можно рассматривать как поле «виртуальных фононов», которые сообщают информацию набегающим молекулам газа только что рассмотренным способом, заставляя молекулы воздуха обтекать мяч без столкновения с ним. Однако акустические волны сильно затухают, если их длина сравнима или меньше средней длины свободного пробега, следовательно, более короткие волны в виртуальном спектре фононов отсутствуют. Если воздух настолько разрежен, что средняя длина свободного пробега больше размеров мяча, то большая часть спектра теряется, и воздуху сообщается очень мало информации о присутствии мяча, поэтому воздух ведет себя как ньютоновский поток.

В плазме совсем необязательно, чтобы обычные акустические волны переносили информацию, а средняя длина свободного пробега больше не играет такой существенной роли. Пока в соответствующей части спектра имеются волны, распространяющиеся без сильного затухания, среда будет вести себя как непрерывная жидкость. В бесстолкновительной плазме могут распространяться различные типы волн. Довольно неясно, в каком месте происходит переход к ньютоновскому потоку. Можно ожидать, что в какой-то степени плазма ведет себя как жидкость даже тогда, когда характерные размеры препятствия приближаются к дебаевскому радиусу. Надежнее всего предположить, что плазма ведет себя как жидкость, если размеры препятствия больше ларморовского радиуса ионов. Для межпланетной среды в окрестностях Земли ларморовский радиус ионов не больше $\sim 10^3$ км, а дебаевский радиус равен ~ 10 м. Таким образом, поскольку поперечник магнитосферы составляет $\sim 10^5$ км, следует считать, что течение солнечного ветра вокруг магнитосферы соответствует течению сплошной жидкости.

Сверхзвуковой поток и ударные волны

Плазма является дисперсионной средой, а следовательно, передача информации довольно сильно усложняется. Чтобы решить, следует ли считать поток сверхзвуковым или дозвуковым, я предлагаю сравнивать скорость потока с фазовой скоростью волн, которые несут большую часть информации (волн, длина которых сравнима с размерами тела). Таким образом, для солнечного ветра и магнитосферы, где основными являются магнитозвуковые волны, мы определим эффективное число Маха, если возьмем отношение скорости солнечного ветра v к фазовой ско-

рости быстрой магнитозвуковой волны. Фазовая скорость дается формулой

$$(V_A^2 + V_{зв}^2)^{1/2},$$

где V_A — альвеновская скорость, а $V_{зв}$ — скорость звука в межпланетной среде. Поскольку $V_{зв}$ и V_A сравнимы, а v порядка 5—10 V_A [2], то ясно, что солнечный ветер следует считать сверхзвуковым, поскольку речь идет о магнитосфере¹⁾). Однако солнечный ветер может оказаться дозвуковым для объектов, значительно меньших по сравнению с магнитосферой.

Пока солнечный ветер остается сверхзвуковым, магнитосфера не в состоянии сообщить вверх по течению о своем присутствии. Чтобы заставить солнечный ветер огибать магнитосферу, необходимы «решительные меры». Действительно, около магнитосферы вверх по потоку устанавливается ударная волна, тем самым создавая дозвуковое движение. Ударная волна является бесстолкновительной, и ее толщина порядка ларморовского радиуса протона [3], который, как уже указывалось, мал по сравнению с размерами магнитосферы.

Характеристики бесстолкновительных ударных волн известны лишь в общих чертах²⁾). Различные теории указывают на то, что ударная волна обладает турбулентной структурой и что рассеяние волна — волна, по-видимому, является основной причиной диссипации. Кроме того, область вниз по течению должна оказаться турбулентной и довольно неоднородной. Наилучшей аналогией для бесстолкновительной ударной волны в плазме служит гидравлический удар или уступообразная волна на поверхности воды, где эти характерные особенности довольно четко видны.

Взаимодействие волна — волна в ударной волне может привести к созданию таких коротких волн, которые могут распространяться против потока солнечного ветра. Вследствие турбулентности создаются быстрые частицы (вероятно, главным образом электроны), которые также могут распространяться против течения. В результате убегания этих быстрых частиц и волн информация о состоянии жидкости до перехода через ударную волну теряется и эти потери способствуют необратимости явления. Потеря информации равносильна увеличению энтропии.

Проведенные до сих пор наблюдения находятся в превосходном согласии со всеми этими представлениями³⁾). Поскольку

¹⁾ Теоретические и экспериментальные вопросы магнитогидродинамического взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой рассмотрены в [24*, 25*, 28*]. — *Прим. перев.*

²⁾ См. гл. 10 и примечания редактора и переводчика к ней. — *Прим. ред.*

³⁾ Некоторые последние данные о положении ударной волны, магнитопазузы и частично магнитного хвоста Земли, полученные на основе спутниковых измерений, опубликованы в [32*]. — *Прим. перев.*

ударная волна впереди магнитосферы — наилучший пример бесстолкновительной ударной волны, крайне важно детально исследовать как спектр частиц, так и спектр волн. Особый интерес могут представить высокочастотные волны. Следует ожидать, что область, подвергаясь сжатию, будет «светиться» в том смысле, что такие волны непрерывно излучаются и двигаются вверх по течению. Это явление аналогично люминесценции, которая возникает в результате соударений в газе, окружающем входящую в плотные слои атмосферы ракету, или в обычной ударной трубе.

Наблюдаемое расстояние от границы магнитосферы в точке остановки потока до ударной волны следует сравнивать с теоретическими расчетами очень осмотрительно не только потому, что для вычисления расстояния необходимо знать радиус кривизны границы и отношение удельных теплоемкостей, но и потому, что расчеты не учитывают возможный магнитогидродинамический эффект, возникающий в результате «облипания» магнитных силовых линий («драпирующих» фронт магнитосферы). Это приводит к увеличению эффективных размеров магнитосферы. По видимому, наблюдаемое положение ударной волны на характерном расстоянии 13—14 $R_{\oplus}$ соответствует действительности.

Форма магнитосферы ¹⁾

С тех пор как Чепмен и Ферраро построили модель магнитосферы на основе зеркального диполя для соответствующего возмущения геомагнитного поля [4], она не претерпела сильных изменений. Топология поля этой простой модели по существу схожа с топологией современных модных моделей. В частности, силовые линии в низких широтах имеют похожую на язык конфигурацию, полностью заключенную внутри высокоширотных магнитных силовых линий, которые образуют «хвост». Деление на эти две области определяется двумя нейтральными точками на поверхности магнитосферы. Эти нейтральные точки соединяются с точками на поверхности Земли, расположенными на высоких геомагнитных широтах около полуденного меридиана.

В некотором смысле нейтральные точки действуют подобно полюсам возмущенного дипольного поля, поскольку космические лучи самой низкой энергии в их окрестности могут проникать к Земле. Однако существует отличие от недеформированного диполя, состоящее в том, что вся область магнитного хвоста доступна для малоэнергичных космических лучей. Таким образом, если имеется слабый разброс питч-углов, то эти малоэнергичные

¹⁾ См. гл. 22, 23 и примечания переводчика к ним. — *Прим. ред.*

космические лучи могут осаждаться во всей полярной шапке, определяемой по нейтральной точке.] Если магнитные силовые линии соединяются с магнитными силовыми линиями межпланетного пространства, как это предположили Данжи, Петчек и др.¹⁾, то это описание несколько изменится. В частности, две нейтральные точки сливаются в одну, а в хвосте появляется дополнительная нейтральная точка или линия.

Много усилий было затрачено на расчеты формы магнитосферы на основе ньютоновского приближения²⁾. Хотя такие расчеты могут быть полезными для передней части магнитосферы, но они вряд ли сильно помогут в понимании магнитосферы в целом. Несомненно, из-за ограниченной точности ньютоновского приближения вычисления с высокой точностью неоправданны. Легко определить, что геоцентрическое расстояние до передней точки полной остановки потока обычно равно $10 R_{\oplus}$. Кроме того, магнитосфера должна быть несколько шире в экваториальной плоскости под углом 90° к линии Земля — Солнце, поскольку число Маха внешнего потока больше единицы, а, следовательно, давление составляет лишь часть от давления в точке полной остановки потока. Расстояние $13\text{—}15 R_{\oplus}$ от Земли до границы магнитосферы в районе терминатора вполне приемлемо. Около нейтральных точек расстояние до границы обычно равно $10 R_{\oplus}$, поскольку напряженность геомагнитного поля уменьшается в этом направлении и компенсирует уменьшение внешнего давления солнечного ветра в ее окрестности.

Я полагаю, что геомагнитные бури, полярные сияния и связанные с ними явления служат доказательством диссипативного взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой. Диссипация подразумевает существование поперечных напряжений на границе магнитосферы, которые могут оказывать сильное влияние на форму магнитосферы, особенно на хвост. Таким образом, вязкая или омическая диссипация приводит к образованию хвоста значительно большей протяженности и со значительно большим магнитным потоком, чем в случае недиссипативного взаимодействия. Наблюдения на «Эксплорере-10» и «Эксплорере-14» [5, 6] отчетливо указывают на существование явно выраженного хвоста. Однако необходимо подождать данных спутника «ИМП-1», прежде чем можно будет сказать что-либо определенное³⁾.

Нелегко вычислить длину хвоста, поскольку недостаточно хорошо понятны диссипативные процессы. Однако можно ожидать,

¹⁾ См. гл. 17—19. — *Прим. ред.*

²⁾ Представление о серии этих работ можно получить из обзоров Чепмена [19*] и Берда [20*], посвященных форме магнитосферы. — *Прим. перев.*

³⁾ Данные спутника «ИМП-1» отчетливо показали существование магнитного хвоста [21*, 27*]. — *Прим. перев.*

что магнитосфера обычно простирается далеко за пределы орбиты Луны, т. е. до расстояния $60 R_{\oplus}$ и далее¹⁾. Хвост диаметром $40 R_{\oplus}$ со средней напряженностью магнитного поля 30γ (как это следует из наблюдений «Эксплорера-10») должен простирается примерно до $200 R_{\oplus}$, чтобы содержать количество энергии, достаточное для типичной магнитной бури ($\sim 10^{23}$ эрг). Однако поскольку эта энергия не должна содержаться в хвосте постоянно, то расстояние $200 R_{\oplus}$ следует рассматривать в качестве возможного верхнего предела. Если преобладает пересоединение магнитных силовых линий, то предполагаемая здесь длина хвоста — это расстояние до задней нейтральной линии. Перед пересоединением магнитные силовые линии простираются вниз по течению на огромные расстояния, но это, по-видимому, турбулентный след, а не магнитный хвост.

Используя приведенные значения диаметра хвоста и напряженность поля, можно установить, что магнитные силовые линии, связанные с нейтральной точкой (точками) с дневной стороны магнитосферы, пересекают поверхность Земли на геомагнитной широте $\sim 72^\circ$. Широта, по-видимому, должна изменяться в пределах от 70 до 75° , но тем не менее она существенно отличается от значений, получаемых из расчетов на основе ньютоновского приближения. Ряд явлений в ионосфере, которые можно связать с прямым проникновением частиц солнечного ветра через нейтральные точки, обладают такой структурой, которая согласуется с моими оценками.

Основное действие как вязкой, так и омической диссипаций на границу магнитосферы состоит в переносе магнитных силовых линий с лобовой части магнитосферы в хвост. В случае чисто вязкого взаимодействия поперечные напряжения, создаваемые солнечным ветром, заставляют двигаться магнитные силовые линии как целое, вынуждая их скользить по поверхности (если только нет турбулентного перемешивания). В случае чисто омической диссипации магнитные силовые линии на лобовой части магнитосферы разрываются в нейтральной точке и соединяются с межпланетным магнитным полем. Затем оба сегмента уносятся солнечным ветром и драпируются вокруг хвоста магнитосферы, где они снова пересоединяются. В действительности должны происходить оба процесса, но до сих пор не удалось решить ни теоретически, ни экспериментально, является ли какой-либо из этих процессов преобладающим.

¹⁾ Существование магнитного хвоста Земли на расстоянии $80 R_{\oplus}$ подтверждено недавно измерениями на «Эксплорере-33» [22*]. Измерения на «Пионере-7» как будто свидетельствуют о том, что магнитный хвост простирается вплоть до $1000 R_{\oplus}$ [23*]. — *Прим. перев.*

Конвекция внутри магнитосферы ¹⁾

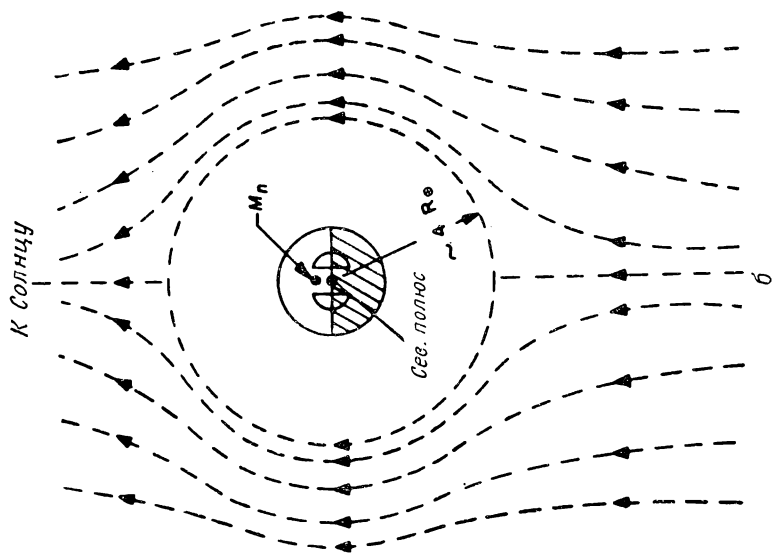
Движения в магнитосфере носят конвективный характер, поскольку $\beta = 8\pi nkT/B^2$ обычно очень мало [7, 8]. Это означает, что магнитные силовые линии переставляются таким образом, что магнитная конфигурация не изменяется. Следовательно, $\partial \mathbf{B}/\partial t = \nabla \times \mathbf{E} = 0$, а электрическое поле можно определить в таком случае из потенциала. Поскольку малоэнергичная плазма (среда свистящих атмосфериков) движется примерно таким образом, что $\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$, сразу же видно, что линии тока конвективного движения и силовые линии магнитного поля должны быть эквипотенциалами электрического поля.

Конвективные движения в магнитосфере возможны потому, что магнитные силовые линии проходят через изолирующую нижнюю атмосферу. Если бы изолирующая атмосфера отсутствовала, то магнитные силовые линии удерживались бы довольно жестко Землей, которая в данном случае является почти идеальным проводником. Переход от высокопроводящей магнитосферы к изолирующей нижней атмосфере происходит постепенно в пределах высот от 90 до 150 км, где проводимость такова, что любое электрическое поле, которое иначе не поддерживается, разряжается в течение секунд. Очевидно, движения в магнитосфере должны поддерживаться механически таким образом, чтобы поляризационные заряды, соответствующие электрическому полю, непрерывно восполнялись при потерях вследствие утечки через ионосферу.

[К счастью, нижняя ионосфера обладает очень высокой холловской проводимостью по сравнению с прямой (педерсеновской) проводимостью. Это означает, что большая часть токов, текущих в ионосфере, вызывается электрическим дрейфом $\mathbf{E} \times \mathbf{B}/B^2$ электронов ($\omega\tau_e \gg 1$ выше 90 км), причем ионы остаются на фоновых нейтральных частицах ($\omega\tau_i \ll 1$ ниже 150 км). Следовательно, в первом приближении распределение ионосферных токов можно интерпретировать в терминах движения оснований магнитных силовых линий. Необходимо лишь изменить направление токовой системы на противоположное, чтобы получить картину магнитосферного движения на уровне ионосферы. Движение в других точках магнитосферы можно получить нанесением на карту ионосферных движений вдоль геомагнитных силовых линий.

Приливные движения в нейтральной атмосфере являются существенной причиной движений в магнитосфере и связаны с системами S_q и L ионосферных токов. Мелкомасштабные

¹⁾ Вопросы магнитогидродинамических движений внутри магнитосферы довольно полно освещены в [29*—31*]. — *Прим. перев.*



б — система токов DS и потенциалов, спроецированных на поверхность магнитосферы.

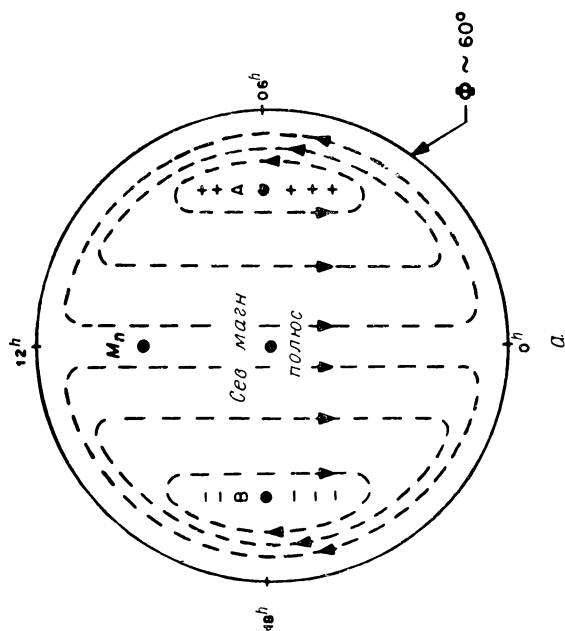


Рис. 1. а — токовая система DS над северным полушарием. Электростатический потенциал создается зарядами.

атмосферные движения вносят «шумовой» фон в эти приливные движения, большая часть которых заставляет магнитосферную плазму перемешиваться.] Кроме того, вращение Земли создает во всей магнитосфере устойчивое движение. Магнитосферные

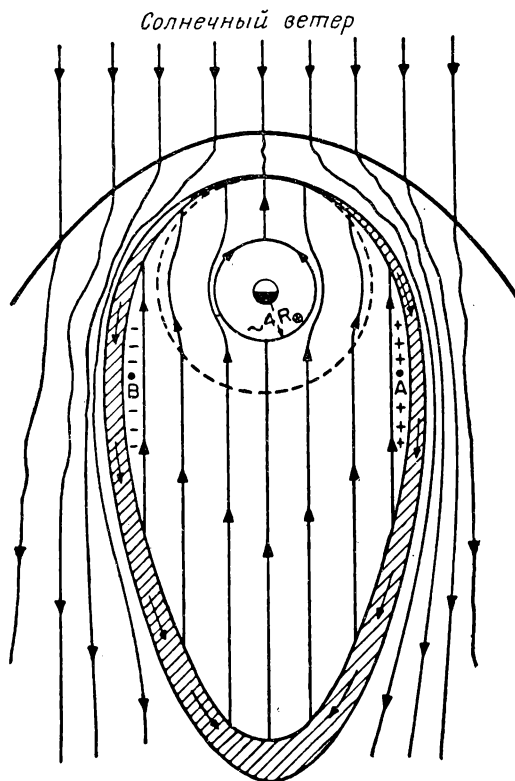


Рис. 2. Схема экваториального сечения земной магнитосферы, если смотреть с северного полюса.

С внешней стороны показаны линии тока солнечного ветра. Внутренние линии тока представляют циркуляционное течение, создаваемое за счет вязкого взаимодействия солнечного ветра с поверхностью магнитосферы. Внутренние линии тока также являются эквипотенциалами, соответствующими электрическому полю, создаваемому накоплением положительных (A) и отрицательных (B) зарядов (согласно [1]).

движения, которые, по-видимому, создаются солнечным ветром, связаны с токовой системой DS в период магнитных бурь и с подобной токовой системой S_q^P для магнитоспокойных периодов [9]. На рис. 1 представлена идеализированная схема магнитосферных движений на уровне ионосферы и соответствующих

движений в экваториальной плоскости магнитосферы. Считается, что это движение обусловлено диссипативными процессами, возникающими при взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой, — либо вязкими [10, 11], либо омическими процессами [12, 13], либо теми и другими вместе. Полная схема движения в экваториальной плоскости магнитосферы для случая чисто вязкого взаимодействия представлена на рис. 2. Ситуация для случая омической диссипации очень похожа и рассмотрена Данжи и Петчеком¹⁾.

Поскольку геомагнитное поле неоднородно, конвективное движение должно включать изменения магнитосферной плазмы. Следовательно, в плазме имеет место изменение энергии, которое, как можно считать, обусловлено сжатием и разрежением²⁾. Однако более наглядно рассматривать эти энергетические изменения в терминах движения отдельных частиц в неоднородных магнитном и электрическом полях [14], хотя следует подчеркнуть, что объединенное явление может играть важную роль и что необходимо самосогласованное решение.

Следует помнить, что не вся работа, производимая при сжатии газа, изменяет его внутреннюю энергию. Некоторое количество энергии, равное kT на одну частицу, содержится в форме энергии деформации. В случае магнитосферы она проявляется в виде деформации магнитного поля, которую мы описываем как кольцевой ток. Заметьте, что кольцевой ток, который был бы создан в результате магнитосферной циркуляции частиц, показанной на рис. 1 и 2, совпадает с током, описанным Альвеном [15], с тем лишь исключением, что направление движения противоположное. Это обращение требуется для получения согласия с направлением токов DS , которые недостаточно подробно были рассмотрены Альвеном. Другая трудность теории Альвена, которую избежала теория диссипативного взаимодействия, состоит в том, что электрическое поле, описываемое Альвеном, быстро разрядится в ионосферу, так что магнитосферные движения не будут длительными.

Электрическое поле и диссипация энергии в магнитосфере в период магнитных бурь

Можно показать [16], что разность электрических потенциалов ψ_{AB} (см. рис. 1), соответствующая токовой системе DS в период магнитной бури, обычно составляет $\sim 20\,000$ в. Скорость поступления энергии (Φ_M), необходимая, чтобы объяснить на-

¹⁾ См. гл. 17 и 18. — *Прим. ред.*

²⁾ См. обзор Пиддингтона [33*]. — *Прим. перев.*

блюдаемую напряженность геомагнитного поля, диссипацию энергии за счет полярных сияний и джоулева нагрева ионосферы порядка 10^{18} — 10^{19} эрг/сек. В период магнитной бури поток энергии солнечного ветра, падающий на магнитосферу, на 2—3 порядка превосходит Φ_M , так что эффективный коэффициент торможения имеет вполне разумное значение $\sim 0,01$.

Любая теория магнитных бурь должна объяснять наблюдаемые значения ψ_{AB} и Φ_M . Теперь это можно сделать для случая, в котором омическая диссипация энергии на границе магнитосферы является основной причиной торможения солнечного ветра¹⁾. Для случая чисто вязкого взаимодействия сначала следует рассмотреть механизм, который обуславливает вязкие напряжения, поскольку они не создаются обычным турбулентным или молекулярным перемешиванием солнечного ветра и поверхностных слоев магнитосферы.

Как отмечалось ранее, во многих отношениях более удобно рассматривать взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой в терминах магнитогидродинамических волн, а не в терминах частиц. Аналогично можно рассматривать эффекты вязкости и теплопроводности. Магнитогидродинамические волны, пересекающие границу магнитосферы, передают энергию (создавая эффект передачи тепла) и импульс (оказывая нормальное и поперечное давление на среду). [Было вычислено, что общая скорость передачи энергии через границу магнитосферы продольными магнитозвуковыми волнами равна $\sim 0,2\xi V_A$ эрг/см²·сек, где ξ — плотность энергии этих волн в солнечном ветре. Вследствие асимметричного преломления и отражения волн, падающих на границу, поперечное напряжение $D_W \sim 0,2\xi$. Таким образом, $D_W \sim 2 \cdot 10^{-10}$ дин/см², а полная скорость поступления энергии $\Phi_M \sim 5 \cdot 10^{18}$ эрг/сек, при этом было принято, что $\xi = 10^{-9}$ эрг/см³ [17]. Доводы, основанные на теории вязкого пограничного слоя, приводят к результату, что если вязкость является преобладающим диссипативным процессом во взаимодействии солнечный ветер — магнитосфера, то в таком случае $\psi_{AB} = 2 \cdot 10^4$ в означает, что эффективная кинематическая вязкость должна составлять $\nu \sim 10^{13}$ см²·сек⁻¹, торможение должно равняться $D_V \sim 2 \cdot 10^{-10}$ дин/см², а скорость, с которой энергия передается в магнитосферу за счет вязких торможений, $\Phi_V = 10^{19}$ эрг/сек. Таким образом, существует исключительно хорошее согласие между Φ_M , Φ_W и Φ_V и между D_W и D_V .]

Поэтому мы предполагаем, что вязкость играет важную роль и может объяснить наблюдаемые эффекты. Однако в настоящее время нельзя решить, преобладает ли вязкая или омическая

¹⁾ См. гл. 18.

диссипация, хотя оба механизма могут быть существенны. Измерения магнитного поля на спутнике «ИМП-1», по-видимому, указывают на наличие с внутренней стороны границы магнитосферы значительных магнитных флуктуаций. Это свидетельствует о том, что значительное количество энергии поступает внутрь магнитосферы в виде волн. На границе магнитосферы часто наблюдалось обращение магнитного поля [6]. Это, по-видимому, означает, что имеет место омическая диссипация, поскольку в идеально проводящей жидкости знак магнитного поля не имеет значения, а параллельные магнитные поля не в состоянии передавать информацию друг другу вдоль их направления.

Магнитную бурю в целом можно объяснить, опираясь на целый ряд теорий. Внезапное начало, вероятно, является следствием столкновения ударной волны с магнитосферой [18]. Начальная фаза магнитной бури обусловлена сжатием магнитосферы, как считают Чепмен и Ферраро [4]. Вариации DS магнитного поля и полярные сияния связаны с конвективными движениями вследствие диссипативных процессов на границе магнитосферы. Наконец, кольцевой ток также является результатом конвективных движений и создается примерно так, как объяснил Альвен [15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Lighthill M. J., Whitham G. B., Proc. Roy. Soc., **A229**, 317 (1955).
2. Snyder C. W., Neugebauer M., Rao U. R., J. Geophys. Res., **68**, 6361 (1963).
3. Camac M., Kantrowitz A. R., Litvak M. M., Patrick R. M., Petschek H. E., Nuclear Fusion Suppl., Pt. 2, 423 (1962).
4. Chapman S., Ferraro V. C. A., Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity, **36**, 77, 171 (1931).
5. Heppner J. P., Ness N. F., Searce C. S., Skillman T. L., J. Geophys. Res., **68**, 1 (1963).
6. Cahill L. J., Space Res., VI, 1966, p. 662.
7. Gold T., J. Geophys. Res., **64**, 1219 (1959).
8. Dungey J. W., Cosmic Electrodynamics, Cambridge Univ. Press, New York, 1958. (Русский перевод: Дж. Данжи, Космическая электродинамика, М., Атомиздат, 1961.)
9. Nagata T., Kokubun S., Nature, **195**, 555 (1962).
10. Axford W. I., Hines C. O., Canadian J. Phys., **39**, 1433 (1961).
11. Piddington I. H., Geophys. J., **3**, 319 (1960).
12. Dungey J. W., Phys. Rev. Letters, **6**, 47 (1961).
13. Levy R. H., Petschek H. E., Siscoe G. L., Avco-Everett Res. Lab., Res. Rept. 170, Dec., 1963.
14. Hines C. O., Planet. Space Sci., **10**, 239 (1963).
15. Alfvén H., Tellus, **7**, 50 (1955); **10**, 104 (1958).
16. Axford W. I., Planet. Space Sci., **12**, 45 (1964).
17. Sonett C. P., Abrams I. J., J. Geophys. Res., **68**, 1233 (1963).
18. Gold T., Gas Dynamics of Cosmic Clouds, ed. H. C. van de Hulst, J. M. Burgers, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1955, p. 103.

- 19*. Chapman S., in *Geophysics, The Earth's Environment*, eds. C. de Witt, J. Hieblott, A. Leabeau, Gordon and Breach, New York, 1963. (Русский перевод в сб. «Геофизика. Околоземное космическое пространство», М., изд-во «Мир», 1964, стр. 243.)
- 20*. Beard D. B., *Rev. Geophys.*, 2, № 2, 335 (1964).
- 21*. Ness N. F., *J. Geophys. Res.*, 70, № 13, 2989 (1965).
- 22*. Ness N. F., Behannon K. W., Cantarano S. C., Searce C. S., *J. Geophys. Res.*, 72, № 3, 927 (1967).
- 23*. Ness N. F., Searce C. S., Cantarano S. C., GSFC Res. Rept. X-612-67-183, 1967.
- 24*. Spreiter J. R., Summers A. L., Alksne A. Y., *Plan. Space Sci.*, 14, № 3, 223 (1967).
- 25*. Dryer M., Heckman G. R., *Planet. Space Sci.*, 15, № 3, 515 (1967).
- 26*. Ness N. F., NASA GSFC Res. Rept. X-612-66-381 (1966).
- 27*. Беханном К. У., Несс Н. Ф., *Геомагнетизм и аэрономия*, 6, № 3, 430 (1966).
- 28*. Dungey J. W., The quiet magnetosphere theory, The Inter-Union Symposium on Solar-terrestrial Physics, Belgrade, Aug. 29—Sept. 3, 1966. (Русский перевод в сб. «Солнечно-земная физика» М., изд-во «Мир», 1968.)
- 29*. Hines C. O., *Space Sci. Rev.*, 3, № 3, 342 (1964).
- 30*. Шабанский В. П., *Космич. исслед.*, 3, вып. 2, 221 (1965).
- 31*. Шабанский В. П., *Геомагнетизм и аэрономия*, 7, № 2, 243 (1967).
- 32*. Ness N. F., Observations of the solar wind interaction with geomagnetic field, conditions quiet, GSFC. Res. Rept. X-612-66-381. (Русский перевод в сб. «Солнечно-земная физика», М., изд-во «Мир», 1968.)
- 33*. Piddington J. H., *Space Sci. Rev.*, 3, № 5/6, 724 (1964).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
С МАГНИТОСФЕРОЙ. ЧАСТИЦЫ ¹⁾*Дж. В. Данжи*

Я намерен без какого-либо специального обоснования использовать «открытую» или, иначе, «связанную», согласно Эксфорду, модель магнитосферы, поскольку ряд ученых уверены в ее справедливости. Я буду говорить о движении отдельных частиц, но не о течении непрерывной среды. Безусловно, последний аспект является весьма существенным, но, поскольку эту задачу можно разделить на две части и поскольку я плохо понимаю турбулентность, я оставляю в стороне гидродинамическое рассмотрение.

Топология геомагнитного поля

На рис. 1 представлена модель геомагнитного поля в меридиональной плоскости (полуденная часть слева, полуночная — справа). Позднее я намерен поспорить с Эксфордом относительно того, где прямая, проходящая через переднюю нейтральную точку, пересекает поверхность Земли. Я думаю, что это пересечение относится к более высоким геомагнитным широтам, чем считает Эксфорд.

Попытаемся описать топологию этого поля. На рисунке изображено лишь несколько магнитных силовых линий. Они являются особыми линиями, проходящими через два токовых слоя, связанных с нейтральными точками (последние отождествляются по схождению и расхождению векторов скорости солнечного ветра). Между прочим, правый токовый слой должен простираться вправо значительно дальше, но он был умышленно сжат для воспроизведения на рисунке.

Топология этого поля напоминает предложенную Чепменом и Ферраро, которая определяется выходящими из нейтральных точек силовыми линиями, покрывающими целиком поверхность. Возникает следующая ситуация. Имеются две специфические

¹⁾ Ранее этот вопрос был рассмотрен в работе [1].

силовые линии (не в плоскости рисунка), которые соединяют эти две точки. Магнитные силовые линии, исходящие из одной из этих нейтральных точек, покрывают целиком поверхность, которая связывается с одной зоной полярных сияний, а линии из другой точки — поверхность, связанную с другой зоной сияний [1].

Имеется важное различие между теми линиями, которые замыкаются, не выходя за пределы магнитосферы или не очень удаляясь от Земли, и теми, которые выходят из полюсов и вытягиваются на большие расстояния. Внешние линии отделяются

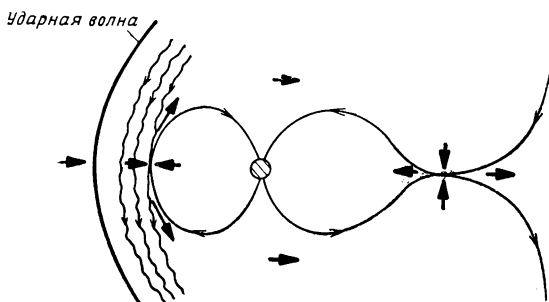


Рис. 1. «Открытая» модель магнитосферы и межпланетного магнитного поля. Тонкими линиями показаны магнитные силовые линии; короткие жирные стрелки показывают локальное направление движения плазмы.

от внутренних только что упомянутыми поверхностями. Обсуждение двух последних дней создает впечатление, что, если перемещаться вдоль силовой линии, выходящей из северного полюса, то в конце концов можно оказаться на Солнце (по крайней мере в некоторые дни). При изучении движения частиц мы должны знать, как проходят силовые линии в переходной области. Здесь мы не все еще знаем, но я намерен показать, что эти линии простираются от Земли довольно далеко.

Электрическое поле в магнитосфере

Если говорить о частицах в магнитных полях, то, чтобы не пользоваться в явном виде движением непрерывной среды, следует рассмотреть электрическое поле, связанное с этим движением:

$$\mathbf{v} \times \mathbf{B} = -c\mathbf{E}. \quad (1)$$

Будем искать электрическое поле из системы DS -токов (рис. 1 гл. 16). Потенциал поля положителен на утренней стороне и отрицателен на вечерней стороне (оба максимума

находятся в зоне полярных сияний). Предположим, что электрическое поле перпендикулярно магнитному полю везде [формула (1)], исключая окрестности токовых слоев, для которых необходимо специальное рассмотрение. Альвен охотно вводит электрическое поле, параллельное магнитному полю в некоторых частях магнитосферы, но я совершенно исключаю параллельные магнитные поля. Если считать поле стационарным и статическим, то электростатический потенциал будет постоянен вдоль силовой линии. Когда потенциал над полярной шапкой известен, нам известен электростатический потенциал на всех линиях поля, связанных с полярной шапкой. Таким образом, потенциал и электрическое поле нам известны везде. Если движение Земли по орбите направлено к нам из плоскости рисунка, то почти везде на рис. 1 электрическое поле направлено в противоположную сторону. Это поле соответствует электрическому полю, которое существовало бы в межпланетном пространстве, если бы межпланетное магнитное поле было направлено к югу. Я не очень уверен в самых последних наблюдениях, но по данным «Эксплорера-12» по переходной области отчетливо выявляется средняя составляющая магнитного поля, направленная к югу [2]. Поэтому можно принять, что электрическое поле в этой области хорошо соответствует электрическому полю в магнитосфере.

Движение частиц плазмы

После общего описания электрического и магнитного полей можно задать вопрос: каково же движение частиц? Хотелось бы переместиться в обратном направлении вдоль возможной траектории частицы и использовать теорему Лиувилля¹⁾. Почти все траектории, вдоль которых мы следуем, возвращают нас к солнечному ветру. Другими словами, если бы кто-нибудь вычертил в обратном направлении траекторию частицы с ее бесконечными оборотами вокруг силовой линии, то он обнаружил бы, что она входит в какой-либо точке в солнечный ветер. Затем, узнав у Снайдера значение функции распределения f для такой частицы, он определил бы значения f везде, при условии справедливости теоремы Лиувилля. Это, разумеется, идеализированный расчет, но он поможет определить положение частиц как высокой, так и малой энергии.

Рассмотрим фактические траектории частиц, воспользовавшись теорией адиабатических инвариантов. По существу эту

¹⁾ Эта теорема гласит, что плотность частиц в фазовом пространстве остается постоянной вдоль динамической траектории [28*]. — *Прим. ред.*

теорию можно использовать для значительной части всех траекторий. Мы применим первые два адиабатических инварианта: магнитный момент μ и продольный инвариант I :

$$\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B}, \quad (2)$$

$$I = \oint v_{\parallel} ds,$$

где B — напряженность магнитного поля, m — масса частицы $v_{\perp}$ и $v_{\parallel}$ — составляющие скорости, перпендикулярная и параллельная направлению магнитного поля, а $\oint \dots ds$ — линейный интеграл, взятый вдоль силовой линии между точками отражения для данной орбиты.

Инвариант I можно записать в виде произведения v на некоторую функцию pitch-угла α в экваториальной плоскости для той силовой линии, вдоль которой следует частица:

$$I = vG(\alpha, \text{силовая линия}). \quad (3)$$

Если известно магнитное поле, то можно фактически рассчитать значения I для большого числа частиц. Тот факт, что v вынесено за знак интеграла, означает, что нет необходимости повторять расчеты для различных энергий.

Эксфорд говорил об адиабатическом сжатии; этот вопрос я и хочу обсудить. При использовании μ и I анализ будет более точным.

Другой путь рассмотрения движения частиц основан на исследовании дрейфа частиц, он опирается на адиабатическое приближение, но без фактического использования I . Дрейф может создаваться электрическими полями, градиентами напряженности магнитного поля и кривизной магнитных силовых линий¹⁾. Рассматривая все эти факторы совместно, мы получаем представление об общем характере дрейфа частиц. Если этот подход является справедливым, то можно определить траекторию частицы, просто вычисляя μ и I , хотя время, требуемое для перемещения частицы, найти не удается.

Какие же частицы представляют интерес? Интересны те случаи, когда дрейфы, вызываемые электрическими полями, сравнимы с дрейфами, создаваемыми за счет неоднородности магнитного поля. Дрейф, обусловленный градиентами поля, пропорционален энергии частицы. Для частиц крайне малой энергии преобладает дрейф, созданный электрическим полем $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}/c$. При этом наблюдается слабое изменение энергии

¹⁾ Подробно о дрейфовой теории движения заряженной частицы в электромагнитных полях см. в [16*—18*]. — *Прим. перев.*

частицы. Для частиц очень высокой энергии преобладает дрейф, обусловленный неоднородностью магнитного поля, и в общем также происходит изменение энергии частицы, но потенциал, соответствующий токовой системе DS (в данном случае равный ~ 20 кэВ) для этих частиц не играет существенной роли. Предположим (и это фактически имеет место), что оба вида дрейфа сравнимы для частиц, энергия которых по порядку величины равна разности потенциалов электрического поля. Поэтому нас интересуют частицы с энергиями порядка 10—20 кэВ.

Итак, если проследовать в обратном направлении вдоль траектории, то мы находим, что частицы теряют энергию. Если потери энергии продолжаются до точки, где энергия частиц становится меньше 1 кэВ, то они движутся более или менее с непрерывной средой. В таком случае нетрудно определить, откуда они приходят.

Теперь для определенности рассмотрим частные виды траекторий. Захваченные частицы движутся между двумя сопряженными точками, расположенными в разных полушариях¹⁾. Некоторые частицы по мере дрейфа вокруг Земли на дневной стороне выходят из области захвата, поскольку они дрейфуют за пределы области, внутри которой оба конца магнитной силовой линии пересекают поверхность Земли. Другие частицы оказываются полностью захваченными геомагнитным полем, и они многократно дрейфуют вокруг Земли по магнитным оболочкам. В последнем случае для характеристики дрейфа частиц вокруг Земли и определения магнитных оболочек, по которым они дрейфуют, можно пользоваться параметрами μ и I . Вблизи Земли магнитные оболочки симметричны по долготе; во внешней части магнитосферы они искажаются.

Давайте познакомимся с характером этого искажения²⁾. Оболочки захваченных частиц возмущаются вследствие двух различных эффектов, связанных с солнечным ветром. Первый из них создается возмущениями геомагнитного поля, как это видно на рис. 1. Хорошо известно, что магнитное поле поджимается с солнечной стороны и, по-видимому, вытягивается с ночной. Во всяком случае, если вычислить I для полей, которые были поджаты и вытянуты, то найдем, что магнитные оболочки для частиц с данной энергией окажутся ближе к Земле на ночной, а не на дневной стороне [3]. Этот вывод как будто согласуется с наблюдениями О'Брайеном границы зоны захваченных электронов с энергией 40 кэВ [4]³⁾.

¹⁾ Движение частиц внутри магнитосферы рассмотрено в [19*, 20*]. — *Прим. перев.*

²⁾ Такие искажения рассмотрены в [29*]. — *Прим. перев.*

³⁾ См. также [30*]. — *Прим. перев.*

Второй эффект обусловлен электрическим полем; электроны обладают более высокой энергией на утренней стороне (положительный потенциал). В результате магнитная оболочка для захваченных электронов на утренней стороне подходит ближе к Земле. Для протонов наблюдается обратная картина. Эти эффекты можно выразить через существующее распределение скоростей частиц. В пределах изменения параметра магнитной оболочки L ¹⁾ от 4 до 8, вероятно, можно обнаружить более высокую интенсивность электронов с энергией 40 кэВ на утренней стороне, а не на вечерней. Именно в этом пределе изменения L Мак-Диармиду, Бероузу и другим удалось обнаружить максимум интенсивности электронов с энергией 40 кэВ в 8 час. утра по местному времени [6]. [Однако наблюдаемая скорость высыпания частиц указывает на то, что время жизни электронов значительно меньше, чем период дрейфа вокруг Земли [7]. Если это так, то продольный инвариант не может сохраняться.]

Что же происходит с частицами, которые захвачены на больших расстояниях от Земли с ночной стороны? Они дрейфуют через ночную область, но в силу сохранения двух адиабатических инвариантов нигде не могут быть захвачены на дневной стороне. Вероятно, они входят в магнитосферу из солнечного ветра и выходят обратно. Действие градиентов магнитного поля на частицы с энергией 10 кэВ или меньше сводится к дрейфу электронов на восток через ночную сторону. Это приводит к увеличению энергии за счет поля DS . Аналогичным образом протоны дрейфуют на запад через ночную область и также увеличивают свою энергию.

Что мы обнаружим, если начертим траектории этих частиц? Если частицы обладают достаточно низкой энергией, то они потеряют ее почти всю, а затем будут просто двигаться с окружающей средой. Мы говорим, что эти частицы приходят от солнечного ветра. Однако предположим, что частица имеет несколько бóльшую энергию. Такая частица не потеряет всей своей энергии, но она все же должна пересечь поверхность, ограничивающую замкнутые силовые линии. В этом случае необходимо специально рассмотреть, что происходит на этой поверхности. Во-первых, при этом адиабатическая теория движения заряженных частиц уже не справедлива. Продольный инвариант нельзя использовать, поскольку точки отражения, по видимому, не существует (если только она не находится на Солнце). Во-вторых, следует помнить, что эти поверхности покрыты силовыми линиями, которые выходят из нейтральной точки. Поскольку частицы движутся значительно быстрее вдоль

¹⁾ Для ознакомления с параметром магнитной оболочки L см. [5].

магнитных силовых линий, чем поперек них, то почти все эти частицы пройдут вблизи токового слоя с ночной стороны или даже пересекут его.

К сожалению, в данной ситуации адиабатическое рассмотрение совершенно неприменимо. Сейчас эта задача исследуется Спейзером. Это сложная проблема самосогласованного поля, и у нас нет хорошей модели токового слоя. Спейзер начал эту работу задолго до того, как стал известен механизм Петчека¹⁾. Спейзер просто считал, что все составляющие поля линейно зависят от координат. Такое допущение было сделано для облегчения расчетов на вычислительной машине. После этого он рассчитал траектории частиц²⁾.

Теперь займемся специально частицами полярных сияний. Они способны проникать в значительно более сильные поля (до $0,5 \text{ гс}$), чем поля в 50 γ , обнаруженные во внешней части магнитосферы. Наиболее интересны те частицы, которые выходят из токового слоя с очень маленькими питч-углами. Спейзер исследовал частицы, выходящие с нулевым питч-углом, и вычислил обратные траектории частиц вплоть до их вхождения в область, где справедлива адиабатическая теория. Затем он рассчитал энергию, с которой частицы входят в нейтральный слой; и использовал эту энергию в качестве обратной меры функции распределения f . Очень низкое значение энергии соответствует высокой интенсивности частиц; таким путем он искал низкие энергии входа и нашел, что высокая интенсивность выходящих частиц ограничивается тонкими веерообразными пучками. В целом структура поразительно похожа на некоторые формы полярных сияний (драпир и лучистые дуги). Но радоваться пока рано. Дело в том, что расчеты выполнены для протонов, а полярные сияния создаются электронами.

Теперь рассмотрим вкратце, что происходит с частицами еще дальше, на внешних магнитных силовых линиях и на линиях, проходящих через переходную область. Уходят ли эти силовые линии к Солнцу или проходят на значительном удалении от него? Я в этом не очень уверен. Единственно, что хочется отметить, — это то, что магнитное поле в переходной области в несколько раз сильнее ($\sim 20\text{—}30\text{ γ}$) межпланетного поля ($\sim 5\text{ γ}$). Ввиду этого частицы будут стремиться уйти в область удаленных магнитных полей. Они не будут отражаться там обратно, поскольку там нет достаточно сильных полей, способных их от-

¹⁾ См. гл. 15 и 18.

²⁾ Результаты исследования Спейзера изложены в [21*, 22*]. См. также работу Хоха [27*] по ускорению заряженных частиц в магнитном хвосте. — *Прим. перев.*

разить. Вероятно, в переходной области частицы движутся на большие расстояния главным образом вдоль магнитных силовых линий. Наоборот, большое количество удаленных частиц с ночной стороны спускается вниз по силовым линиям.

Токовый слой с дневной стороны будет ускорять некоторые частицы. Ускорение частиц также происходит на фронте ударной волны. Таким образом, энергичные частицы создаются на дневной стороне. Но куда они перемещаются? Несомненно, что часть их опускается в зону полярных сияний с дневной стороны, а часть оседает в полярную шапку. Однако если вычертить обратную типичную траекторию частицы из полярной шапки или из дневной зоны полярных сияний, то, по-видимому, следует ожидать, что они покинут окрестности Земли, не проходя через ударную волну.

Эффекты, зависящие от времени

Основная проблема полярных сияний связана с зависимостью полей от времени. Поле DS обычно находится как некоторое среднее. Фейрфилд на основе данных МГГ исследовал часовые средние, в которых почти всегда проявляется указанная система полей DS . Изучив магнитограммы для тех же периодов времени, он обнаружил, что возмущение в основном состоит из магнитных бухт [8]. Поэтому система DS в действительности определяется как серия импульсов.

Недавно Акасофу [9] провел великолепное исследование полярных сияний в период МГГ. Он нашел цикл развития (рис. 2), который, как мне кажется, тесно связан с бухтами. Цикл начинается со спокойного состояния, как это показано на рис. 2, *a* (дневная сторона вверх). При отсутствии в течение некоторого времени возмущений, на ночной стороне между 60 и 70° с. ш. наблюдались дуги. (Между прочим, вполне возможно, что место, где проецируется дневная нейтральная точка, находится около экстраполированной точки замыкания дуг. Широта этой точки значительно больше широты пересечения, предложенной Эксфордом.) Возмущение начинается с увеличения яркости в полночь и распространяется отсюда с первоначальным характерным временем $5\text{--}10$ мин, которое затем возрастает до 30 мин. Характер распространения возмущения из четко локализованной области указывает, что возмущение начинается именно в этой области, а не приходит извне. В настоящее время ключевым вопросом является источник возмущения.

Если предположить, что именно это возмущение вызывает магнитную бухту, то следует ожидать, хотя и без особой уверенности, что оно приходит из солнечного ветра. Фейрфилд

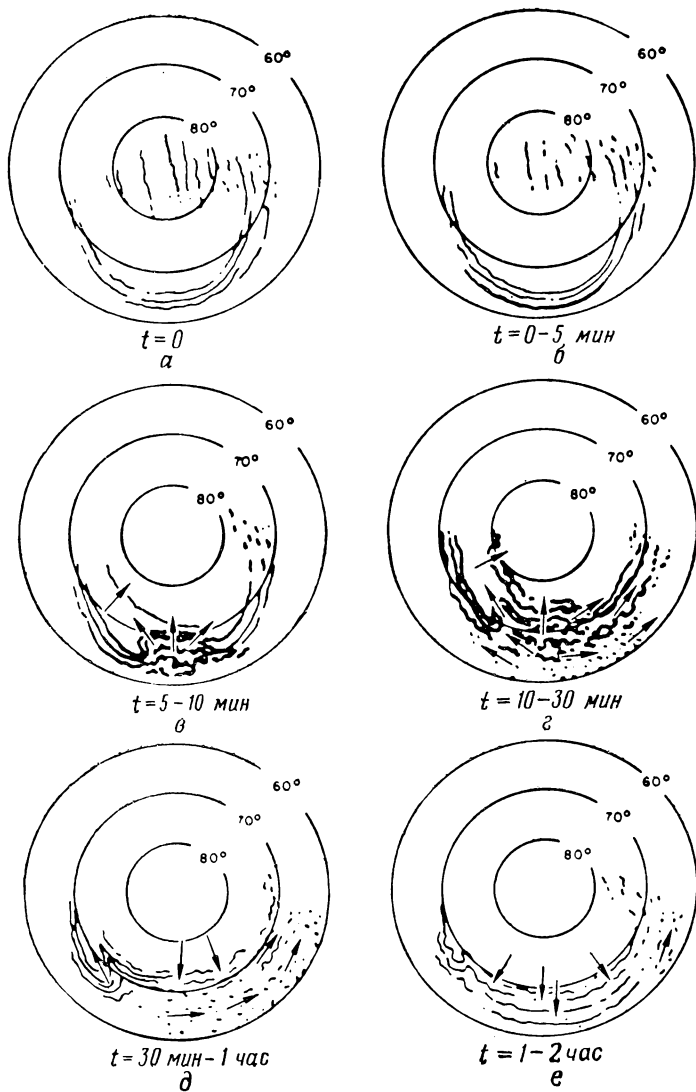


Рис. 2. Развитие полярного сияния (по Акасофу [9]). Восстановление от *а* к *е* требует 2—3 час.

исследовал связь бухтообразных возмущений, наблюдаемых в период полета «Эксплорера-12», с магнитными данными, полученными на этом спутнике¹⁾. Он рассмотрел лишь один день, в течение которого были зарегистрированы две бухты. Особенностью этого дня было то, что на границе магнитосферы не отмечалось обращения поля. Примерно за четверть часа до появления каждой бухты на спутнике регистрировалось резкое изменение направления поля. Хотя, несомненно, можно получить ряд важных выводов об общей картине развития явления с учетом только статических полей, тем не менее наблюдаемая зависимость от времени еще требует объяснения. Мне представляется, что в этом отношении бухты являются ключевым явлением; в частности, они, несомненно, оказывают важное влияние на внешний пояс захваченной радиации.

Гесс и Накада [10] проанализировали данные Дэвиса по захваченным протонам [11], что позволило им выявить адиабатический эффект, о котором упоминал Эксфорд. Дэвис нашел экспоненциальный спектр, для которого параметр E_0 является мерой энергии протонов (или их температуры). На рис. 3 представлена зависимость E_0 от L (каждая сплошная линия соответствует определенному питч-углу на экваторе). E_0 изменяется очень быстро в зависимости от L ; кроме того, эта величина слегка зависит от экваториального питч-угла. Вы можете определить, как E_0 будет изменяться в зависимости от I (с поправкой на различие питч-углов) для частиц, испытывающих адиабатическое движение. Расчеты Гесса и Накады представлены на рисунке пунктиром. Гесс и Накада пошли дальше. Они взяли данные Дэвиса и рассчитали функцию распределения скоростей для фиксированных значений μ и I . На рис. 4 показано, как изменяется в зависимости от L функция распределения для фиксированных значений μ и I . Интересно, что функция распределения всегда уменьшается внутрь магнитосферы, что является указанием на расположение источника где-то снаружи.

Из рис. 3 я делаю заключение, что наружный источник должен иметь температуру около 20 кэВ и что существует механизм, перемешивающий частицы. Этот механизм должен быть весьма эффективным, начиная с больших L и вплоть до $L \approx 3-4$. Эта внутренняя граница расположена как раз там, где Карпенгер обнаружил внезапное понижение электронной концентрации с ростом L [12]. Полученные им результаты хорошо согласуются с моей моделью, если поток DS переносит тепловые ионы с

¹⁾ Результаты исследований влияния характера межпланетного магнитного поля на полярные магнитные возмущения изложены в [23*]. — *Прим. перев.*

внешней стороны магнитопаузы через границу магнитосферы быстрее, чем они могут диффундировать от Земли из верхней ионосферы.

Я полагаю, что процесс диффузии вызван магнитными бурями, поскольку длительность бури несколько меньше 1 час,

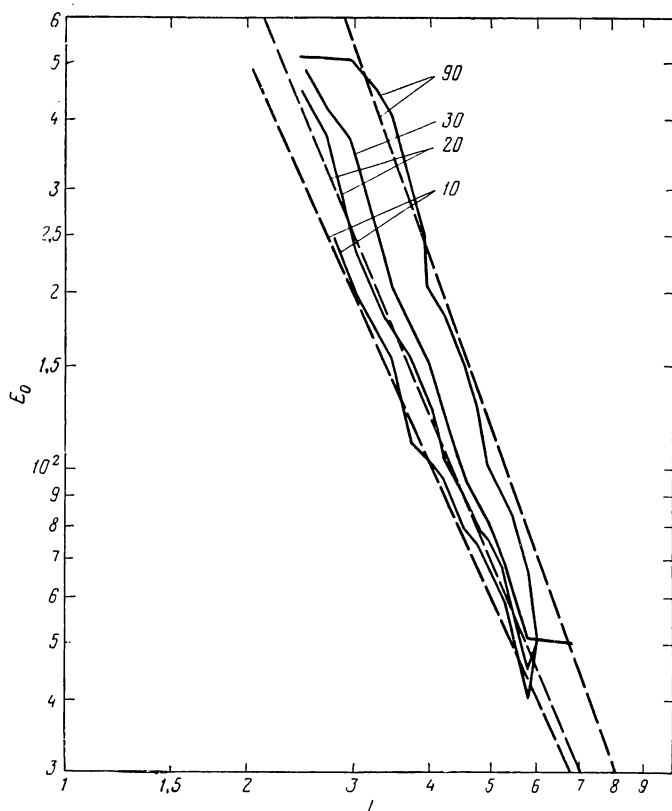


Рис. 3. График зависимости «температуры» E_0 захваченных протонов от параметра магнитной оболочки L . Сплошные кривые представляют наблюдения для соответствующих питч-углов в экваториальной плоскости [11]. Пунктирные линии соответствуют вычисленным значениям [10].

а время дрейфа этих частиц вокруг Земли составляет несколько часов. Если буря наблюдается при дрейфе частицы на ночной стороне, то частица приобретает некоторую энергию. Если частица продолжает дрейфовать на дневную сторону, в то время как буря еще продолжается, то частица потеряет эту энергию. Но поскольку буря заканчивается до того, как частица переме-

стится с ночной стороны на дневную, то накопленная энергия не теряется. Другие частицы дрейфуют на дневной стороне во время бухтообразного возмущения, теряя при этом энергию. В результате возникает диффузия. Коэффициент диффузии будет сильно зависеть от L : диффузия более эффективна для больших значений L . Эта модель дает некоторое представление о

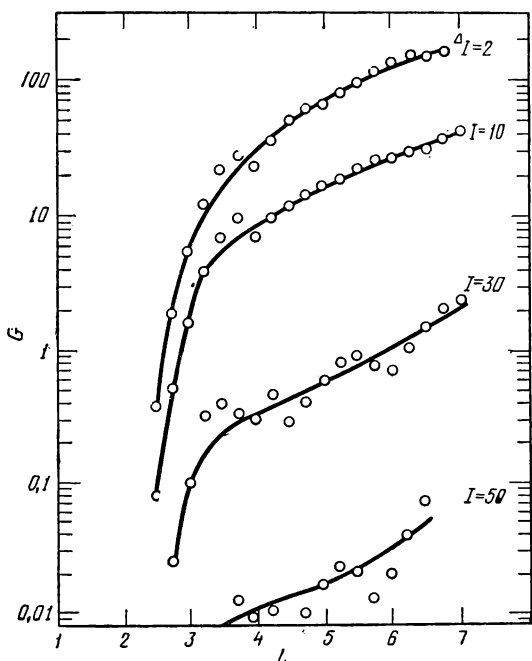


Рис. 4. Изменение функции распределения протонов G в зависимости от параметра магнитной оболочки L для $\mu=10^5$ и различных значений I (по Дэвису).

том, почему кривые Гесса и Накады похожи на экспериментальные кривые, и указывает на другое возможное воздействие солнечного ветра на захваченные частицы. [Накада и Мид обнаружили¹⁾, что внезапные импульсы также дают характерные времена диффузии необходимого порядка и зависимость от L . Таким образом, в настоящее время имеются два удовлетворительных источника для процессов диффузии.]

Наконец, следует рассмотреть возмущения с более высокими частотами. Нами были исследованы возмущения с периодами

¹⁾ По-видимому, имеется в виду работа [24*]. — Прим. перев.

около получаса. Но вполне возможно, что на захваченные частицы могут оказывать существенное влияние и возмущения с периодами порядка секунды¹⁾.

Важное наблюдение было сделано О'Брайеном [13]. При очень больших интенсивностях частиц на высоких широтах конус потерь исчезал. По его словам, это означает, что имеются «свежие» частицы, поскольку при наличии просто колебаний частиц между точками отражения; расположенными на малой высоте, конус потерь обязательно существовал бы.

Недавно Чемберлен [14] описал интересный механизм возникновения полярных сияний. Он использовал неустойчивость, исследованную Кроллом и Розенблютом [15]. Причиной ее является наличие градиента давления поперек магнитного поля. Разумеется, теория неустойчивости предполагает наличие однородного поля, и возможности этой теории существенно зависят от применимости модели однородного поля к случаю дипольного поля.

Чемберлен определяет систему координат таким образом, что невозмущенное магнитное поле $\mathbf{B}$ направлено по оси Z , а градиент давления — по оси X . Затем он рассматривает волны, которые перемещаются в направлении $-Y$ (на запад). Эти волны характеризуются магнитным возмущением $\Delta\mathbf{B}$, направленным вдоль оси X , параллельно градиенту давления. В теории все выглядит очень корректно. Но когда вы смотрите на магнитограммы и пытаетесь сделать какое-то приближение с учетом величины радиуса вращения, то оказывается, что фазовая скорость довольно близка к «массовому дрейфу» электронов.

Часто путают два различных смысла слова «дрейф». Существуют дрейфы отдельных частиц в магнитосфере: электроны дрейфуют на восток, а протоны на запад. Однако мы здесь будем говорить о градиенте давления, который связан с общим дрейфом, а не дрейфом отдельной частицы. Возьмем малый элемент пространства, пересчитаем в нем все частицы для некоторого момента времени и определим их среднюю скорость — в результате получаем массовый дрейф. Градиент давления, рассматриваемый Чемберленом, требует западного массового дрейфа электронов и восточного массового дрейфа протонов.

Неустойчивость нарастает, поскольку в резонанс попадают те протоны, скорость дрейфа которых совпадает с волновой скоростью²⁾; в итоге для некоторых распределений скоростей вол-

¹⁾ Вопрос о переносе и ускорении заряженных частиц рассмотрен в [25*, 26*]. — *Прим. перев.*

²⁾ Вернее, с фазовой скоростью волны. — *Прим. ред.*

на увеличивает энергию протонов. Отдельные электроны дрейфуют на восток, так что они не могут попасть таким путем в резонанс. Но, применяя этот механизм в магнитосфере, Чемберлен заявляет, что если фактическая частота волны является очень низкой и если некоторые электроны могут достаточно быстро дрейфовать на восток, то в таком случае кажущаяся частота равна их частоте колебания между точками отражения. В результате возникает другой вид резонанса. Чемберлен предполагает, что именно вследствие этого резонанса электроны увеличивают свою энергию.

Я ничего не говорил об электрическом поле в этой волне. Следует быть очень осторожным с электрическими полями, поскольку они зависят от системы отсчета. В системе координат, связанной с волной и являющейся также системой координат массового дрейфа электронов, волна не имеет электрических полей вообще. Но в системе координат, связанной с Землей или с электронами, дрейфующими на восток, существует электрическое поле, направленное вдоль оси Z . Колеблющиеся между точками отражения электроны, которые попадают в резонанс с этим полем, могут увеличить свою энергию.

Однако у меня есть возражения против механизма Чемберлена, поскольку весьма удивительно существование в плазме электрического поля, параллельного магнитному полю.

По-видимому, здесь имеется какое-то возмущение, которое Чемберлен не заметил. Поскольку начинают с градиента давления, то волна должна создать возмущение градиента давления в направлении Z . Затем это поле накладывается на некоторое дополнительное электрическое поле, что в значительной степени может уменьшить электрическое поле, полученное Чемберленом. Несомненно, возмущение такого типа требует дальнейшего рассмотрения.

Я не говорю, что волновое число должно быть большим. По коротким волнам могут оказаться важными для полярных сияний. Для коротких длин волн плотность тока для данного ΔV и электрическое поле возрастают, что приводит к эффектам, которые легче наблюдаются.

Напрашивается очевидный вывод, что с механизмом Чемберлена мы будем наблюдать лучевые дуги, поскольку в этом случае при определенном направлении электрического поля происходит сброс частиц. Разделение лучей определяется длиной волны. Кроме того, так как волна движется на запад, то лучи в дугах также должны двигаться на запад. Конечно, если плазма движется как целое в соответствии с полем DS , то следует сложить оба этих движения. По-видимому, описанная теория объясняет лучевые дуги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dungey J. W., *Geophysics. The Earth's Environment*, ed. C. De Witt, J. Hieblot, A. Lebeau, Gordon and Breach, New York, 1963, p. 526. (Русский перевод в сб. «Геофизика. Околоземное космическое пространство», М., изд-во «Мир», 1964, стр. 383.)
2. Cahill L. J., Amazeen P. G., *J. Geophys. Res.*, **68**, 1835 (1963); Cahill L. J. *Space Res.* III, ed. W. Priester, Interscience Publ., a division of John Wiley and Sons, Inc., New York, 1963, p. 324.
3. Malville J. M., *J. Geophys. Res.*, **65**, 3008 (1960).
4. O'Brien B. J., *J. Geophys. Res.*, **68**, 989 (1963).
5. McIlwain C. E., *J. Geophys. Res.*, **66**, 3681 (1961). (Русский перевод в сб. «Операция «Морская звезда»», М., Атомиздат, 1964, стр. 261.)
6. McDiarmid I. B., Burrows J. P., Budzinski E. E., Wilson M. D., *Canadian J. Phys.*, **41**, 2064 (1963).
7. McDiarmid I. B., частное сообщение.
8. Fairfield D. H., *J. Geophys. Res.*, **68**, 3589 (1963).
9. Akasofu S.-I., *Planet. Space Sci.*, **12**, 273 (1964).
10. Nakada M. P., Dungey J. W., Hess W. N., *J. Geophys. Res.*, **70**, № 15, 3529 (1965).
11. Davis L. R., Williamson J. M., *Space Res.* III, ed. W. Priester, 1963, p. 365.
12. Carpenter D. L., *J. Geophys. Res.*, **68**, 1675 (1963).
13. O'Brien B. J., *J. Geophys. Res.*, **69**, 13 (1964).
14. Chamberlain J. W., *J. Geophys. Res.*, **68**, 5667 (1963).
15. Krall N. A., Rosenbluth M. N., *Phys. Fluids*, **6**, 254 (1963).
- 16*. Сивухин Д. В., Вопросы теории плазмы, вып. I, М., Атомиздат, 1963, стр. 7.
- 17*. Alfven H., Fälthammar C.-G., *Cosmical Electrodynamics*, 2nd ed., Oxford, 1963. (Русский перевод: Г. Альвен, К.-Г. Фельтхаммар, Космическая электродинамика, 2-е изд., М., изд-во «Мир», 1967.)
- 18*. Northrop T. G., *Radiation trapped in the earth's magnetic field*, ed. McCormac B. M., D. Reidel Publ. Co. Dordrecht, Holland, 1966, p. 26.
- 19*. Chamberlain J. W., *Geophysics. The Earth's Environment*, eds. C. de Witt, J. Hieblot, A. Lebeau, Gordon and Breach, New York, 1963. (Русский перевод в сб. «Геофизика. Околоземное космическое пространство», М., изд-во «Мир», 1964, стр. 136.)
- 20*. Chapman S., in *Geophysics. The Earth's Environment*, eds. C. De Witt, J. Hieblot, A. Lebeau, Gordon and Breach, New York, 1963. (Русский перевод в сб. «Геофизика. Околоземное космическое пространство», М., изд-во «Мир», 1964, стр. 243.)
- 21*. Speiser T. W., *J. Geophys. Res.*, **70**, № 17, 4219 (1965).
- 22*. Speiser T. W., Ness N. F., *J. Geophys. Res.*, **72**, № 1, 131 (1967).
- 23*. Fairfield D. H., Cahill L. J., *J. Geophys. Res.*, **71**, № 1, 169 (1966).
- 24*. Nakada M. P., Mead G. D., *J. Geophys. Res.*, **70**, 4777 (1965).
- 25*. Тверской Б. А., Геомагнетизм и аэрномия, **5**, № 5, 793 (1965).
- 26*. Шабанский В. П., Геомагнетизм и аэрномия, **6**, № 3, 472 (1966).
- 27*. Hoh F. C., *Radiation trapped in the earth's magnetic field*, ed. McCormac B. M., D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 1966, p. 547.
- 28*. Spitzer L., *Physics of Fully Ionized Gases*, 2nd ed., Interscience, New York, 1962. (Русский перевод: Л. Спитцер, Физика полностью ионизованного газа, 2-е изд., М., изд-во «Мир», 1965, стр. 59.)
- 29*. Parker E. N., *Radiation trapped in the earth's magnetic field*, ed. McCormac B. M., D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 1966, p. 302.
- 30*. O'Brien B. J., *Interrelations of Energetic Charged particles in the magnetosphere*, in *The Inter-Union Symposium on Solar-terrestrial Physics*, Belgrade, Aug. 29 — Sept. 3, 1966. (Русский перевод в сб. «Солнечно-земная физика», М., изд-во «Мир», 1968)

МЕХАНИЗМ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО И МЕЖПЛАНЕТНОГО ПОЛЕЙ

Х. Е. Петчек¹⁾

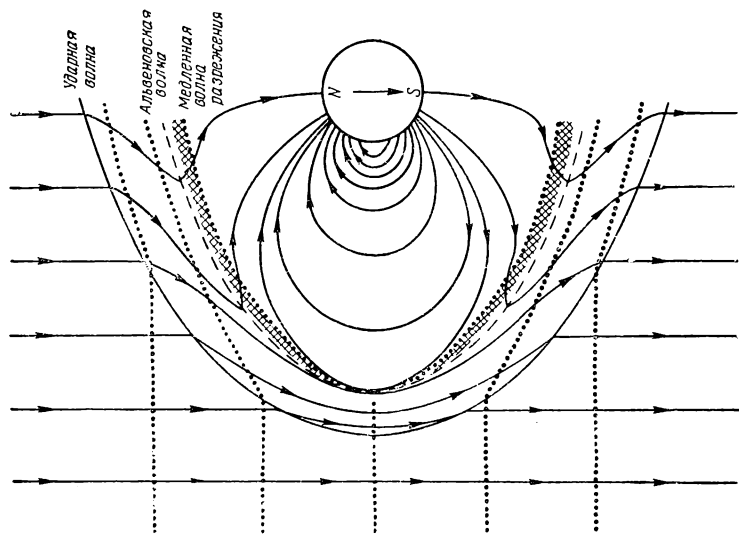
Проблеме пересоединения магнитных силовых линий дипольного поля Земли и межпланетного поля уделяли внимание Эксфорд (см. гл. 16) и Данжи (см. гл. 17)²⁾. Эта тема впервые была затронута несколько лет назад Данжи. Насколько мне известно, процессы, присходящие в нейтральной точке, никогда не исследовались с целью получения количественной оценки эффективности отсечения поля в магнитопаузе. Однако рассмотренная мною теория (гл. 15) в применении к магнитопаузе действительно дает скорость пересоединения магнитных силовых линий, которая согласуется с характером конвекции внутри магнитосферы.

В конце своего доклада Эксфорд привел два критерия возникновения внутренней конвекции и токовой системы DS . Согласно одному критерию, разность потенциалов над полярной областью должна быть порядка 20 кВ , другой критерий сводится к тому, что поступление энергии должно быть порядка 10^{19} эрг/сек . Я провел расчеты поступающей энергии, которые как будто согласуются со значениями, указанными Эксфордом.

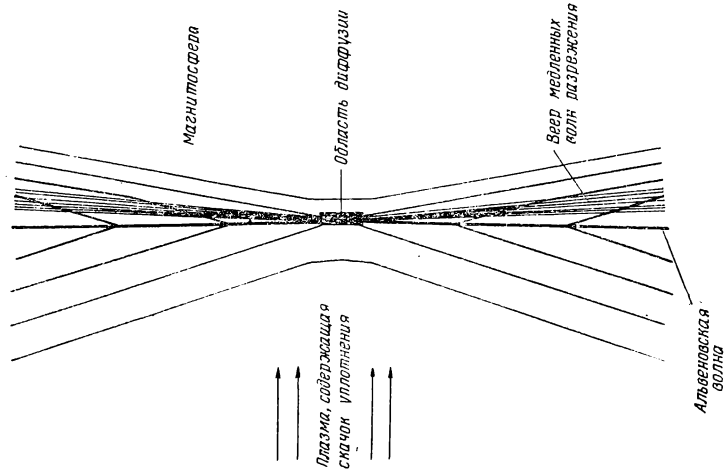
На рис. 1 представлена граница магнитосферы и ударная волна впереди нее. Как я уже упоминал, в магнитной гидродинамике существует три типа волн. Быстрая волна, или скорее ее нелинейное продолжение, представляет собой ударную волну впереди магнитосферы. В дальнейшем граница распадается на две другие волны. Мы проиллюстрируем это для случая конечной концентрации в области между ударной волной и границей и нулевой концентрации внутри магнитосферы. При конечной концентрации внутри магнитосферы детали изменились бы, но граница по-прежнему будет расщепляться на два указанных типа волн.

¹⁾ Большая часть этой работы была выполнена в сотрудничестве с Г. Сискоу и Р. Леви.

²⁾ См. также гл. 19 и примечания редактора и переводчика к ней. — *Прим. ред.*



Р и с. 1. Граница магнитосферы и ударная волна.



Р и с. 2. Пересоединение силовых линий на границе.

Хотя на рисунке показано межпланетное поле, перпендикулярное плоскости эклиптики, результаты существенно не изменятся и при другой ориентации поля. В данном частном случае в непосредственной близости от подсолнечной области имеется нейтральная точка. Фактически мы имеем нейтральную линию, охватывающую границу магнитосферы по экватору. Если вне магнитосферы поле слегка наклонено, то вы не получите точно нейтральную линию; однако все еще будет существовать линия симметрии, которая проходит вдоль магнитопаузы под некоторым углом к плоскости эклиптики.

На рис. 2 область вокруг нейтральной точки выделена. Между двумя полями сходятся под конечным углом альвеновская (промежуточная) и медленная волны. Структура последней несколько отличается от уже рассмотренной в гл. 15, где имелось по одной волне, распространяющейся в направлении от границы (см. рис. 3 гл. 15). Однако анализ по существу остается неизменным. Поскольку эти волны по-прежнему распространяются со скоростью, пропорциональной нормальной составляющей магнитного поля, то скорость, с которой магнитные силовые линии приближаются к границе и пересоединяются, по существу остается той же. Уравнение, определяющее скорость движения магнитных силовых линий u_b через альвеновскую скорость V_A (которая находится на основе напряженности магнитного поля и концентрации плазмы непосредственно снаружи от границы), проводимость σ и радиус магнитосферы R , таково:

$$u_b \approx \frac{\pi}{2} \frac{V_A}{\ln \left(\frac{8\pi\sigma V_A R}{c} \frac{u_b^2}{V_A^2} \right)}.$$

Кроме того, я хочу упомянуть некоторые особенности, которые можно наблюдать при помощи прибора, проходящего через магнитопаузу. Согласно приведенной схеме, альвеновская волна изменяет направление магнитного поля. В этом случае составляющая поля в плоскости волны изменяется на 180° . Межпланетное магнитное поле, неперпендикулярное плоскости эклиптики, будет поворачиваться на меньший угол. При прохождении спутника через альвеновскую волну напряженность магнитного поля, давление или концентрация частиц меняться не должны. При прохождении через медленную волну напряженность поля должна увеличиться, чтобы скомпенсировать понижение газового давления, обусловленное уменьшением концентрации. Таким образом, изменение направления магнитного поля должно происходить несколько дальше того места, где изменяется величина поля. Угол между альвеновской волной и

осевой линией медленной волны должен быть порядка $0,1 \text{ рад}$, а это означает, что на расстоянии $\sim 10 R_{\oplus}$ от нейтральной линии разделение между двумя волнами достигает $\sim 1 R_{\oplus}$.

Вернемся теперь к общей конфигурации и проведем некоторые оценки. Предположим, что условия в потоке межпланетной

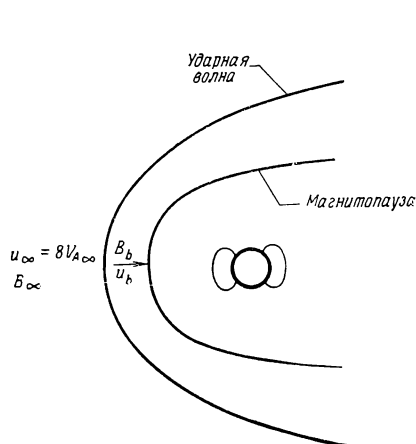


Рис. 3. Параметры, описывающие соединение дипольного поля с межпланетным полем.

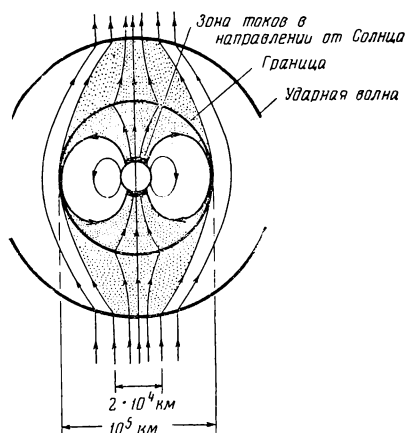


Рис. 4. Поперечное сечение магнитосферы перпендикулярно прямой Земля — Солнце и параметры, необходимые для оценки электродвижущего потенциала токов DS .

	Скорость пересоединения $\frac{u_b B_b}{u_{\infty} B_{\infty}}$
$T = 10^6 \text{ К}$	0,04
$\delta^* = 3 \text{ км}$	0,1
$\delta^* = 100 \text{ км}$	0,2

	Полярная зона	Граница
Длина, км	$3 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$
Поле, гс	0,6	$5 \cdot 10^{-5}$
Скорость, км/сек	0,1—0,5	500
Скорость изменения магнитного потока, в	$(0,2-1) \cdot 10^5$	$0,5 \cdot 10^5$

плазмы известны; тогда можно определить напряженность магнитного поля B_b и концентрацию непосредственно за ударной волной (рис. 3). Используя формулу для u_b , приведенную выше, можно определить скорость $u_b B_b$, с которой магнитные силовые линии пересоединяются на единице длины вдоль нейтральной линии. Отношение скорости пересоединения к скорости, с которой магнитные силовые линии пересекают ударную волну $u_{\infty} B_{\infty}$,

определяет, какая часть магнитных силовых линий, падающих на ударную волну, пересоединяется с дипольным полем. Остальная часть силовых линий должна двигаться вокруг магнитосферы в слое между ударной волной и магнитопаузой, как это имеет место во всех моделях, в которых пренебрегают механизмом пересоединения.

Это отношение указано в подписи к рис. 3 для трех различных значений проводимости, поскольку действительная проводимость среды неизвестна. Первое значение характеризует крайний случай, который включен лишь для иллюстрации того, что скорость пересоединения не очень чувствительна к величине проводимости. В этом случае проводимость связана с парными соударениями и соответствует температуре 10^6 °К. Поскольку длина свободного пробега больше 1 а. е., такая проводимость не кажется подходящей. Однако даже при этом значении $\sim 4\%$ магнитных силовых линий пересоединяется.

Оценку максимального значения проводимости можно получить, допуская, что толщина диффузионной области не может быть меньше гирорадиуса электрона, если в этой области может течь соответствующий ток. Даже если тепловая скорость всех электронов направлена в одну сторону, то направление поля не может изменяться меньше, чем на этом расстоянии, которое равно ~ 3 км. Для диффузионной области этой толщины 10% магнитных силовых линий пересоединяется.

Я придерживаюсь мнения, что толщина диффузионной области должна равняться ~ 100 км (гирорадиус иона). Эта величина приведет к пересоединению 20% силовых линий. Таким образом, по крайней мере 10% , а может быть и 20% магнитных силовых линий, падающих на магнитосферу, соединяются с дипольным полем.

На рис. 4 представлено поперечное сечение магнитосферы перпендикулярно линии Земля—Солнце, проходящее через Землю. (Силовые линии не обязательно лежат только в этой плоскости.) Ударная волна и магнитопауза показаны в виде концентрических окружностей. Часть магнитных силовых линий ($\sim 20\%$) соединяется и проходит через границу; тогда как остальная часть скользит в промежуточной области.

Для определения первого из чисел Эксфорда, а именно разности потенциалов над полярной областью, мы замечаем, что напряженность магнитного поля снаружи от ударной волны равна $\sim 5\gamma$. Диаметр магнитопаузы составляет $\sim 10^5$ км. Поскольку 20% магнитных силовых линий соединяется, то проекция области соединения вне ударной волны соответствует размеру $2 \cdot 10^4$ км. Кроме того, известно, что скорость солнечного ветра равна ~ 500 км/сек. В таком случае произведение ско-

рости на напряженность магнитного поля и на длину дает разность потенциалов 50 кВ. Эта величина должна быть аналогична полученной в полярной ионосфере; в соответствии с оценкой Эксфорда последняя равна 20 кВ.

Несколько другая оценка полярного потенциала показана на рис. 4. Напряженность поля на полюсах известна. Размер области, в которой магнитные силовые линии двигаются в анти-солнечном направлении, соответствует размеру той области, в которой токи системы DS направлены к Солнцу. Скорость в полярной области соответствует наблюдаемым пределам скоростей видимых полярных сияний. Произведение этих чисел дает разность потенциала от 20 до 100 кВ. Таким образом, полярный потенциал, определяемый по скорости отсечения магнитных силовых линий, удовлетворительно согласуется с оценками, выведенными из наблюдений в полярных областях.

Что касается значения требуемой скорости поступления энергии внутрь магнитосферы, то оценка такова: давление на границе магнитосферы φ равно

$$\varphi = \frac{B_n \delta B_t}{4\pi}, \quad (1)$$

где B_n — нормальная составляющая магнитного поля, δB_t — изменение тангенциальной составляющей магнитного поля. Умножая (1) на площадь поверхности магнитосферы $2\pi RL$ (где L — линейный размер) и на скорость солнечного ветра, получим выражение для энергии, поступающей в магнитосферу в секунду

$$P = 2\pi RL v \varphi. \quad (2)$$

Полагая $B_n = 1\gamma$, что соответствует 20% межпланетного поля в 5γ, $B_t = 10\gamma$, что более или менее согласуется с результатами «Эксплорера-10», полученными на ночной стороне Земли, $R = 10^5$ км, $L = 10^6$ км и $v = 400$ км/сек, имеем $P = 2 \cdot 10^{19}$ эрг/сек. Очевидно, что это ближе к требуемому значению 10^{19} , чем можно было ожидать по характеру расчета.

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДОВ ЭКСФОРДА, ДАНЖИ И ПЕТЧЕКА

Ускорение захваченных частиц за счет нарушения третьего адиабатического инварианта

Паркер. У меня общее замечание относительно ускорения частиц за счет наложения электрического и градиентного дрейфов. Мысль об этом была высказана Келлогом [1] и, по-видимому, была забыта.

Келлог доказал, что третий инвариант движения захваченной частицы может нарушаться, если имеется геомагнитное поле, изменяющееся во времени. В этом случае частицы ускоряются, поскольку первый инвариант не на-

рушается. В то время существовал значительный интерес к этому механизму. Я проделал некоторые расчеты и убедился, что механизм правилен и эффективен. Насколько мне известно, с этим согласен и Дэвис.

Блок. Я не знаком с работой Келлога, но, как мне кажется, ускорение частиц, создаваемое градиентными дрейфами вдоль электрического поля, было предложено впервые в 1939 г. Альвеном в его первоначальной теории полярных сияний [2].

Эксфорд. По-видимому, диффузия частиц в магнитосферу за счет нарушения третьего адиабатического инварианта является вполне возможным объяснением большей части захваченной радиации. Я хотел бы отметить, что третий инвариант может нарушаться в результате флуктуаций электрических полей, соответствующих конвективным движениям внутри магнитосферы, как предполагал Голд [3]. Этот механизм, который, вероятно, действует все время, отличается от рассмотренного Келлогом и Паркером в том отношении, что магнитное поле остается невозмущенным, а электрическое поле в первом приближении безвихревое.

Направление межпланетного поля и его роль в магнитных бурях¹⁾

Блок. Несколько замечаний относительно механизма Данжи. Мне кажется, что он похож на теорию Альвена [4] с двумя важными исключениями: изменение направления поля на обратное вне магнитосферы и отсутствие каких-либо электрических полей вдоль магнитных силовых линий. Верно ли это?

Данжи. Да. Что касается южной тенденции в межпланетном поле, то я никак не хочу утверждать, что я предсказал необходимость существования поля южного направления. По существу не может быть, чтобы все время существовало поле южного направления. Я полагаю, что следует рассортировать два различных типа явления (скажем, бухты) и определить, какие условия в межпланетном пространстве соответствуют событиям, наблюдаемым на Земле.

Блок. Я полагаю, что ваша точка зрения совпадает с точкой зрения Альвена, именно что нижняя граница зоны сияний, расположенная у более низких широт, определяется диамагнитным отталкиванием плазмы, которая движется внутрь магнитосферы. Это верно?

Данжи. Диамагнитное отталкивание — это шаг к разговору о давлении. Но это приводит назад к гидродинамическому аспекту картины.

Блок. Если вы рассматриваете отдельные частицы, то магнитный момент частицы μ создает отталкивание, которое противодействует дрейфу в электрическом поле.

Эксфорд. По-видимому, проще сказать так: имеется электрический потенциал ~ 20 кВ, который эффективно ограничивает энергии частиц независимо от конфигурации электрического поля.

Блок. Это то же самое.

Эксфорд. Схема Альвена включается во все теории, которые содержат электрические поля. При этом знак поля меняется на обратный. В результате мы получаем токовую систему DS с правильным направлением. Таким образом, внутри магнитосферы плазма течет к Солнцу, а не от него.

Блок. Недавно в Стокгольме мы провели эксперименты²⁾ по измерению электрического поля поперек модели магнитосферы, когда плазма выбрасывалась по направлению поля. В выброшенной замагнитченной плазме направление поля в некоторых случаях соответствует альвеновскому, а в других — направ-

¹⁾ См. примечание переводчика на стр. 289. — *Прим. ред.*

²⁾ Подробнее об этих опытах см. [26*, 27*]. — *Прим. перев.*

лению, предлагаемому Данжи. Эксперименты показали, что электрическое поле было замкнуто накоротко при альвеновском направлении поля и было измеримо при направлении поля по Данжи. Таким образом, эксперименты говорят в пользу геометрии поля по Данжи, которая, по-видимому, более эффективна в отношении инжекции частиц внутрь магнитосферы.

Голд. Полтора года назад [5] у меня были основания утверждать, что магнитное поле в космическом пространстве должно иметь предпочтительное направление, при котором перпендикулярная к плоскости эклиптики составляющая поля чаще антипараллельна, а не параллельна направлению поля во внешней части поля Земли. Такое направление поля необходимо для объяснения быстрых частиц, регистрируемых от всплесков на восточном и западном лимбах Солнца. По-видимому, в то время когда накапливалась статистика (по существу два года), существовала общая тенденция полей космического пространства чаще иметь именно это направление, а не другое. Данные «Маринера-2», вероятно, подтверждают этот вывод для периода, непосредственно примыкающего к рассмотренному мною. Таким образом, вполне возможно, что поле обладает такой конфигурацией большую часть времени, возможно изменяясь с 23-летним циклом солнечной активности.

Блок. Имеется еще одно основание предположить, что межпланетное магнитное поле обладает этим южным направлением. Если вы помещаете магнит в магнитное поле, то у магнита появится момент, который будет поворачивать его так, чтобы установилась конфигурация с минимальной энергией. В этом случае поле Земли не может проскальзывать¹⁾. Но если солнечный ветер содержит некоторое неупорядоченное поле, направленное иногда в одном направлении, а иногда в другом, то в таком случае полю с южным направлением было бы легче соединиться с геомагнитным полем, а полю с другим направлением — проскользнуть мимо магнитного поля Земли.

Голд. Но этот эффект не имеет ничего общего с преобладающим направлением межпланетного поля.

Дэвис. Я полагаю, что вопрос о противоположной полярности межпланетного поля и поля Земли имеет важное значение. Существуют два возможных объяснения этой конфигурации: 1) Межпланетное поле направлено иногда в одном направлении, а иногда в другом. Однако различные плазменные механизмы, работающие вблизи магнитопаузы (внутри ударной волны), предпочтительно поддерживают поле, когда оно направлено в противоположную относительно магнитного поля Земли сторону. В результате вблизи Земли в основном наблюдается именно эта конфигурация. 2) Данные «Маринера-2» указывают на тенденцию преобладания южного направления в межпланетном магнитном поле, хотя большая по величине составляющая лежит в плоскости эклиптики. Я полагаю, что такой же вывод следует из данных «ИМП-1». Было бы удивительно, если бы подобная тенденция не была связана с общим циклом солнечной активности. В таком случае направление должно меняться каждые 11 лет и изменилось где-то около 1960 г.

Поэтому период, в течение которого Голд получил свои статистические данные, является весьма критическим. К тому же, если полярность поля важна для полярных сияний, то следует выяснить, существует ли 23-летний цикл изменения полярных сияний. Если нет, то намечаемый путь бесперспективен.

Чепмен. Действительно ли поступление энергии для создания полярных сияний зависит от межпланетного магнитного поля, имеющего южное направление?

Петчек. Если геомагнитное и межпланетное поля расположены под углом друг к другу, то скорость пересоединения должна быть пропорциональной

¹⁾ То есть в этом случае межпланетное поле должно соединяться с геомагнитными силовыми линиями. — *Прим. ред.*

$\sin(\theta/2)$. Поля можно разложить на две составляющие: одну, у которой поля параллельны по обе стороны нейтральной точки, и другую, у которой поля антипараллельны и взаимно уничтожают друг друга. Существенна та составляющая, у которой поля антипараллельны. Если бы межпланетное поле располагалось в плоскости эклиптики, то скорость пересоединения уменьшалась бы в $1/\sqrt{2}$ раз. Таким образом, следует ожидать наличия некоторых эффектов, связанных с 23-летним солнечным циклом, но они могут оказаться слабо выраженными.

Эксфорд. Я не думаю, что направление межпланетного магнитного поля может оказывать существенное влияние. Если межпланетные магнитные силовые линии сливаются с силовыми линиями геомагнитного поля по схеме, описанной Данжи, Петчеком и другими, то слияние будет происходить лоскутно по всей поверхности магнитосферы, там, где внутренние и внешние магнитные силовые линии направлены соответствующим образом. Даже если бы у перпендикулярной к плоскости эклиптики составляющей межпланетного магнитного поля преобладала тенденция к антипараллельности с геомагнитным полем, то маловероятно, что этот антипараллелизм сохранится, когда солнечный ветер проходит через стоячую ударную волну впереди магнитосферы. Магнитное поле сразу за пределами магнитопаузы, вероятно, становится весьма неупорядоченным независимо от состояния поля с внешней стороны ударной волны. Поэтому механизм слияния должен справляться с произвольно ориентированными внешними силовыми линиями.

Колеман. Я хотел бы сделать замечание относительно направления межпланетного магнитного поля. Максимум в распределении ориентации, как это следует из наблюдений на «Маринере-2», расположен почти в плоскости эклиптики с общим направлением от Солнца, но с небольшой составляющей, перпендикулярной к плоскости эклиптики и направленной к югу. Тем не менее в течение $\sim 40\%$ времени эта малая перпендикулярная составляющая поля направлена на север. Такое распределение ориентации характерно для интервала времени (примерно неделя), в течение которого космический аппарат вращался и в течение которого довольно точно известно собственное магнитное поле аппарата.

Несс. В теоретических задачах обычно принималось, что межпланетное магнитное поле перпендикулярно к плоскости эклиптики и либо параллельно, либо антипараллельно оси земного диполя. Как можно включить в эту схему данные по межпланетному магнитному полю, которые указывают на наличие очень сильной тенденции у направления поля располагаться близко к плоскости эклиптики?

Петчек. Я уже говорил, что скорость пересоединения зависит от $\sin(\theta/2)$. Вы утверждаете, что θ должно равняться 90° , а не 180° , а это изменит скорость на $1/\sqrt{2}$. Поле в плоскости эклиптики также исказит картину магнитных силовых линий, представленных на рис. 4 из гл. 18.

Голд. Даже если магнитное поле действительно имеет значительную составляющую вдоль потока, то это мало изменит рассмотрение вопроса, поскольку поля становятся запутанными в окрестностях Земли, когда магнитные силовые линии как бы «опрокидываются». Вы имеете дело с малой нерадiallyй составляющей магнитного поля, и именно эта малая составляющая определяет, как упаковываются магнитные силовые линии, когда они сжимаются перед магнитосферой Земли.

Я хочу познакомить вас с еще одним положением относительно направления межпланетного магнитного поля. Экспериментально пока еще не установлено, связана ли сезонная вариация в среднем по частоте и интенсивности магнитных бурь с периодами равноденствий, или же она связана с периодами максимума гелиоцентрической широты Земли. К сожалению, в силу случайности в настоящее время из-за 26 000-летнего периода прецессии эти

оба эффекта имеют почти одинаковую фазу. Если бы на Земле этот эффект наблюдали в другое историческое время, то нас это бы не беспокоило.

В случае усиления магнитных бурь за счет эффекта положения равноденствия нынешняя ориентация геомагнитного диполя оказывается критичной, поскольку диполь ежесуточно колеблется относительно географической оси на угол 11° , а сама ось наклонена и образует с перпендикуляром к плоскости эклиптики угол $23^\circ,5$. Магнитные бури должны были бы иметь наибольшую интенсивность, когда земной диполь направлен к потоку под углом, близким к прямому.

Брандт. Существует мало известная статья Элика [6], в которой он рассмотрел число вспышек в северной и южной солнечной полусферах. Основная информация была взята из статьи Белл [7]; анализ был выполнен за 23-летний период. Я тщательно проверил этот отрезок времени, надеясь, что мы не получим каких-либо аргументов, свидетельствующих о влиянии цикла солнечной активности. За указанный период 56% вспышек имели место в северной полусфере. 74 вспышки сопровождались эффектами на Земле. Из числа этих вспышек 86,5% имели место в северной полусфере. Элик подсчитал, что вероятность случайного появления такого события составляет $2 \cdot 10^{-10}$.

Другими словами, весьма маловероятно, что отсутствие симметрии является случайностью. Должна быть какая-то физическая причина в том, что при вспышках в северном полушарии генерируются частицы, которые сталкиваются с Землей, тогда как при вспышках в южном полушарии такие частицы не создаются. Я полагаю, что объяснение, предложенное Эликом, заслуживает внимания, хотя в теоретическом отношении оно не обосновано. Его теория базируется на том факте, что скорость Солнца относительно Галактики направлена к северу и составляет 20 км/сек . В результате возникает локальный межзвездный ветер, который оказывает одностороннее давление на область солнечного ветра и изгибает к югу силовые линии. Однако межзвездный ветер не в состоянии достаточно сильно изгибать силовые линии, чтобы объяснить наблюдаемую асимметрию. Кроме того, теория Элика предсказывает наличие постоянно существующей южной составляющей магнитного поля около плоскости эклиптики, не зависящей от фазы солнечного цикла. Основная трудность этой теории состоит в том, что трудно представить себе, как межзвездный газ может проявляться в такой близости от Солнца. Однако мы не настолько хорошо знаем этот эффект, чтобы его полностью отбросить.

Уилкоккс. Хотя в течение последних пяти солнечных циклов северное полушарие Солнца было ответственно более чем за 50% источников больших магнитных бурь, тем не менее Белл показала, что в период с 10-го по 14-й циклы (1856—1901 гг.) в этом отношении господствовало южное полушарие [7]. Для 13-го цикла южное солнечное полушарие ответственно за источники 80% больших магнитных бурь. Таким образом, движение солнечной системы в северном направлении к апексу в Геркулесе как возможное объяснение северо-южной асимметрии источников больших магнитных бурь, по-видимому, исключается.

Можно предложить другое объяснение. За 23-летний период (1937—1959 гг.), исследованный Белл, 62% больших вспышек произошло в северном полушарии [8]. Однако северные группы солнечных пятен создали 86% больших солнечных вспышек, которые сопровождались большими магнитными бурями. Таким образом, хотя большее количество вспышек относилось к северному полушарию Солнца, сам по себе этот факт еще не достаточен для объяснения асимметрии. Основная причина может быть связана с асимметрией солнечного магнитного поля, которая могла возникнуть в результате асимметрии нагревания короны, потока плазмы солнечного ветра и магнитного поля. Именно асимметрия солнечного ветра могла бы объяснить, почему активность в северном полушарии Солнца оказывает большее влияние на геомагнитное поле.

Теория Х. У. Бэбкока допускает северо-южную асимметрию солнечного магнитного поля [9]. При этом магнитный поток в каждом полушарии независимо усиливается за счет дифференциального вращения Солнца. Если одно полушарие обладает большей магнитной энергией, то это положение может сохраняться в течение нескольких солнечных циклов. По-видимому, Х. Д. Бэбкок действительно наблюдал различие магнитных условий в двух солнечных полушариях [10]. В 1957 г. общее магнитное поле южной полярной шапки изменило свою полярность. С запазданием примерно на 18 месяцев аналогичное обращение произошло в северной полярной области Солнца. Более точное количественное сравнение магнитных условий в двух солнечных полушариях станет возможным лишь при использовании солнечного магнитографа и усовершенствовании методики обработки данных [11].

Керн. Я хотел бы задать вопрос относительно расчетов Петчеком скорости пересоединения. Для направления межпланетного магнитного поля, параллельного солнечному ветру или перпендикулярного оси диполя, в принципе существуют два места, где могли бы образоваться нейтральные точки: одна позади Земли, а другая впереди нее. Если действительно существуют лишь две точки, то ими охватывается очень малая площадь. Зависит ли скорость пересоединения от размеров области, в которой оно возможно?

Петчек. Строго говоря, имеются лишь две нейтральные точки. Однако вычисленная скорость пересоединения не зависит от угла, на который поле поворачивается при прохождении через границу. Таким образом, пересоединение имеет место даже в отсутствие строго нейтральной точки, т. е. когда угол не равен точно 180° . В итоге следует ожидать, что пересоединение будет иметь место вдоль некоторой линии на поверхности магнитосферы. Для частного случая межпланетного магнитного поля, антипараллельного полю диполя, эта линия определяется как экватор граничной поверхности. Это единственный случай, когда существует нейтральная линия. Для более общей ориентации поля пересоединение будет иметь место вдоль некоторой асимметричной линии на поверхности.

Керн. Меня интересовало, опирались ли расчеты на трехмерную модель.

Петчек. Анализ течения, определяющего скорость, с которой магнитные силовые линии сближаются друг с другом, был двумерным. Однако он применялся к трехмерной магнитосфере в предположении, что длина кривой, на которой происходит пересоединение, равна диаметру магнитосферы.

Неустойчивость¹⁾, развитие магнитных бурь²⁾ и приток энергии

Кеннел. Я хотел бы прокомментировать замечания Данжи об общей, или дрейфово-волновой, неустойчивости³⁾ и применимость теории Чемберлена к полярным сияниям.

Общая неустойчивость наблюдалась в лаборатории на Q-установке [12] — цилиндрической трубе с длиной много больше ларморовского радиуса ионов и радиусом в несколько ларморовских радиусов ионов; параллельно оси трубы наложено однородное магнитное поле. Вдоль оси цилиндра устанавливается волна, длина которой равна двойной длине установки. Волна распространялась азимутально со скоростью дрейфа электронов вследствие

¹⁾ См. работы советских ученых [19*, 20*]. — *Прим. перев.*

²⁾ В качестве дополнительной литературы для ознакомления с проблемой взаимодействия солнечной плазмы с магнитосферой и развития магнитных бурь можно рекомендовать несколько обзорных работ: Коул [21*], Акасофу [22*], Обаяши [23*], Пиддингтона [24*] и Жулина [25*]. — *Прим. перев.*

³⁾ Обычно ее называют просто дрейфовой неустойчивостью [20*]. — *Прим. ред.*

градиента давления, как это и предсказывалось¹⁾. «Азимутальная длина волны» равнялась нескольким ларморовским радиусам иона; это свидетельствовало о том, что данное колебание было локализованным и немагнитогидродинамическим.

При обсуждении общей неустойчивости в применении к полярным сияниям Чемберлен рассмотрел задачу, в которой волна совершенно не перемещалась параллельно магнитному полю. Оказывается, что это допущение является довольно слабым для волн, волновой вектор которых имеет составляющую, параллельную магнитному полю. Для плазмы с низким значением β^2) телесные углы близ перпендикуляра, в которых реалистично допущение о перпендикулярности, поразительно малы. Вне этого угла применимы расчеты Рудакова и Сагдеева [13]. Общая неустойчивость по существу является ионно-звуковым колебанием, видоизмененным градиентами пространственного распределения. Волна распространяется параллельно магнитному полю со скоростью, в несколько раз превышающей тепловую скорость ионов. Именно наличие резонансных скоростей у электронов приводит к созданию неустойчивости. Однако эта скорость как будто слишком низка для скорости электронов полярных сияний, испытывающих резонансное взаимодействие с волнами. Я не знаю, что произошло бы, если бы отражающиеся частицы высоких энергий возвращались обратно в фазе с ионной волной, как это предполагает Чемберлен. Но конечный размер лабораторной установки (и магнитосферы) требуют рассмотрения волн, которые не являются строго перпендикулярными к $\mathbf{B}$ и затрудняют четкое представление резонансного отражения.

Частоты этих волн значительно ниже ионно-циклотронной частоты. На расстоянии $10 R_E$ ионно-циклотронный период на экваторе равен 1 сек. Любое явление, связанное с общей неустойчивостью, должно иметь меньший временной масштаб. Вероятно, невозможно объяснить таким методом флуктуации выпадания электронов длительностью 0,1 сек. наблюдаемые с помощью баллонов.

Несколько слов относительно обменного движения, которое интересует Эксфорда. Несколько лет назад было экспериментально установлено, что для некоторых видов плазмы обменное движение более устойчиво, чем это предполагалось на основе теории. Для магнитосферы обменное движение является конвективным. Последующие расчеты [14] показывают, что в линейной теории обменный процесс стабилизируется ионами высокой энергии, ларморовские радиусы которых сравнимы с диаметрами конвективных трубок. Если вообще и существует какая-либо связь между расчетами в линейном приближении и нелинейной конвекцией, то можно спросить, зависит ли конвекция от наличия ионов высокой энергии и не могут ли они замедлить ее.

Эксфорд. Я полагаю, что ваш подход к устойчивости, возникающей вследствие эффектов конечности ларморовского радиуса, применим к внутренним областям магнитосферы и, возможно, к зонам захваченной радиации. Однако трудно представить себе, что около $4 R_E$ будет происходить обменное движение.

¹⁾ Скорость дрейфа из-за градиента давления выражается так:

$$\left(\frac{1}{\Omega} \frac{kT_e}{m_e} \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x} \right),$$

где

$$\Omega = \frac{e|B|}{m_e c}, \quad p = n_e k T_e.$$

²⁾ β — отношение статического давления плазмы к магнитному. — *Прим. ред.*

Братенагл. Возможна ли стабилизация обменных процессов обычной вязкостью в изолирующем слое, вследствие того что атмосфера является своего рода «липким слоем»? Что-то в этом роде рассматривал Хайнс.

Эксфорд. Влияние ионосферы аналогично уменьшению подвижности плазмы проводящими стенками, которые пересекают магнитные силовые линии. Кроме эффекта конечности ларморовского радиуса обменное движение подавляется также токами, текущими в изолирующих стенках. Если проводимость стенок увеличивается, то обменные процессы затрудняются, поскольку возникающее электрическое поле стремится закорачиваться на стенки. При заданной скорости обменного движения существует определенное электрическое поле, а потому и определенный ток в стенках. Этот ток представляет собой диссипацию энергии и эквивалентен вязкости. Электрическое поле (а следовательно, и ток) пропорциональны скорости, так что обменные движения не могут быть полностью подавлены: они могут быть лишь замедлены.

Однако поскольку в магнитосфере есть своего рода динамо, которое поддерживает электрическое поле, то проводимость ионосферы приводит к разряду этого поля в течение нескольких секунд. Работа динамо должна поддерживаться механическими силами, например атмосферными приливами, вращением Земли или солнечным ветром. Электрическое поле, согласно теории магнитных бурь Альвена, такого рода «приводом» не располагает, и следует ожидать, что оно быстро закорачивается, если только не действует какой-либо предохранительный механизм.

Данжи. Я хотел бы упомянуть в связи с обменной неустойчивостью работу Тейлора (Калхемская лаборатория) [15]. Он нашел необходимое и достаточное условие для устойчивости обменного типа. Условие очень простое и выражается через величину, аналогичную упомянутой мною в связи с работой Гесса и Накады. Эта величина является производной функции распределения по энергии, когда сохраняются два инварианта. Для случая магнитосферы это означает, что меняется L . Достаточное условие для устойчивости сводится к [16]:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial E} \right)_{\mu, I} < 0.$$

Необходимое и достаточное условие для устойчивости состоит в том, что некоторый интеграл, включающий эту производную и взятый по трубке потока, должен быть меньше нуля. По существу это вариационный принцип.

На рис. 4 гл. 17 (стр. 291) показано, что график зависимости f от L при фиксированных значениях μ и I всегда имеет некоторый наклон. Другими словами, условие достаточности выполняется (без интеграла). Разумеется, вы можете утверждать, что различного рода неустойчивости имеют место до тех пор, пока все не стабилизируется.

Голд. Наблюдения О'Брайеном полярных сияний и электронов, ответственных за большую часть свечения полярных сияний, весьма удивительны [17]. Электроны обладают почти изотропным распределением лишь ниже некоторого определенного уровня на силовой линии в области сияния. На больших высотахpitch-углы порядка 90° отсутствуют. Создается впечатление, что электроны были ускорены вдоль магнитной силовой линии. Если это на самом деле так, то следует полагать, что поток электронов, ответственный за полярное сияние, создается электрическим полем вдоль отдельных магнитных силовых линий. Мне представляется, что любой метод перемещения частиц с одной орбиты на другую окажется недостаточным. Я не знаю, как можно перемешать частицы настолько, чтобы они заканчивали свое движение лишь с очень малыми pitch-углами. Вероятно, это является очень важным дополнительным ограничением на теорию электронов, ответственных за полярные сияния.

Чепмен. Рис. 5 имеет прямое отношение к рассматриваемому вопросу. Магнитная буря 4 декабря 1958 г. показана на магнитограммах Колледжа (Аляска) и Гонолулу. Я хотел бы обратить ваше внимание на запись, обозначенную буквой *H*. Заметьте, что масштаб на магнитограммах станции Колледж составляет 1,3 масштаба станции Гонолулу.

В момент, обозначенный *SC*, наблюдалось внезапное начало того типа, за которым часто следует магнитная буря с развивающимся кольцевым током и

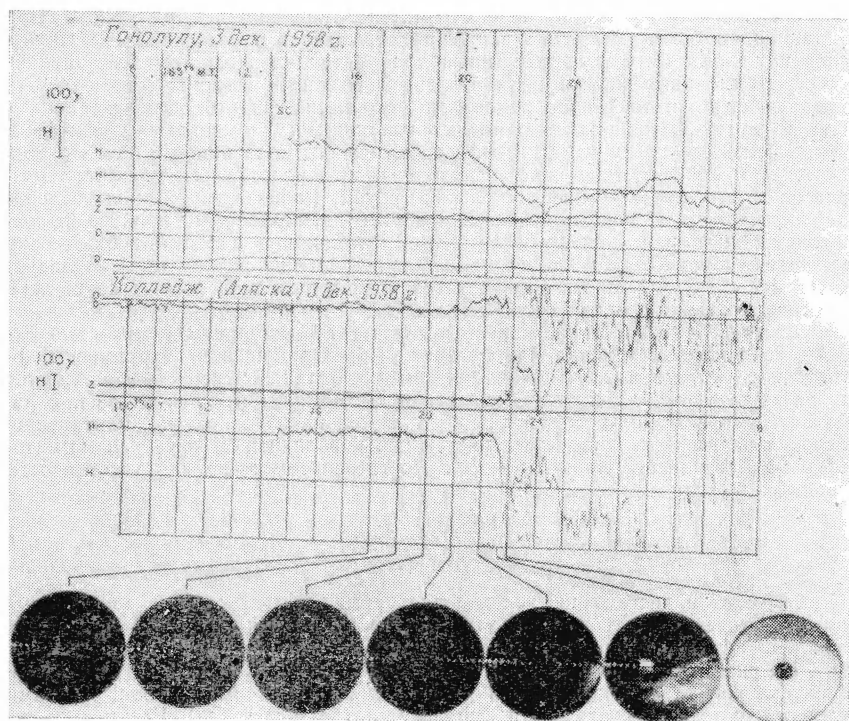


Рис. 5. Развитие магнитной бури 4 декабря 1958 г. и фотографии полного неба, полученные в Колледже (Аляска).

многочисленными полярными возмущениями. Можно принять скачок поля за меру усиления потока плазмы. Но в данном случае магнитное поле колебалось совсем немного. Колебания на обеих записях удивительно похожи друг на друга. Характер вариаций на магнитограммах других станций остается таким же. Интенсивность потока плазмы колебалась в течение нескольких часов. И хотя не наблюдалось развития полярных возмущений, тем не менее магнитосфера в течение всего этого периода попеременно сжималась и расширялась. Эта запись свидетельствует о том, что возрастание интенсивности плазмы и ее неустановившиеся вариации не обязательно приводят к последующему развитию полярных сияний и полярных магнитных возмущений.

В нижней части рисунка представлены фотографии полярных сияний, полученных в Колледже посредством камер полного обзора через часовые интервалы. Во время внезапного начала полярных сияний не было замечено. Главная фаза сияния началась через $\sim 6\frac{1}{2}$ час после внезапного начала. По-видимому, образовался кольцевой ток, и вскоре после этого были зарегистрированы сильные магнитные бухты. Затем появилось полярное сияние и начались возмущения полярных сияний и магнитного поля.

Таким образом, сжатие магнитного поля непрерывным и нестационарным плазменным потоком не обязательно приводит к развитию бури и поступлению внутрь магнитосферы кинетической энергии.

Эксфорд. Описанный случай, вероятно, неплохо подтверждает предположение, что основную роль в магнитных бурях играют обменные движения. Именно они создают кольцевой ток. Без этих движений (как это следует из токовой системы DS) кольцевой ток не возникает. С другой стороны, вполне возможно, что кольцевой ток оказывается слабым или отсутствует даже при сильном токе DS , ибо для создания кольцевого тока необходимы частицы высокой энергии, которых может не оказаться в достаточном количестве.

Кроме того, хотя обменные движения могут возникнуть почти сразу после внезапного начала, тем не менее может пройти значительное время, прежде чем начнет развиваться кольцевой ток. Дело в том, что частицам солнечного ветра потребуется довольно длительное время, прежде чем они будут перенесены в глубь магнитосферы и увеличат свою энергию за счет этого движения. При внезапном начале частицы сразу же вводятся внутрь магнитосферы; однако ничего не наблюдается до тех пор, пока часа через четыре первые частицы не достигнут широт зоны полярных сияний. Одновременно с этим (или немного раньше) возникает кольцевой ток и усиливаются элементарные возмущения сияний и геомагнитного поля.

Чепмен. Иногда главная фаза начинается приблизительно через час после внезапного начала.

Эксфорд. Мне известно об этом, и это интересный факт. Если еще до начала бури частицы окажутся на полпути внутри магнитосферы, то им потребуется гораздо меньше времени, чтобы достичь зоны полярных сияний. В ряде магнитных бурь вполне могут быть такие «остаточные» частицы, и начальная фаза оказывается тогда довольно короткой.

Данжи. Возможно другое объяснение разности времен между начальной и главной фазами магнитной бури. Предположим, что поток плазмы, который в принципе может создать бурю, покидает Солнце. Как предположил Голд¹⁾, впереди этого потока идет ударная волна. Я полагаю, что начальная фаза создается именно этой ударной волной. Главная же фаза бури создается чем-то в газе с высоким давлением, и наилучшая возможность для этого — сильное южное межпланетное магнитное поле. Однако пока это все под вопросом.

Ньютоновское течение и форма магнитопаузы

Берд. Мне хотелось бы прокомментировать критику Эксфорда о результатах расчетов в ньютоновском приближении. Я полагаю, что многие вопросы, рассмотренные Эксфордом, решены правильно. Но если вокруг магнитопаузы имеется течение непрерывной среды, то основное отличие от ньютоновской модели (в которой частицы отражаются) сводится к различию давлений: вместо $2nmu^2 \cos^2 \psi$ (где ψ — угол между нормалью к магнитопаузе

¹⁾ По-видимому, имеется в виду высказывание Голда в [28*]. — *Прим. перев.*

и вектором скорости солнечного ветра) количество движения частиц, обмениваемое на поверхности, сводится к $\rho v^2 \cos^2 \psi$, поскольку вещество течет вокруг магнитосферы, а не отражается от нее. Поскольку в обоих приближениях остается множитель $\cos^2 \psi$, форма передней части оказывается такой же, как и у Эксфорда. Небольшая разница в давлении (не считая множителя 2) не имеет существенного значения, так как давление на поверхности обратно пропорционально шестой степени расстояния от Земли.

Поскольку поверхность магнитосферы в экваториальной плоскости заметно отличается от полусферы, то давление солнечного ветра оказывает существенный эффект при больших углах на «задней» (по отношению к Земле) стороне. В ньютоновском приближении встречаемая поверхность при угле Земля—Солнце—спутник 140° оказывается на расстоянии $\sim 20 R_\oplus$, если подсолнечная точка магнитосферы находится на расстоянии $10 R_\oplus$. Вычисленная форма магнитосферы согласуется с измеренной на «Эксплорере-10».

Разница между расчетами в ньютоновском приближении и в гидродинамическом возникает там, где давление солнечного ветра на поверхность исключительно мало. В этом случае давлением межпланетного магнитного поля нельзя пренебрегать ни в коем случае. Согласно гидродинамической теории, явления в переходной области определяют все, в том числе и замыкание «хвоста» магнитосферы. В ньютоновском приближении хвост является открытым цилиндром, что не согласуется с наблюдениями.

Поверхность магнитосферы близ фронта очень хорошо определяется в ньютоновском приближении. Это местоположение основного тока, и вы можете уверенно рассчитать возмущенное магнитное поле.

Петчек. Граница магнитосферы, согласно наблюдениям, не отличается сильно от расчетной формы. Однако в данных «Эксплорера-10» наблюдалось явление, которое резко расходилось с ньютоновским приближением. Дело в том, что измеренная напряженность магнитного поля составляла $\sim 15 \gamma$, тогда как напряженность дипольного поля равна $\sim 2 \gamma$. Если включить в полость все силовые линии, то напряженность магнитного поля оказалась бы меньше 2γ . Поэтому магнитное давление измеряемого поля больше примерно в 100 раз по сравнению с полем в ньютоновском приближении. Такое увеличение магнитного давления можно объяснить лишь предположением о существовании скалывающего напряжения вдоль границы, упомянутого Эксфордом. Я предполагаю, что магнитные силовые линии протыкают границу и тянутся назад.

Берд. Вы говорите о поле в переходном слое или о поле в магнитопаузе?

Петчек. Я имею в виду поле в магнитопаузе.

Несс. Это было вполне удовлетворительное изложение данных о напряженности магнитного поля. Однако вы не упомянули, что данные «ИМП-1» дают указание на существование аналогичной картины расширения полости.

Слутц. Следует учитывать не только поле диполя, но и поле, создаваемое электрическим током в магнитопаузе. Модельные расчеты показывают, что поле возмущения на передней части магнитосферы сравнимо с дипольным, а на ночной стороне оно очень велико по сравнению с дипольным полем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kellogg P. J., Nature, **183**, 1295 (1959).
2. Alfvén H., Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar, ser. 3, 1939.
3. Gold T., J. Geophys. Res., **64**, 1219 (1959); Astrophys. J., Suppl., **4**, 406 (1960); J. Phys. Soc. Japan, **17**, Suppl. A-1, 187 (1962).
4. Alfvén H., Fälthammar C.-G., Cosmical Electrodynamics, 2nd ed., Oxford Univ. Press, London, 1963, стр. 360. (Русский перевод: Г. Аль-

- вен, К.-Г. Фельтхаммар, Космическая электродинамика, 2-е изд., М., изд-во «Мир», 1967.)
5. Gold T., Proceedings of the Study Week on the Problem of Cosmic Rays in Interplanetary Space, Pontifical Acad. of Science, Vatican City, 1963, p. 431.
6. Öpik E. J., Irish Astron. J., **6**, 29 (1963).
7. Bell B., Smithsonian Contrib. to Astrophys., **5**, № 7, 69 (1961).
8. Bell B., Smithsonian Contrib. to Astrophys., **5**, № 12, 187 (1962)
9. Babcock H. W., Astrophys. J., **133**, 572 (1961).
10. Babcock H. D., Astrophys. J., **130**, 364 (1959).
11. Howard R., частное сообщение.
12. Lashinsky H., Phys. Rev. Letters, **12**, 121 (1964).
13. Рудаков Л. И., Сагдеев Р. З., Ядерный синтез, дополнение 1962, кн. 2, 1962, стр. 481.
14. Rosenbluth M. N., Krall N. A., Rostoker N., Ядерный синтез, дополнение 1962, кн. 1, 1962, стр. 143.
15. Taylor J. B., Phys. Fluids, **6**, 1529 (1963).
16. Kruskal M. D., Oberman C. R., Phys. Fluids, **1**, 275 (1958)
17. O'Brien B. J., J. Geophys. Res., **69**, 13 (1964).
18. O'Brien B. J., Taylor H., J. Geophys. Res., **69**, 45 (1964).
- 19*. Кадомцев Б. Б., Вопросы теории плазмы, вып. 2, М., Госатомиздат, 1963, стр. 132.
- 20*. Михайловский А. В., Вопросы теории плазмы, вып. 3, М., Госатомиздат, 1963, стр. 141.
- 21*. Cole K. D., Space Sci. Rev., **5**, № 6, 699 (1966).
- 22*. Akasofu S.-I., Space Sci. Rev., **6**, № 1, 21 (1966).
- 23*. Obayashi T., The interaction of solar plasma with geomagnetic field, Disturbed Condition, Report «The Inter-Union Symposium on Solar-terrestrial Physics», Belgrade, Aug. 29 — Sept. 3, 1966. (Русский перевод в сб. «Солнечно-земная физика», М., изд-во «Мир», 1968.)
- 24*. Piddington J. H., Space Sci. Rev., **3**, № 5/6, 724 (1964).
- 25*. Жулин И. А., Геофизика 1964, М., 1965, стр. 176
- 26*. Alfvén H., Danielson L., Fälthammar C.-G., Lindberg L., Proceeding of the Plasma Space Science Symposium, eds. C. C. Chang, S. S. Hugang, Amsterdam, 1965.
- 27*. Danielson L., Lindberg L., Arkiv för Fysik, **28**, Heft 1, 1 (1965).
- 28*. Gold T., Gasdynamics of cosmic clouds, eds. H. C. van de Hulst, J. M. Burgers, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1955, ch. 17, p. 103.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТОСФЕРЫ

Б. Ю. О. Сонцеруп

Топология магнитосферы

В отсутствие межпланетного магнитного поля поток солнечной плазмы ограничивает область силовых линий геомагнитного поля в виде замкнутой магнитосферы типа хорошо известной полости Чепмена — Ферраро. В присутствии межпланетного магнитного поля замкнутый характер магнитосферы в общем сохраняется¹⁾ В силу условия вмороженности солнечный ветер уносит в хвост любые геомагнитные силовые линии, проникающие в межпланетное пространство. В хвосте силовые линии с противоположными направлениями сближаются. Если имеется механизм пересоединения линий, то в итоге возникает геомагнитный хвост конечных размеров. Однако существует один тип открытой магнитосферы, т. е. такой конфигурации, в которой магнитные силовые линии полярных областей Земли вытягиваются в межпланетное пространство, причем эта конфигурация сохраняется даже в присутствии солнечного ветра. Ее можно получить, если межпланетное магнитное поле в окрестности магнитосферы антипараллельно по отношению к геомагнитному полю в экваториальной плоскости. Такая топология поля представлена на рис. 1, на котором показан результат наложения однородного антипараллельного поля на поле диполя. Геометрия подобного поля исследовалась Данжи [1], который рассмотрел общий характер течения плазмы, включая и обратное движение плазмы внутри магнитосферы. Эта модель топологически эквивалентна модели, рассмотренной Петчеком в гл. 18.

Магнитные данные «Эксплорера-12» [2] указывают на то, что межпланетные магнитные поля близ внешней границы магнитосферы часто имеют направление, соответствующее геометрии, рассмотренной Данжи, т. е. поле приблизительно перпендикулярно к плоскости эклиптики и антипараллельно геомагнитному полю. Вероятно, это локальный эффект, вызванный

¹⁾ Относительно замкнутости и разомкнутости магнитосферы см. [9*]. — *Прим. перев.*

взаимодействием солнечного ветра с магнитосферой, поскольку на больших расстояниях межпланетное поле обладает геометрией, обнаруженной «Маринером-2» [3]¹⁾. Однако для наших целей важно лишь направление межпланетного магнитного поля в непосредственной близости к магнитосфере.

Когда межпланетное поле антипараллельно геомагнитному полю в экваториальной плоскости, то магнитосфера может быть либо открытой, как предположил Данжи (см. рис. 1); либо

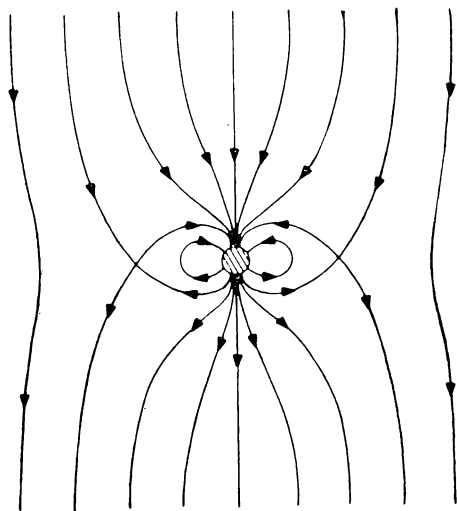


Рис. 1. Модель открытой магнитосферы, полученная наложением дипольного поля на однородное антипараллельное поле (модель магнитосферы Данжи).

замкнутой, как показано на рис. 2, *а*. В последнем случае имеется токовый слой на поверхности магнитосферы, изменяющий направление поля. Возникает следующий вопрос: реализуются ли обе геометрии в космическом пространстве?

Для ответа я исследовал линейную устойчивость замкнутой конфигурации в предположении стационарности межпланетной плазмы [4]; другими словами, скорость солнечного ветра принималась равной нулю. Такое заявление на конференции по солнечному ветру должно привести к замешательству. Однако я покажу, что полученные результаты применимы также и в случае не равной нулю скорости солнечного ветра. Я нашел, что токовый слой оказывается неустойчивым. Он стремится стать тоньше в одной из нейтральных областей и толще — в другой,

¹⁾ См. также гл. 3 и 6 и примечания переводчика к ним. — *Прим. ред.*

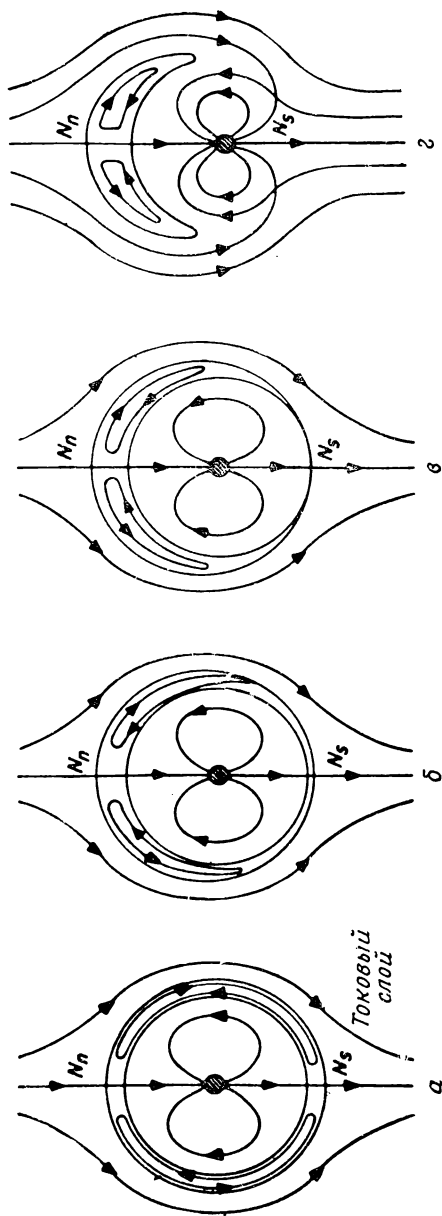


Рис. 2. Переход от замкнутой к открытой магнитосфере. Неустойчивость изменяет начальную конфигурацию *a* в конфигурацию *б*. Дальнейшее развитие этой неустойчивости представлено конфигурацией *в*, где токовый слой становится бесконечно тонким в точке N_s , и конфигурацией *г*, где магнитосфера начала открываться.

как это показано на рис. 2, б. Я считаю, что развитие неустойчивости проходит через стадии, показанные на рис. 2, в и г. Конечным результатом будет конфигурация, которая топологически эквивалентна геометрии поля Данжи. Токовый слой, который накапливается над одной из полярных областей, в реальном случае будет уноситься солнечным ветром.

Процессы, происходящие на радиально расширяющемся нейтральном кольце, можно описать как разрывы и последующие пересоединения магнитных силовых линий, при которых межпланетные силовые линии соединяются с геомагнитными. Кроме того, имеется симметричная форма неустойчивости, при которой

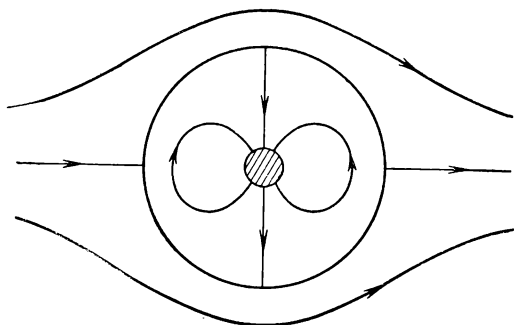


Рис. 3. Пример конфигурации магнитосферы, при которой неустойчивость не имеет места. Эта конфигурация может поддерживаться лишь при помощи солнечного ветра.

силовые линии срезаются около двух нейтральных колец (по одному над каждой полярной областью).

Этот вид неустойчивости в принципе возможен даже при наличии солнечного ветра, поскольку плазма ветра может обтекать магнитосферу при ее промежуточном (см. рис. 2, г) и конечном (см. рис. !) состояниях так, как это описано Данжи [1] и Петчеком в гл. 18. Таким образом, поток плазмы не обязательно приобретает замкнутую топологию. Кроме того, данные лабораторных экспериментов [5] также свидетельствуют в пользу конфигурации движения плазмы, предложенной Данжи, на что уже указывал Блок. Однако необходимо отметить, что неустойчивость может иметь место лишь в том случае, если нейтральные точки внешней поверхности токового слоя располагаются точно против нейтральных точек, находящихся на его внутренней поверхности. Если поток плазмы смещает внешнюю нейтральную точку, то неустойчивость сильно уменьшается. Например, неустойчивость не может иметь места для конфигурации,

представленной на рис. 3. С учетом измерения магнитного поля на «Эксплорере-12» разумно предположить, что иногда возникают такие условия, которые благоприятны для развития неустойчивости, и в результате может произойти переход от замкнутой к открытой форме магнитосферы.

Магнитная буря, главная фаза

Можно рассматривать главную фазу магнитной бури как результат перехода от замкнутой к открытой магнитосфере. Такой переход должен наблюдаться на поверхности Земли в виде

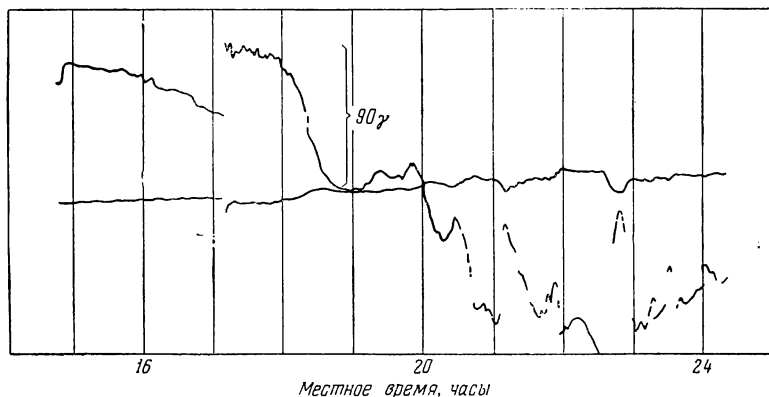


Рис. 4. Вариации горизонтальной составляющей магнитного поля в Сан-Хуане в период магнитной бури 30 сентября 1961 г.

глобального уменьшения горизонтальной составляющей геомагнитного поля. Это уменьшение должно составлять $\sim 50\text{—}100\gamma$; оно обусловлено токовым слоем. Характерное время перехода должно приблизительно равняться времени, необходимому для распространения альвеновской волны вдоль поверхности магнитосферы от одной нейтральной области до другой. Для концентрации протонов 30 см^{-3} , напряженности магнитного поля 40γ и характерного радиуса магнитосферы $10 R_{\oplus}$ время перехода равно 20 мин. Эти результаты довольно хорошо согласуются с величиной и характерным временем хорошо выраженного уменьшения горизонтальной составляющей в начале главной фазы магнитных бурь, подобно представленной на рис. 4.

После того как произошел указанный переход, новые порции солнечной плазмы проникают внутрь магнитосферы посредством механизма, описанного Данжи. В результате произойдет дальнейшее глобальное уменьшение горизонтальной составляющей

геомагнитного поля и усиление токовой системы DS . Таким образом, элементарные возмущения и главная фаза магнитной бури развиваются одновременно, что согласуется с наблюдениями [6]. Другой возможный эффект, вызванный частичным замыканием контура на ионосферу и нейтральное кольцо, состоит в том, что полярные силовые линии, простирающиеся в межпланетное пространство, будут выметаться на ночную сторону. Как предположил Пиддингтон, главная фаза может быть целиком создана тем, что магнитные силовые линии уносятся с дневной стороны магнитосферы¹⁾, но встретились трудности при попытке объяснить, как полярные силовые линии соединяются с проходящим облаком солнечной плазмы [7]. Рассмотренная здесь неустойчивость может объяснить этот процесс.

Если главную фазу магнитной бури интерпретировать как изменения топологии магнитосферы, то следует предположить, что в обычных условиях магнитосфера замкнута. Однако механизм, посредством которого магнитосфера возвращается после магнитной бури из открытого состояния в закрытое, еще неясен.

Этот переход требует, чтобы межпланетные магнитные поля имели специфическое направление и чтобы около нейтральных точек также преобладали специфические условия. Требование этих условий может объяснить тот факт, почему продолжительность начальной фазы магнитной бури может изменяться в широких пределах и почему некоторые магнитные бури не имеют главной фазы [8]. При создании теории магнитных бурь очень важно иметь в виду наличие довольно существенных различий в характере протекания отдельных бурь. Предложенное здесь объяснение пригодно лишь для магнитных бурь с быстро развивающимся и четко выраженным началом главной фазы. В буре с медленным и слабо выраженным переходом от начальной фазы к главной межпланетная плазма может проникнуть внутрь магнитосферы за счет какого-либо другого механизма.

Открытая и замкнутая модели магнитосферы отличаются характером обращения поля на поверхности магнитосферы. Замкнутая геометрия поля имеет внутри обращаемого поля токового слоя нейтральную точку типа O , тогда как для открытой магнитосферы характерно наличие нейтральной точки типа X . Эти точки должны располагаться около геомагнитной экваториальной плоскости, если сразу за магнитопаузой межпланетное поле противоположно геомагнитному. Знак поворота

¹⁾ Следует упомянуть работу Беханнона и Несса о связи увеличения напряженности магнитного поля в хвосте с уменьшением горизонтальной составляющей магнитного поля на Земле в период магнитных бурь, наблюдавшихся на спутнике «ИМП-1» [10*]. — *Прим. перев.*

вектора магнитного поля можно выявить по наблюдениям со спутника, пересекающего границу магнитосферы выше или ниже нейтральной точки. Таким образом, мы сможем различить нейтральные точки типа X и O . Переход от точки O к X будет указывать на наличие перехода ранее рассмотренного характера. Опубликованные Кэхиллом и Эмазином [2] данные магнитных измерений на «Эксплорере-12» совместимы с предположением о наличии нейтральной точки типа O . Но прежде чем сделать окончательный вывод, необходим более детальный анализ спутниковых магнитограмм. Такое исследование будет выполнено в сотрудничестве с Кэхиллом. В частности, будут исследованы условия на магнитопаузе в период магнитной бури, представленной на рис. 4¹⁾.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dungey J. W., Phys. Rev. Letters, **6**, 47 (1961).
2. Cahill L. J., Amaseen P. G., J. Geophys. Res., **68**, 1835 (1963).
3. Coleman P. J., Davis L., Smith E. J., Sonett C. P., Science, **138**, 1099 (1962).
4. Sonnerup B. U. Ö., J. Geophys. Res., **70**, № 5, 1051 (1965).
5. Danielsson L., Lindberg L., Arkiv för Fysik, **28**, Heft 1, 1 (1965).
6. Akasofu S.-I., Chapman S., J. Geophys. Res., **68**, 3155 (1963).
7. Piddington J. H., J. Geophys. Res., **65**, 93 (1960).
8. Akasofu S.-I., Chapman S., J. Geophys. Res., **68**, 125 (1963).
- 9*. Alfvén H., Space Sci. Rev., **2**, № 6, 862 (1963).
- 10*. Беханнон К. У., Несс Н. Ф. Геомагнетизм и аэронавтика, **6**, № 3, 430 (1966).
- 11*. Sonnerup B. U. Ö., Cahill L. I., J. Geophys. Res., **72**, № 1, 171 (1967).

¹⁾ Результаты этих исследований опубликованы в [11*]. — Прим. перев.

Г л а в а 20

ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ, ЗАХВАЧЕННЫХ В МАГНИТОСФЕРУ¹⁾

Э. У. Хоунз

Введение

Чтобы исследовать движение частиц внутри магнитосферы, была подготовлена специальная программа для вычислительной машины. Она позволяла рассчитать дрейф частиц под влиянием четырех существенных факторов: 1) градиента магнитного поля; 2) кривизны магнитных силовых линий; 3) электрического поля вращения — того поля, которое заставляет плазму вращаться вместе с Землей; 4) поперечного электрического поля в хвосте магнитосферы, рассмотренного Эксфордом [1]. Первое применение этой программы сводилось к изучению движения частиц, которые инжектируются внутрь магнитосферы и отражаются вблизи магнитных силовых линий, проходящих около нейтральных точек с дневной стороны магнитосферы. Исследование этого движения было предпринято с целью проанализировать утреннюю часть спирали распределения магнитной активности и поглощения радиоволн, описаниям которой посвящен ряд работ (например, [2]). Мы поставили задачу выяснить, не может ли это спиральное распределение означать: а) вторжение плазмы солнечного ветра через переднюю часть магнитосферы и б) высыпание плазмы вдоль траектории, определяемой электромагнитными полями внутри магнитосферы [3]²⁾. Огути также рассмотрел возможность существования авроральных потоков, проникающих внутрь магнитосферы через нейтральные точки [4].

Предполагаемые магнитные и электрические поля

На рис. 1 представлена использованная в работе модель магнитосферы. Заметьте, что магнитные силовые линии

¹⁾ См. гл. 17 и примечание переводчика к ней, а также дискуссии к гл. 16—18. — *Прим. перев.*

²⁾ Отметим, что в этой области проводятся довольно интенсивные исследования; см., в частности, [10*—13*]. — *Прим. перев.*

нейтральной точки пересекают поверхность Земли в 10° от полюса. У магнитных силовых линий указаны значения кошироты, в которой эти линии пересекают Землю¹⁾.

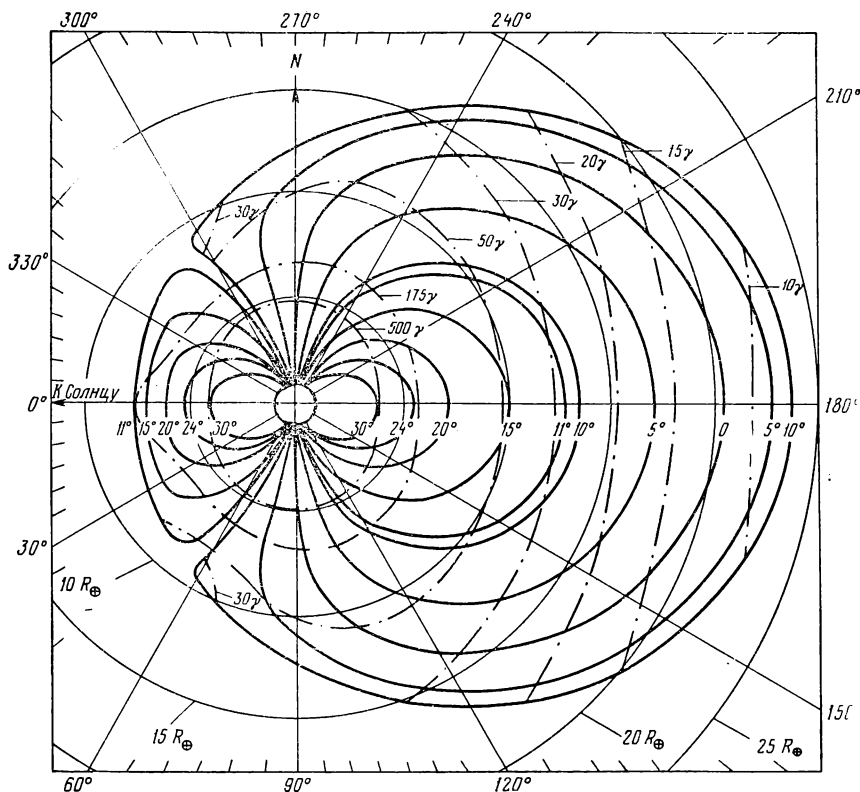


Рис. 1. Проекция модели магнитосферы на плоскость, проходящую через полуденный и полуночный меридианы [3].

На магнитных силовых линиях проставлены полярные углы точек их пересечения с Землей. Штрих-пунктирные линии — линии постоянной напряженности магнитного поля.

Для моделирования электрического поля, постулированного Эсфордом [1], было выбрано однородное электрическое поле поперек хвоста магнитосферы с напряженностью 3 мкВ/см , что эквивалентно разности потенциалов поперек магнитосферы $\sim 20 \text{ кВ}$. (Это поле не точно воспроизводит поле Эсфорда,

¹⁾ Коширота — дополнение широты до 90° . — Прим. ред.

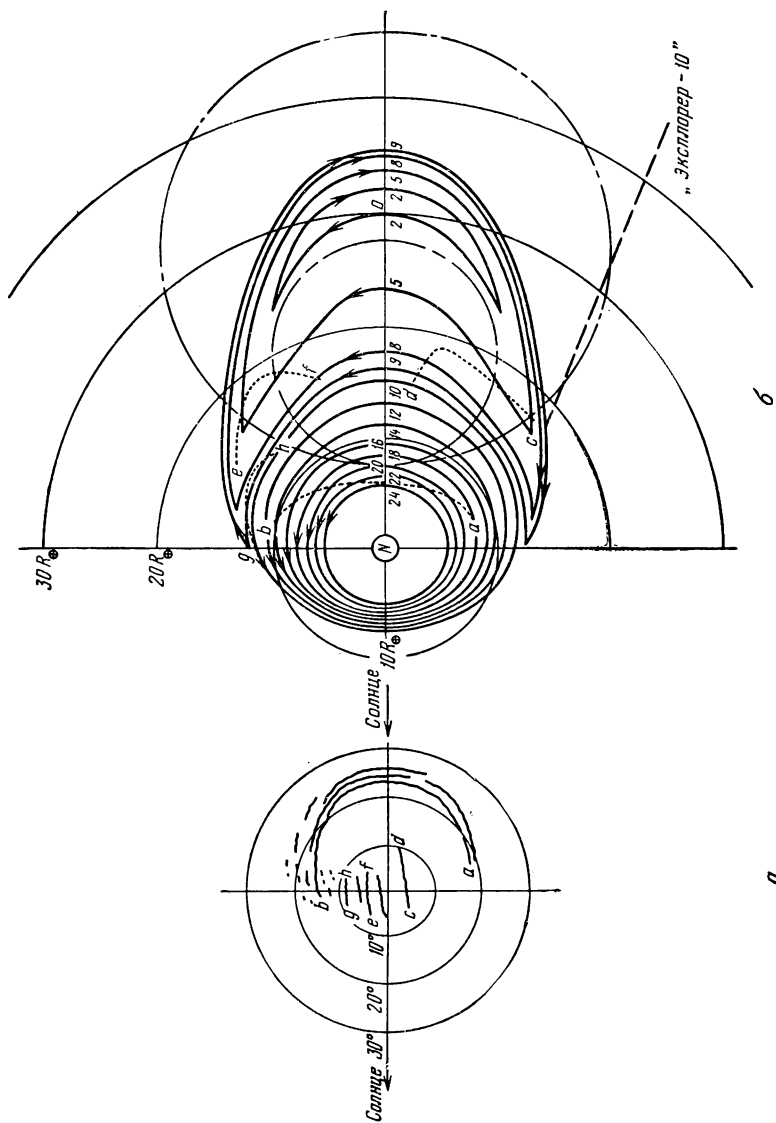


Рис. 2. *a* — распределение полярных сияний [5]; *б* — то же в проекции на экваториальную плоскость влодь магнитных силовых линий. Соответствующие точки обозначены одинаковыми буквами. Вид с северного полюса.

поскольку в его модели магнитные силовые линии являются эквипотенциальными.) Кроме того, мы пренебрегли составляющей электрического поля, параллельной магнитным силовым линиям; при расчетах движения частиц рассматривалась лишь перпендикулярная составляющая.

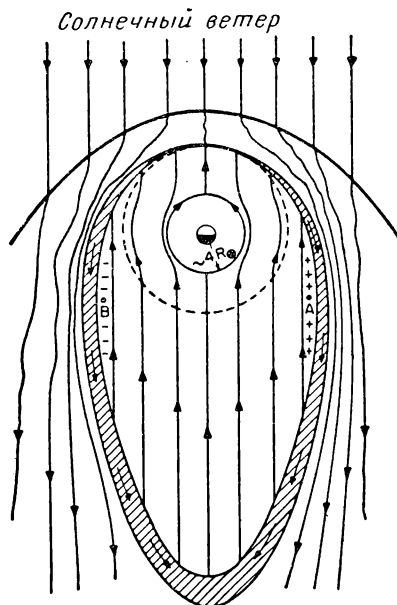


Рис. 3. Схема экваториального сечения магнитосферы Земли, если смотреть из точки над северным полюсом [1].

Показаны внешние линии тока солнечного ветра. Внутренние линии тока представляют циркуляционное движение, по-видимому создаваемое за счет вязкого взаимодействия солнечного ветра с поверхностью магнитосферы. Они также являются эквипотенциалами электрических полей, создаваемых за счет накопления положительных (A) и отрицательных (B) зарядов.

Рис. 2 поясняет предположение о наличии электрического поля поперек хвоста магнитосферы. Левая половина этого рисунка представляет собой схему полярных сияний, опубликованную Акасофу [5]. Видно, что спокойные дуги не вытягиваются вдоль линий постоянной магнитной широты, но проходят значительно южнее около полуночи. Проекция этих структур на экваториальную плоскость (правая половина рис. 2) показывает наличие эффекта выталкивания вперед для кривой *ab* и дуг *cd* и *ef*, которые проходят над полярной шапкой. Этот эффект сви-

детельствует о том, что существует поперечное электрическое поле, которое проталкивает частицы через хвост магнитосферы.

На рис. 3 показана схема Эксфорда [1]. Имеется положительный пространственный заряд в области *A* и отрицательный пространственный заряд в области *B*, которые создают поперечное электрическое поле. Внутренние линии тока располагаются на эквипотенциальных поверхностях этого электрического поля.

Полярные сияния и другие геофизические явления ¹⁾

На рис. 4, взятом из [2], приведена антарктическая полярная шапка; *ω* — период равноденствий, *a* и *б* — лето и зима соответственно. Сплошная линия в каждом случае определяет положение максимума магнитной возмущенности, а штриховая — положение максимума поглощения радиоволн ²⁾. Поразительно, что утренняя спираль как будто начинается на широте $\sim 80^\circ$, очень близко к полуденному меридиану. На следующих рисунках показаны некоторые интересные особенности полярных сияний.

На рис. 5 представлено место максимальной вероятности появления в зените полярных сияний в зависимости от геомагнитной кошироты и геомагнитного времени [6]. Получается также спиральное распределение (на вечерней стороне), начинающееся на высокой широте около полудня и спускающееся до магнитной кошироты порядка 25° около полуночи.

На рис. 6 представлено изменение частоты появления видимых полярных сияний в зависимости от местного времени в Элсворте [6]. Важной особенностью является более раннее появление свечения в линии $H\alpha$; оно появляется за 2 час до более ярких форм. Возможно, появление последних можно связать с высыпанием электронов, тогда как излучение в линии $H\alpha$ создается атомами водорода высокой энергии, образующимися в результате зарядообменных реакций захваченных протонов с нейтральными частицами атмосферы. Несколько наблюдателей сообщали, что появление по вечерам спокойной и довольно широкой полосы излучения $H\alpha$ является типичным. Большинство наблюдателей также регистрируют яркие дуги полярных сияний. Часто имеет место разделение: яркие дуги расположены к северу от более диффузного свечения $H\alpha$. После полуночи картина заметно смазывается, формы перепутываются, а излучение

¹⁾ Обширные исследования в этой области сделаны советскими исследователями, в частности Я. И. Фельдштейном и др. [14*]. — *Прим. перев.*

²⁾ То есть времена наступления максимумов магнитной возмущенности и частоты появления поглощений радиоволн характеризуются спиральным распределением. — *Прим. ред.*

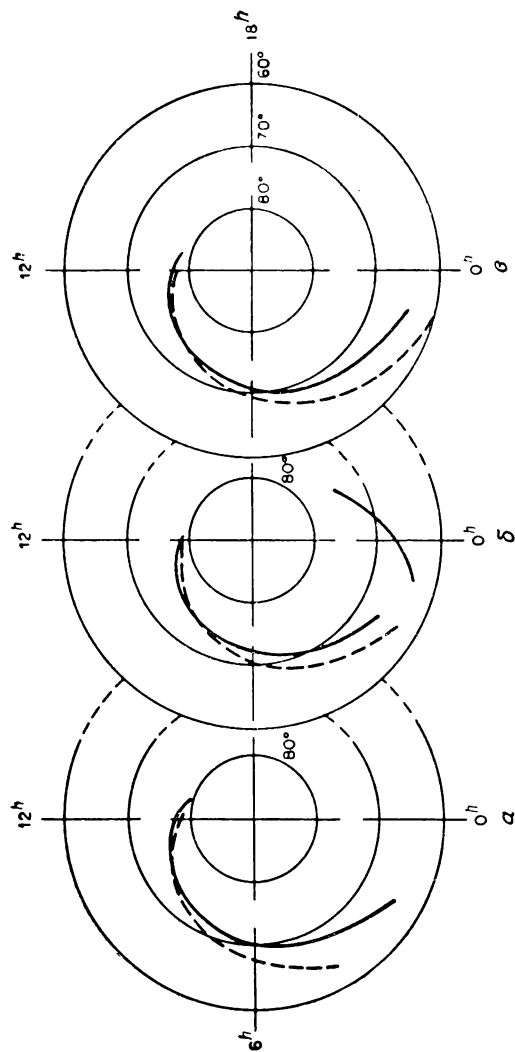


Рис 4. Антарктическое распределение максимума магнитной возмущенности (сплошная кривая) и максимума блэкаутов (штриховая кривая) [2].
а — лето, б — зима, в — весна или осень.

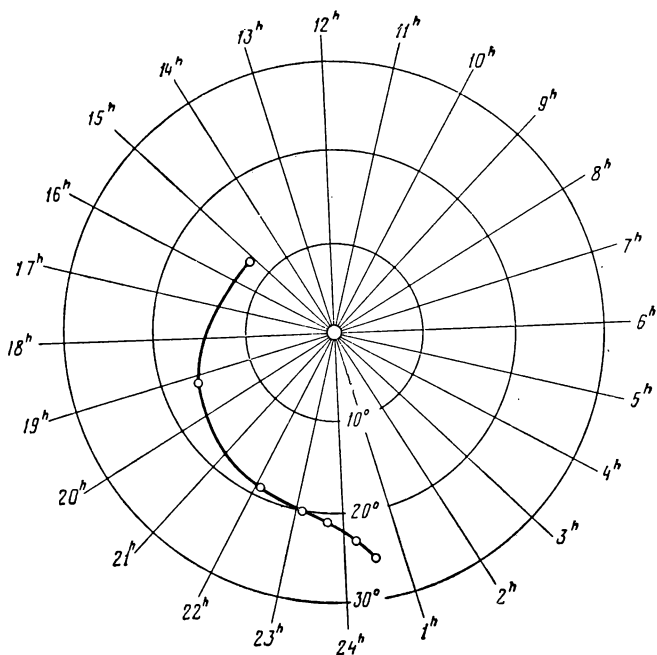


Рис. 5. Максимальная вероятность появления полярных сияний в зените. В качестве координат используются коширота и геомагнитное время [6].

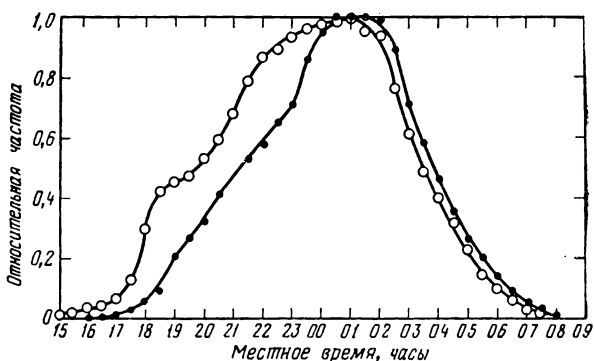


Рис. 6. Суточное изменение относительной частоты появления всех видимых полярных сияний в Эллсворте [6]. Точки — визуальные наблюдения, кружки — наблюдения в Na.

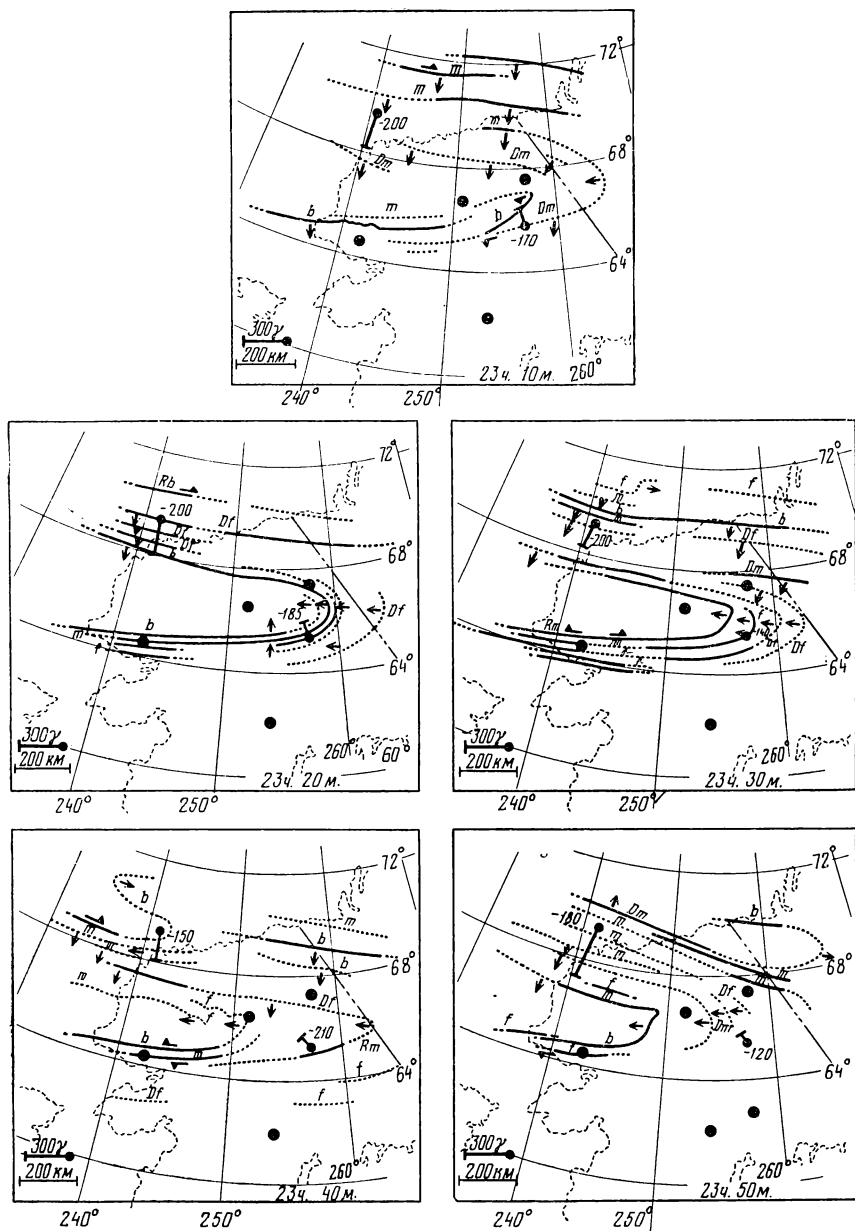


Рис. 7. Синоптические карты, представляющие полярные сияния 13—14 февраля 1958 г. через 10-минутные интервалы [7].

в линии $H\alpha$ иногда исчезает. Но для нас особенно важно раннее появление излучения $H\alpha$ в вечернее время.

На рис. 7, взятом из статьи Дэвиса [7], показана схема полярных сияний над Аляской сразу после полуночи. Распределение является довольно своеобразным: сияние состоит из дуг,

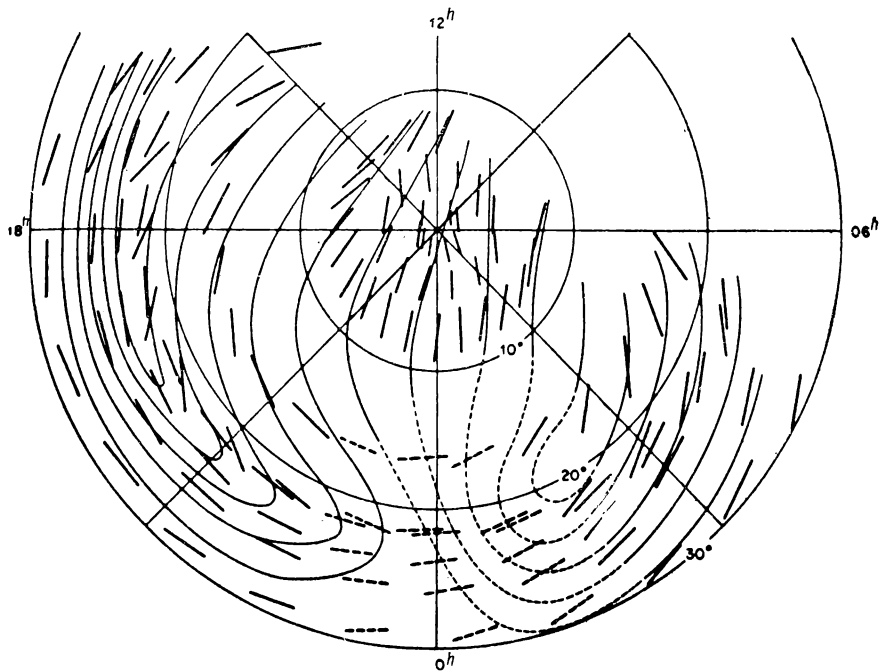


Рис. 8. Ориентация полярных сияний; в качестве систем координат выбрано дополнение геомагнитной широты и приближенное геомагнитное время. Сплошные кривые показывают среднюю ориентацию полярных сияний. Пунктирные линии представляют прерывистые ослабевающие полярные сияния [7].

открытых в западном направлении и обусловленных высыпанием электронов. Ширина дуги по геомагнитной широте составляет $3-4^\circ$. Вся картина имеет тенденцию перемещаться к западу. Внутри дуг движение деталей сияния происходит по часовой стрелке.

На рис. 8 (из [7]) приведена общая схема ориентации форм полярных сияний над всей полярной областью. Нас особенно интересует картина в пределах 10° от полюса. Полярные сияния наблюдаются там значительно реже, но когда они видны, то очень часто имеют характерную ориентацию вдоль прямой Земля — Солнце.

Результаты расчетов

Рассмотрим рассчитанное движение протонов, первоначально отражающихся вдоль магнитной силовой линии 13° , расположенной несколько южнее нейтральной линии, проходящей через нейтральную точку (см. рис. 1), а также движение протонов, начинающееся на силовой линии 8° , расположенной несколько севернее нейтральной линии. Все траектории начинаются в плоскости полуденного меридиана.

Программа позволяла рассчитывать последовательное положение точек отражения (высот h , км), точки экваториального пересечения, время отражения, полное время, начиная с момента инжекции (t , сек), и кинетическую энергию частицы в момент ее отражения (F , эв). Кроме того, все магнитные силовые линии, проходящие через точку отражения, вычерчивались до пересечения с поверхностью Земли.

Результаты расчетов приведены на рис. 9—11, на каждом из которых дается: а) проекция траектории частицы вдоль магнитных силовых линий на северную полярную область и б) положение последовательных точек пересечения частиц с плоскостью экватора.

На рис. 9 представлены данные для протонов с энергиями от 300 эв до 1 Мэв, инжектированных на силовой линии 13° на высоте $\sim 1R_\oplus$. Этим протонам требуется 206 сек для достижения полуночной области; при этом их энергия увеличивается на 15 кэв, а точка отражения несколько понижается. Сравнение проекции траектории на плоскость экватора с более ранними неопубликованными расчетами оболочек интегральных инвариантов по этой же модели магнитосферы показывает, как и следовало ожидать, что траектории отражающихся на малых высотах частиц с энергией 1 Мэв очень близки к таким оболочкам.

Рассмотрим протон с энергией 7 кэв. Для него характерно быстрое понижение высоты отражения и увеличение энергии. Его энергия увеличилась до 10 кэв в течение 24 000 сек, а точка отражения понизилась примерно на 1000 км. Через 51 000 сек энергия протона равна 22 кэв, а отражение происходит на высоте 2500 км. Траектория, энергия и высота отражения для протона с энергией 5 кэв еще сильнее подвержены воздействию электромагнитного поля. Протоны еще более низких энергий, например с энергией 1 кэв, переносятся в восточном направлении электрическим полем вращения. Когда частицы достигают области хвоста, то у них растет энергия за счет поперечного электрического поля до тех пор, пока они в конце концов не повернут обратно и не направятся на запад, продолжая наращивать энергию.

Сплошная и штриховая линии (взятые из рис. 4, в) в левой части рисунка нанесены для иллюстрации сходства между этими наблюдаемыми утренними спиралями и вычисленной схемой возможного выпадения протонов с энергией в несколько кэв, вторгающихся с лобовой части магнитосферы. Если наблюдаемые

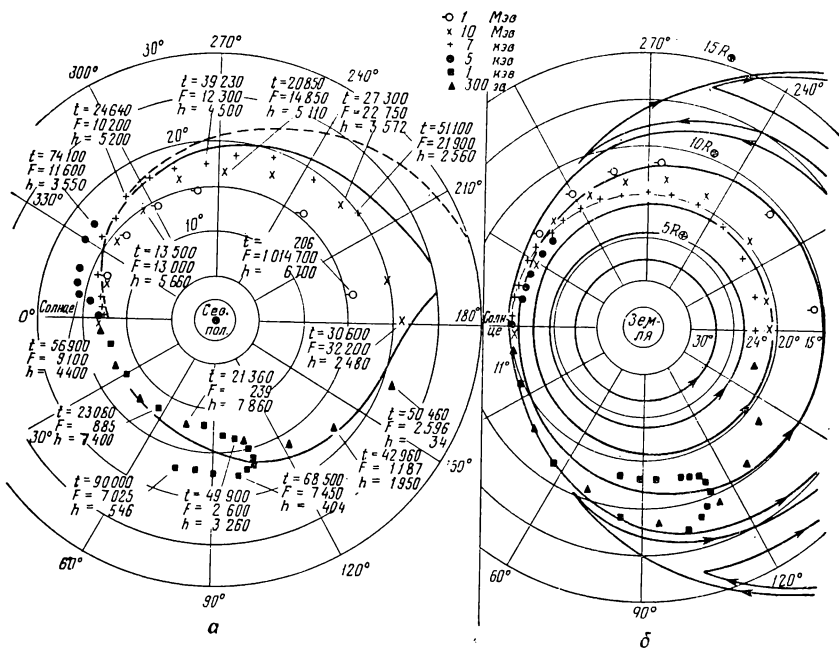


Рис. 9. Параметры орбит различных частиц.

a — проекция вдоль силовых линий на северную полярную шапку и *b* — проекция на экваториальную плоскость. Расчеты выполнены для протонов, первоначально отражающихся на линии 13° на высоте ~ 6800 км. Энергии частиц обозначены различными символами. Около точек указаны: t — время с момента инжекции в сек; F — энергия в эв и h — высота отражения в км.

с утренней стороны спирали действительно связаны с вторгающимися протонами, как это подразумевалось выше, то это служит доказательством совместного вращения плазмы, поскольку в расчетах вращающееся геомагнитное поле вызывает начальное резкое движение к более низким широтам.

На рис. 10 представлены результаты для протонов малой энергии, начинающих свое движение на силовой линии 13° , но при высоте вторжения, меняющейся от 1 до $2R_\oplus$. Траектория протона с энергией ~ 1 кэв такая же, как и на предыдущем рисунке. Этот рисунок иллюстрирует историю протонов малой

энергии (< 5 кэв), которые первоначально уносятся на восток полем совместного вращения. Входя в поперечное электрическое поле, протоны увеличивают свою энергию, а поскольку скорость их магнитного дрейфа пропорциональна кинетической энергии, они в конце концов могут повернуть обратно. Общий

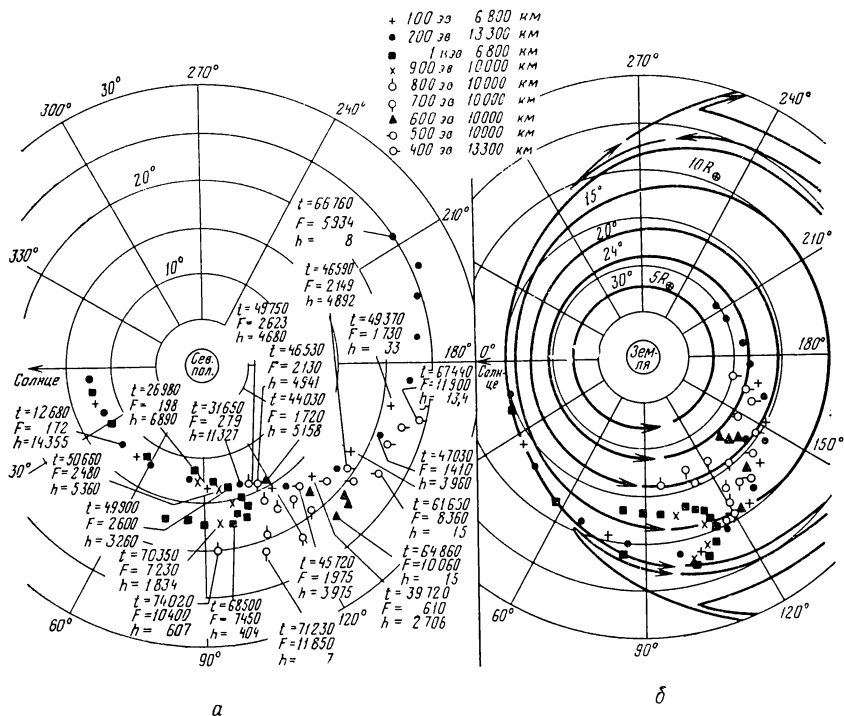


Рис. 10. Параметры орбит различных частиц. а — проекция вдоль силовых линий на северную полярную шапку, б — проекция на экваториальную плоскость.

Расчеты выполнены для протонов с различными энергиями, первоначально отражающихся на разных высотах на линии 13° . Различные энергии обозначены разными символами. Около точек указаны: t — время с момента инжекции в сек; F — энергия в эв и h — высота отражения в км.

эффект сводится к тому, что они образуют широкую область возможного выпадения протонов. Эта широкая область напоминает распределение излучения Na на вечерней стороне. На станциях, приближающихся к вечерней стороне, первое регистрируемое излучение обусловлено протонами, которые опускаются вниз, нейтрализуются и выпадают. В более поздние ве-

черные часы наблюдаются дуги, обусловленные электронами. Существенно, что траектории протонов проецируются на полярную шапку в виде открытых с западной стороны петель, хотя не вполне ясно, как это связано с петлями высыпающихся электронов, о которых сообщал Дэвис.

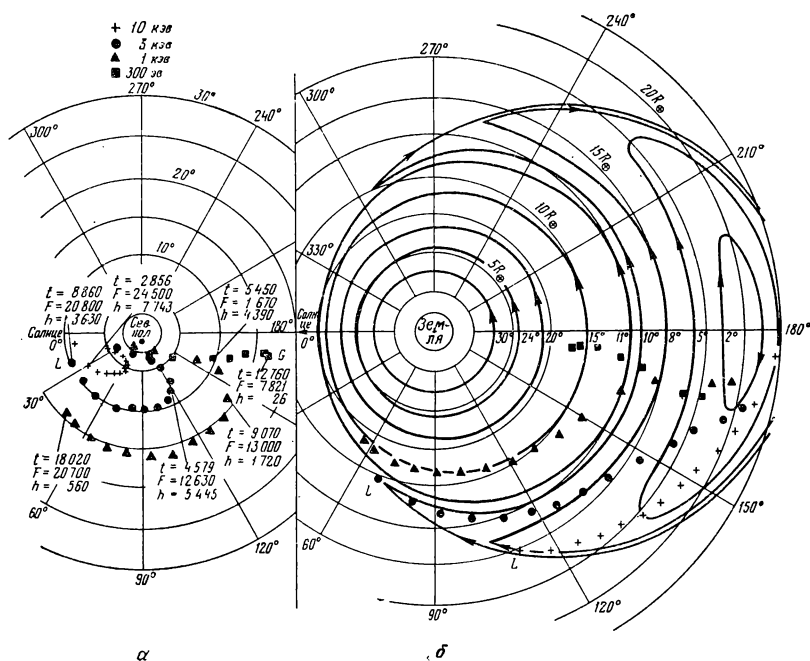


Рис. 11. Параметры орбит различных частиц. *a* — проекция вдоль силовых линий на северную полярную шапку, *b* — проекция на экваториальную плоскость. Расчеты выполнены для протонов различных энергий, первоначально отражающихся на линии 8° на высоте 12 500 км. Около точек указаны: *t* — время с момента инжекции в сек; *F* — энергия в эв и *h* — высота отражения в км.

На рис. 11 показаны траектории частиц, начинающих свое движение с различными энергиями на высоте 12 500 км с линии 8°, т. е. сразу к северу от нейтральной точки. Протон с энергией 10 кэв движется по траектории, которая покидает магнитосферу в точке *L*. Частицы меньших энергий проходят близко к полюсу. Весьма интересен факт, что частицы малых энергий имеют почти прямолинейные траектории. Протоны с энергией 300 эв высыпаются в точке *G*, тогда как прогоны высокой энергии возвращаются обратно и образуют на очень высоких широтах направленную к западу систему. Эти формы напоминают

высокоширотные дуги высыпания *электронов*, о которых сообщал Дэвис [7].

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что частицы солнечного ветра могут проникать внутрь магнитосферы через переднюю ее часть, возможно, вблизи нейтральных точек. Плазма магнитосферы вращается вместе с Землей даже на больших расстояниях, и это вращение обуславливает более широкое распределение излучения $H\alpha$, наблюдаемого южнее вечерних дуг полярных сияний. Наконец, утренняя и вечерняя схемы высыпания частиц, представляющие собой спирали, которые начинаются в высоких широтах около полуденного меридиана и заканчиваются на низких широтах около полуночи, показывают, что потоки частиц движутся с дневной стороны Земли на ночную сторону, а не иным путем. Когда частицы при движении понижают свою широту, они увеличивают энергию и опускаются, а поэтому могут выпадать в атмосферу. Если бы частицы двигались с ночной стороны Земли на дневную (т. е. с низких широт к более высоким), то в этом случае они теряли бы энергию, высоты точек отражения увеличивались бы и частицы не могли бы выпадать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Axford W. I., Planet. Space Sci., **12**, 45 (1964).
2. Юдович Л. А., Геомагнетизм и аэрономия, **3**, № 3, 520 (1963).
3. Hones E. W., J. Geophys. Res., **68**, 1209 (1963).
4. Oguti T., Rep. Ionosphere and Space Res. Japan, **16**, 363 (1962).
5. Akasofu S.-I., Planet. Space Sci., **12**, 273 (1964).
6. Malville J. M., J. Geophys. Res., **64**, 1389 (1959).
7. Davis T. N., J. Geophys. Res., **67**, 75 (1962).
- 8*. Van Allen J. A., Radiation trapped in the earth's magnetic field, ed. B. M. McCormac, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 1966, p. 65.
- 9*. O'Brien B. J., Interrelations of energetic charged particles in the magnetosphere, Report «The Inter-Union Symposium on Solar-terrestrial Physics», Belgrade, Aug. 29 — Sept. 3, 1965. (Русский перевод в сб. «Солнечно-земная физика», М., изд-во «Мир», 1968.)
- 10*. Hones E. W., Bergeson J. E., J. Geophys. Res., **70**, № 19, 4951 (1965).
- 11*. Taylor H., Hones E. W., J. Geophys. Res., **70**, № 15, 3605 (1965).
- 12*. Hones E. W., J. Geophys. Res., **71**, № 21, 5186 (1966).
- 13*. Hones E. W., J. Geomagn. Geoelectr., **18**, № 2, 133 (1966).
- 14*. Фельдштейн Я. И., Старков Г. В., Planet. Space Sci., **15**, № 2, 209 (1967).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА ХОУНЗА

Мид. Сохраняются ли при ваших расчетах оба первых адиабатических инварианта?

Хоунз. Я предполагаю, что μ сохраняется. Меня не очень волнует второй инвариант I , хотя я его рассчитываю для каждого колебания. При расчете траектории используется приближение ведущего центра; кроме того, бе-

рется довольно грубое приближение для получения части электрического поля, связанного с вращением. Далее, магнитные силовые линии не считаются электрическими эквипотенциалами, поскольку я предполагаю существование однородного поперечного электрического поля. Оба допущения дают вклад в изменение I . Таким образом, когда частицы входят в электрическое поле, I увеличивается; если же пренебречь электрическими полями, то, конечно, I остается постоянным.

Мид. Но вы считаете, что I все же изменяется, даже если время этого изменения может быть короче промежутка времени между двумя отражениями?

Хоунз. Данджи указал, что при электрическом поле, всюду перпендикулярном к магнитным силовым линиям, не следует ожидать никакого изменения I . Я допускаю, что мое электрическое поле лишь аппроксимирует консервативное поле, и потому полагаю, что Данджи прав.

Голд. Мне кажется, что совершенно не обосновано проведение численных расчетов без специального учета величин, которые сохраняются с высокой степенью точности. Вы можете свободно вести расчет до того места, где эти величины уже не будут сохраняться из-за накопления ошибок. Видимо, некоторые орбиты лучше аппроксимировать просто на основе того, что сохраняется второй инвариант. Аналогичный принцип можно применить к расчету, например, орбиты Земли. После нескольких сот оборотов вокруг Солнца по орбите у вас появятся другие астрономические единицы измерения ввиду накопления ошибок.

Хоунз. Контрольные вычисления показали, что наши численные расчеты достаточно хорошо сходятся для рассматриваемых мною расстояний. При расчете траектории частицы без учета каких-либо электрических полей второй инвариант остается постоянным в течение сотен колебаний. За этот период частица успевает совершить дрейф на пол-оборота или больше вокруг Земли.

Данджи. В описанной модели имеется одно противоречие: берется однородное электрическое поле, а затем исключается часть его, параллельная магнитному полю. В итоге электрическое поле становится вихревым, и следует включить соответствующее $\partial \mathbf{B} / \partial t$. По-видимому, это также окажет влияние на продольный инвариант.

Хоунз. Я полагаю, что единственный эффект использования более реалистичной модели поля будет состоять в том, что это даст несколько иное значение прироста энергии.

Данджи. Меня не удивит, если изменится продольный инвариант при поле, которое вы используете.

Хоунз. Когда я включаю электрическое поле, то я могу увидеть изменение в I . Меня не удивляет, что I изменяется как с неконсервативным электрическим полем в хвосте, так и с полем вращения. Но поскольку I для частиц высокой энергии не меняется, то это меня вполне удовлетворяет.

ИЗМЕРЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА «ЭКСПЛОРЕРЕ-18»

Е. Ф. Лайон

Общий характер плазменного эксперимента на «Эксплорере-18» хорошо известен. Я хочу описать наиболее характерные из полученных данных и представить некоторые выводы¹⁾. Работа выполнена Бриджем, Эджиди и мной совместно с рядом других сотрудников Массачусетского технологического института и Линкольновской лаборатории этого института.

Аппаратура

Схема плазменного зонда представлена на рис. 1. Аналогичная ионная ловушка была установлена на «Эксплорере-10»²⁾. В фарадеевском цилиндре диаметром 15 см размещены четыре сетки, а сзади два коллектора, которые связаны с предварительными усилителями, фильтрами, преобразователями, устройствами для логарифмического сжатия сигнала, а также соединены с телеметрической системой.

Основной особенностью этой ловушки является модуляционная сетка, на которую подается переменное напряжение прямоугольной формы с частотой 1 кГц. Это напряжение изменяется между двумя положительными значениями V_1 и V_2 для модуляции протонов и между двумя отрицательными для модуляции электронов. Когда модуляционная сетка находится под напряжением V_1 , то через нее могут пройти и достигнуть коллектора протоны с энергией, превышающей eV_1 . Когда эта сетка находится под напряжением V_2 , то коллектора достигают лишь протоны с энергией, превышающей eV_2 . Таким образом, протоны в интервале энергии eV_1 и eV_2 «колеблются» с частотой 1 кГц,

¹⁾ Укажем, что данные и выводы настоящей работы согласуются с многими данными электростатического анализатора, установленного также на «Эксплорере-18» [6*]. Кроме того, плазменные измерения, производимые на спутниках типа «Вела», также в общем подтверждают правильность результатов «Эксплорера-18» [7*]. — *Прим. перев.*

²⁾ См. гл. 8. Подобные же ловушки были установлены на ряде советских космических аппаратов, в частности на «Зонде-2» [3*]. — *Прим. ред.*

и переменная составляющая тока будет представлять лишь протоны с энергиями от eV_1 до eV_2 .

В принципе электроны плазмы высокой энергии, а также первичные и вторичные фотоэлектроны, которые достигают коллекторов, генерируют постоянный ток и не создают никакого общего сигнала. Выходная сетка находится под потенциалом -36 в и отражает электроны с энергией, меньшей 36 эв. Теоретически электроны с энергиями, достаточно большими для

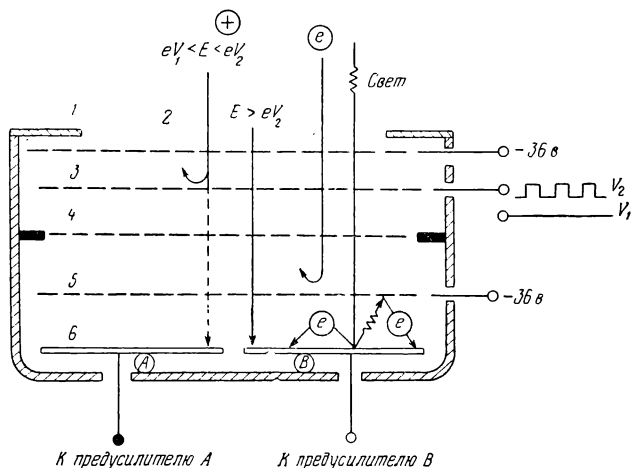


Рис. 1. Схема плазменного зонда, установленного на спутнике «ИМП-1» («Эксплорер-18»).

1 — ограничитель апертуры; 2 — входная сетка; 3 — модулирующая сетка; 4 — экранирующая сетка; 5 — сетка для подавления фотоэлектронов; 6 — коллекторы.

проникновения через входную сетку, всегда проходят через положительный потенциал модуляционной сетки, поскольку они ускоряются при достижении ее и начинают тормозиться только после ее прохождения. Однако существует слабая модуляция электронов модуляционной сеткой — ложный эффект, который не учитывался при конструировании прибора. Эта модуляция обусловлена двумя эффектами: а) положительное напряжение модуляционной сетки смещает траекторию частицы к центру цилиндра с последующим отклонением траектории электрона; б) некоторые электроны ударяются о проволочки сетки, что приводит к своеобразной модуляции электронов, которая частично зависит от напряжения. Эти два ложных электронных эффекта создают в коллекторе переменные токи противоположного

направления, так что общая модуляция электронов оказывается весьма слабой.

По-видимому, модуляции электронов с энергиями меньше 36 эв не наблюдается, а для электронов очень высоких энергий модуляция малозффективна. В лабораторных условиях модуляция электронов с промежуточными значениями энергии оказывается на три порядка меньше модуляции положительных ионов. Мы считаем, что модуляцией электронов можно пренебречь, и полагаем, что в переходной области мы наблюдаем лишь очень горячие протоны.

Приведем несколько цифр: диаметр переднего отверстия зонда ~ 11 см, фактическая апертура 97 см^2 , угол приема грубо конический относительно оси симметрии; максимальный полураствор 67° , а телесный угол приема ~ 1 стер. Полная чувствительность прибора составляет $\sim 6 \cdot 10^6 \text{ частиц/см}^2 \cdot \text{сек}$.

Последовательность и расписание измерений

На рис. 2 показано, в какой последовательности передается информация различных энергетических интервалов (каналов). Имеется пять протонных каналов и один электронный. Основной цикл измерений спутника делится на четыре серии с номинальной продолжительностью 80 сек каждая (точное значение равно 81,9144 сек). Наши шесть измерений размещены в первых трех сериях.

В первом нашем измерении, которое мы назовем каналом 1, модулирующее напряжение изменяется от 45 до 105 в. Это измерение протонов длится в течение ~ 5 сек. За ним почти сразу же следует канал 2 — другое измерение протонов той же продолжительности, при котором напряжение изменяется от 95 до 235 в.

В следующей телеметрической серии (каналы 3 и 4) напряжение изменяется от 220 до 640 в и от 560 до 2000 в соответственно. Моменты начал каналов 1, 3 и 5 разделены друг от друга номинальным интервалом в 80 сек. Канал 5 является нашим единственным электронным каналом; напряжение в нем меняется от -65 до -210 в. Напряжение в канале 6 (канал для протонов высокой энергии) изменяется от 1700 до 5400 в.

Поскольку длительность измерения в каждом канале составляет 5 сек и поскольку спутник совершает полный оборот вокруг оси за $\sim 2,5$ сек, то в течение одного измерения спутник поворачивается более чем на 1 оборот. Начальная часть каждого 5-секундного интервала бесполезна из-за переходных процессов включения (источник энергии периодически отключается). Заключительная часть каждого периода также непригодна вслед-

ствие необходимости калибровки и некоторых пересчетных действий. Пригодная часть каждого периода составляет ~ 4 сек, что соответствует $\sim 1,25$ — $1,5$ оборота спутника. Серия IV для плазменных измерений не используется; она вся отведена для рубидиевого магнитометра, так что полное время, протекающее между началами двух последовательных спектров, равно ~ 5 мин. Подробное расписание измерений очень важно при рассмотрении изменений характеристик плазмы.

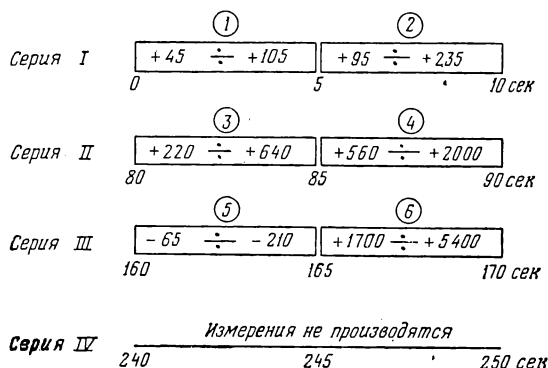


Рис. 2. Схема полного цикла плазменных измерений.

Измерения еще больше усложняются тем, что из-за ограничений, связанных с источником энергии и шириной полосы, фактическое напряжение, соответствующее переменному току, нельзя передавать в функции времени. Оно должно быть измерено и поддерживаться в течение ~ 160 мсек, что грубо соответствует повороту спутника на 20° . Это ограничение очень ухудшает дело.

Карта переходной зоны

На рис. 3 показана сводка полученных данных. Наиболее характерная особенность приведенных данных — наличие признаков прохождения спутника через ударную волну и через магнитопаузу. Позднее я расскажу, как выявляются эти переходы. Приведенные на рисунке траектории не являются прямыми проекциями. Экстремальные точки для переходной области были отложены в солнечно-эклиптической системе координат. По горизонтали отложены значения $X_{\odot \oplus}$ солнечно-эклиптической координаты X ; по вертикали $\sqrt{Y_{\odot \oplus}^2 + Z_{\odot \oplus}^2}$. В итоге каждая отдельная точка пространства была повернута вокруг прямой Земля — Солнце до совмещения с плоскостью чертежа,

Таким образом, эта картина представляет то, что можно было бы увидеть с «Эксплорера-18», если бы магнитосфера была симметричной относительно прямой Земля — Солнце или если бы траектория спутника целиком находилась в плоскости, содержащей прямую Земля — Солнце. При построении карты мы

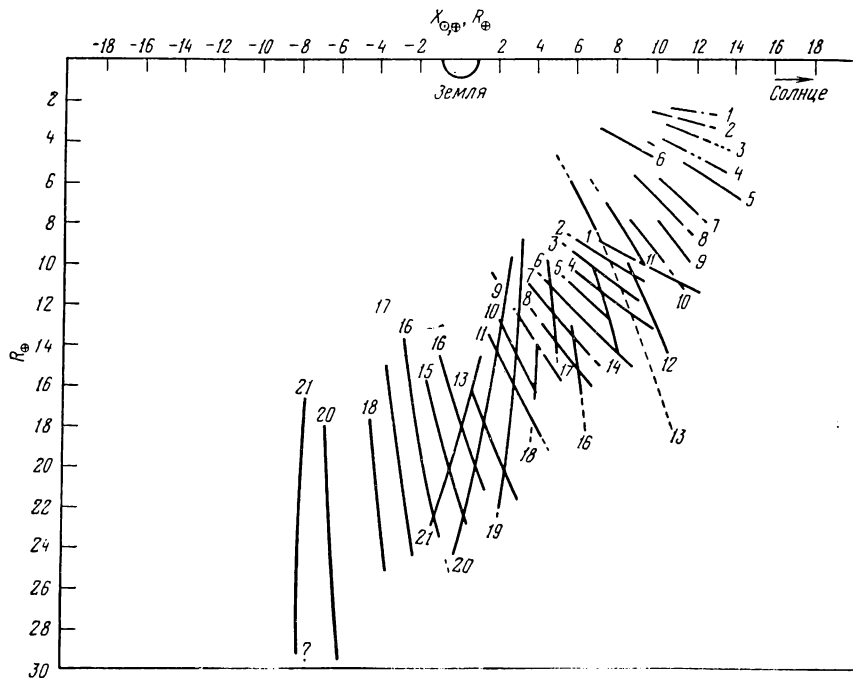


Рис. 3. Меридиональное сечение переходной области, полученное путем поворота точек в пространстве вокруг оси $X_{\odot, \oplus}$. Числа обозначают номера витков.

пренебрегли геомагнитной широтой. Мы не располагаем какими-либо данными, которые заставили бы усомниться в предполагаемой симметрии относительно прямой Земля — Солнце.

Кривизна отрезков траектории несколько неточна, но наибольшее значение имеют конечные точки. Фронт ударной волны, безусловно, как-то проходит через внешние концевые точки, а магнитопауза — через внутренние. Вопросительный знак на 21-м витке указывает, что данные являются неполными: неизвестно, где находится концевая точка. Два витка особенно интересны: виток 6-й, на котором переходная область целиком смещена к Земле, и виток 13-й, на котором наблюдалось довольно аномаль-

ное поведение за пределами фронта ударной волны, а кроме того, смещение переходной области.

Мы попытаемся обсудить эти результаты совместно с данными «Эксплорера-10», орбита которого была направлена почти в антисолнечном направлении. Мы надеемся, что данные с «Эксплорера-18» покажут, что наблюдения на «Эксплорере-10» согласуются с переходом через магнитопаузу, а не через фронт ударной волны.

Пример спектра переходной области

На рис. 4 представлены сигналы шести каналов в функции времени. Эти данные были получены тогда, когда спутник находился в переходной области на восходящей части 2-го витка.

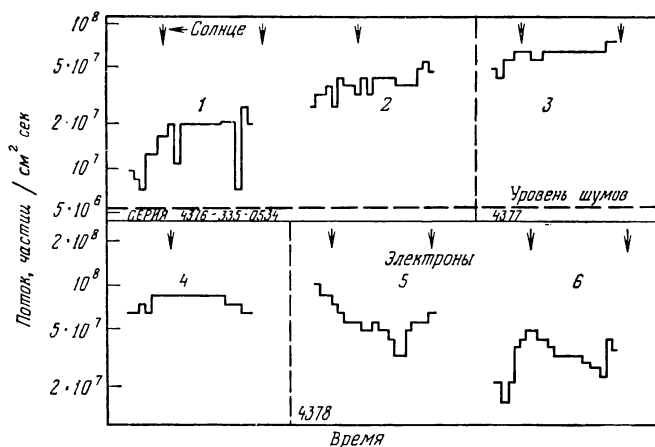


Рис. 4. Данные, полученные при помощи модуляционной ловушки на восходящей части 2-го витка в переходной области.

Расстояние $11,8 R_{\oplus}$; эклиптическая долгота 311° ; эклиптическая широта -26° ; время начала измерений 05 час. 34 мин. вс. вр., 355-й день.

Вначале часть данных теряется; некоторые приведенные данные, по-видимому, связаны с переходными процессами включения, и их следует исключить из рассмотрения. Стрелки указывают моменты прохождения Солнца через апертуру зонда и дают представление о времени, необходимом для одного полного оборота спутника вокруг оси. Между каналами 2 и 3, а также каналами 4 и 5 существует разрыв по времени около 70 сек. Логарифмическая шкала слева представляет величину переменного тока — сумму токов, измеренных в двух коллекторах.

Видно, что измеряемые токи значительно выше уровня помех и что модуляция за счет вращения спутника вокруг оси отсутствует. Модуляционная ловушка регистрирует изотропный поток очень горячих протонов. Отсутствие модуляции вращением характерно для переходной области близ прямой Земля — Солнце.

Сначала мы беспокоились, что эти сигналы вызваны очень горячими электронами. Однако на основе измерений интегральных потоков электронов, выполненных Сербу на «ИМП-1», и измерений Фримана¹⁾ на «Эксплорере-12» с помощью кадмиево-сульфидного детектора мы убедились, что это не электроны; мы полагаем, что это протоны.

Типичный межпланетный спектр

На рис. 5 представлен спектр, типичный для условий за пределами ударной волны. Шкала для тока — линейная. Видно, что в каналах 1 и 2 регистрируется очень слабый сигнал, тогда

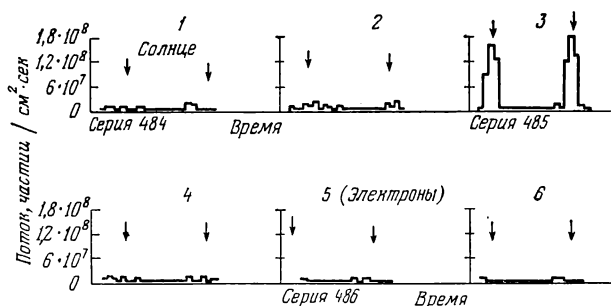


Рис. 5. Данные, полученные на 1-м витке при помощи модуляционной ловушки в переходной области. Измерения начаты в 12 час. 59 мин. вс. вр., 331-й день.

как в канале 3 — сравнительно большой сигнал, максимум которого близок к моменту прохождения Солнца, и крайне слабый сигнал, когда апертура ловушки направлена от Солнца. Если учесть чувствительность модуляционной ловушки и эффект регистрации, то выясняется, что ширина максимума приблизительно согласуется с тем, что поток приходит от Солнца. В каналах 4—6 сигналы по существу не регистрируются.

Приведу несколько характерных значений и отмечу две особенности поведения плазмы. Существуют периоды, когда мы

¹⁾ Имеются в виду работы [4*, 5*]. — Прим. перев.

наблюдаем довольно спокойную плазму, т. е. умеренно однородный, стационарный поток; скорость плазмы относительно постоянна и имеет значение порядка 300 км/сек. Для случая, представленного на рис. 5, концентрация протонов составляла $\sim 7,5 \text{ см}^{-3}$; электроны не наблюдались. Кроме того, имеются периоды, когда наблюдаются умеренно возмущенные потоки протонов. Под возмущенностью потока подразумевается, что поток может увеличиваться и уменьшаться в интервале времени, необходимым для 4—5 полных циклов измерений, что составляет 0,5 час. Характерные значения скоростей лежат в пределах 300—600 км/сек; значения потоков несколько превышают $10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$.

Зависимость от угла Солнце — Земля — спутник

Рис. 4 и 5 подсказывают способ обнаружения переходной области: а) поиски максимального и минимального сигналов в одном или больше каналов; б) использование измерений всех каналов для нахождения потока и последующего выявления максимума и минимума этого потока; в) поиски максимумов и минимумов в электронном канале.

Данные рис. 4 и 5 были получены в области, близкой к подсолнечной, т. е. в начале полета спутника. В переходной области близ подсолнечной точки, где имеется исключительно горячий, турбулентный газ, не наблюдается модуляция из-за вращения. Таким образом, с учетом результатов по «Эксплореру-10» мы ожидали, что по мере движения спутника вокруг Земли в сторону от подсолнечной области модуляция из-за вращения в переходной области будет возрастать.

На рис. 6 представлена восходящая часть 10-го витка, гораздо больше удаленного от подсолнечной области, чем первые витки. Шкала тока на этом рисунке логарифмическая. Большой пик в электронном канале (канал 5) вызван переходным процессом включения канала. Ввиду этого первые три-четыре точки для канала 5 следует исключить из рассмотрения.

Время, в течение которого спутник находился в переходной области, отмечено на рисунке. Заметна слабая модуляция за счет вращения, хотя ее фазовая зависимость от Солнца является довольно сомнительной. Наибольший сигнал обнаруживается в каналах 3 и 4. В электронном канале наблюдается очень большой изотропный сигнал, который служит хорошим индикатором переходной области.

На рис. 7 также представлены данные с восходящей части 10-го витка, но при этом спутник находился за пределами ударной волны на расстоянии $\sim 18 R_{\oplus}$. В полученные значения

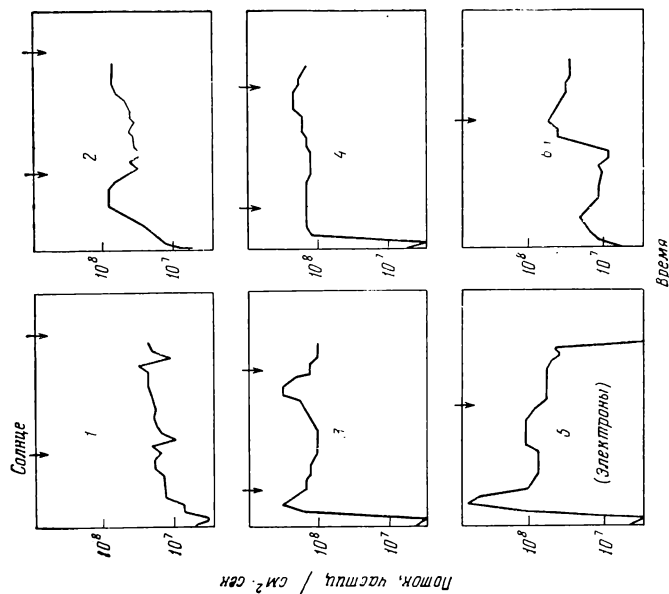


Рис. 6. Измерения, выполненные на восходящей части 10-го витка при помощи модуляционной ловушки в переходной области.

Расстояние $15,2 R_{\oplus}$; угол между нормалью к входному отверстию и линией спутник — Солнце 36° ; эклиптическая широта — 23° ; эклиптическая долгота $283^{\circ}2$; время начала измерений 10 час. 33 мин. вс. вр., 1-й день.

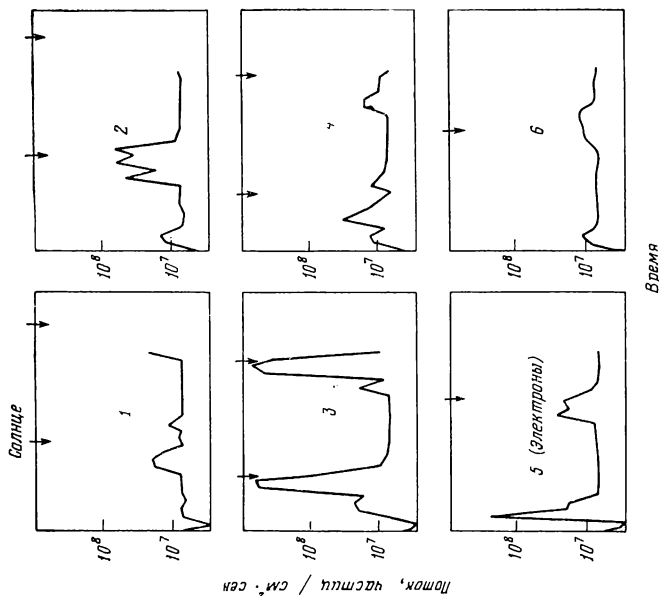


Рис. 7. Характер плазменных измерений, полученных на восходящей части 10-го витка при помощи модуляционной ловушки за пределами переходной области.

Расстояние $17,8 R_{\oplus}$; угол между нормалью к входному отверстию ловушки и линией спутник — Солнце 36° ; эклиптическая широта — $20^{\circ}8$; эклиптическая долгота $286^{\circ}3$; время начала измерений 13 час. 06 мин. вс. вр., 1-й день.

потока не вводилась поправка на чувствительность ловушки, в частности, не учитывался эффект угла ($\sim 36^\circ$) между нормалью к ловушке и прямой спутник — Солнце. Спутник достигал точки, где измеряемые значения потока в направлении на Солнце начинают сильно уменьшаться из-за характера чувствительности модуляционной ловушки. Этот эффект особенно заметен на последующих этапах полета. Однако на рис. 7 отмечается достаточно высокая степень модуляции потока за счет вращения спутника. В данном случае поток почти всецело наблюдается в канале 3, за исключением потока незначительной интенсивности в канале 2.

На рис. 8 и 9 представлены данные, полученные на восходящей части 20-го витка в переходной области и за пределами ударной волны соответственно. Угол Солнце — Земля — спутник превышал 90° ; расстояние спутника $\sim 30 R_\oplus$, т. е. он находился в апогее. На этом витке токи ловушки были сильно подвержены влиянию большого угла между нормалью к входному отверстию ловушки и прямой спутник — Солнце, в силу чего для потоков, радиально направленных от Солнца, сигнал был довольно слабым. В результате *кажущийся* поток оказывается значительно слабее по сравнению со значениями потока на более ранних витках, но причинной связи здесь нет.

Из рис. 8 следует, что пик в потоке обнаруживается в канале 4. Поскольку спутник находился под достаточно большим углом к прямой Земля — Солнце, наблюдалась модуляция потока из-за вращения спутника. Кроме того, в периоды, когда отверстие модуляционной ловушки было направлено в противоположную от Солнца сторону, регистрировались сигналы выше уровня помех. К тому же имеется значительный сигнал в электронном канале, заметно отличающийся от измерений электронных потоков за пределами ударной волны (рис. 9), где основной электронный ток обуславливается переходными процессами включения. Начиная с этой точки, переходная область обычно определялась по данным электронного канала, а не протонных каналов.

Сравнение с данными «Эксплорера-10»

На рис. 10 приведена орбита «Эксплорера-10». Наблюдалось несколько интервалов времени, когда «Эксплорер-10», вероятно, регистрировал сильно модулированный поток за счет вращения спутника, что интерпретировалось как направленное движение сравнительно холодного локального солнечного ветра [1]. Некоторые первичные данные «Эксплорера-10» показаны на рис. 11. Внизу указано модуляционное напряжение (соответствующее V_2 при $V_1=0$). Плазменный зонд представлял собой интегральную

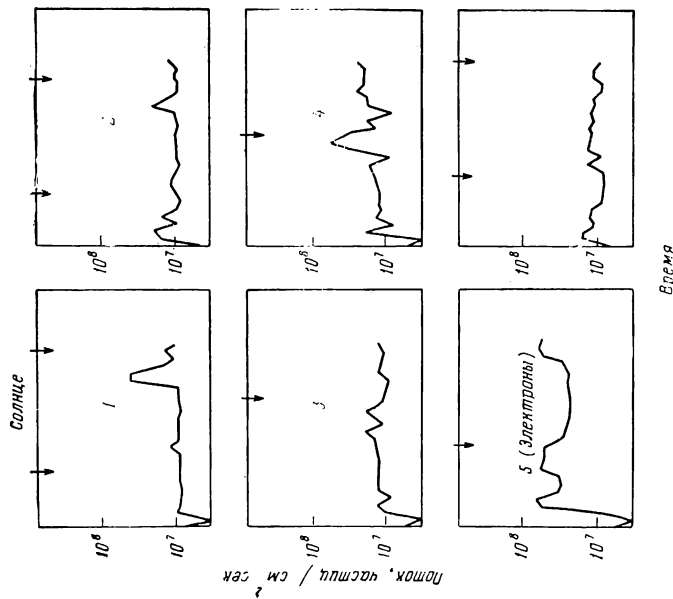


Рис. 8. Измерения, выполненные на восходящей части 20-го витка при помощи модуляционной ловушки в переходной области.

Расстояние 29,9 $R_{\oplus}$; эклиптическая широта -10° ; эклиптическая долгота $257^{\circ}7'$; время начала измерений 08 час. 07 мин. вс. вр., 41-й день.

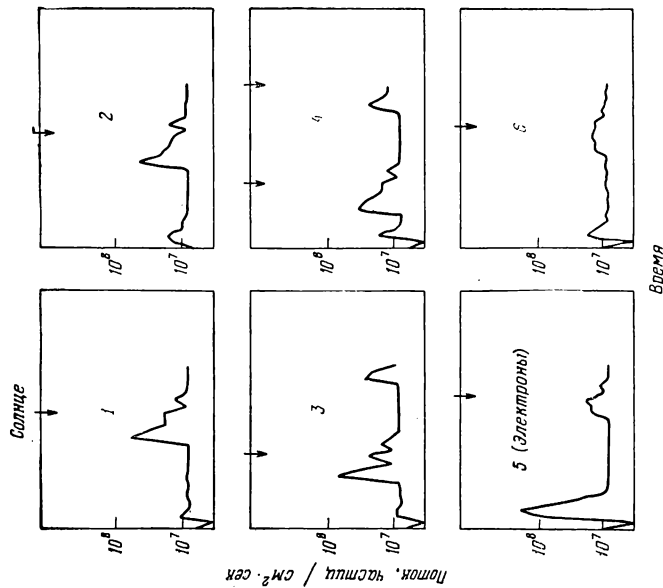


Рис. 9. Измерения, полученные на восходящей части 20-го витка при помощи модуляционной ловушки за пределами переходной области.

Расстояние 30,6 $R_{\oplus}$; эклиптическая широта -3° ; эклиптическая долгота 258° ; угол между нормалью (экваториальной плоскостью спутника) к входному отверстию ловушки и вектором спутник — Солнце $37^{\circ}8'$; время начала измерений 11 час. 29 мин. вс. вр., 41-й день.

ловушку, так что любой поток, измеряемый в одном канале, автоматически проявлялся также во всех более высокоэнергичных каналах. Характерно, что сигнал находился на уровне шумов, за исключением пика сигнала, когда в поле зрения ловушки

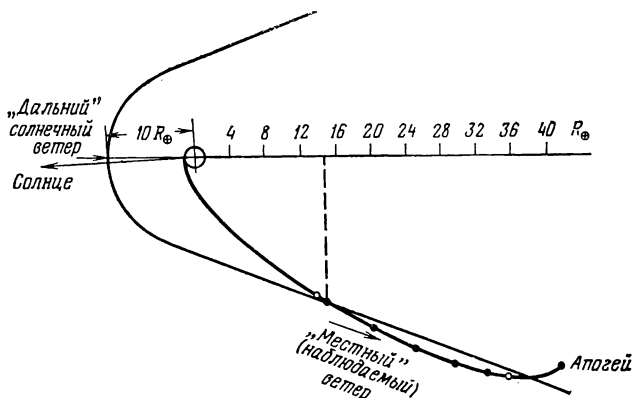
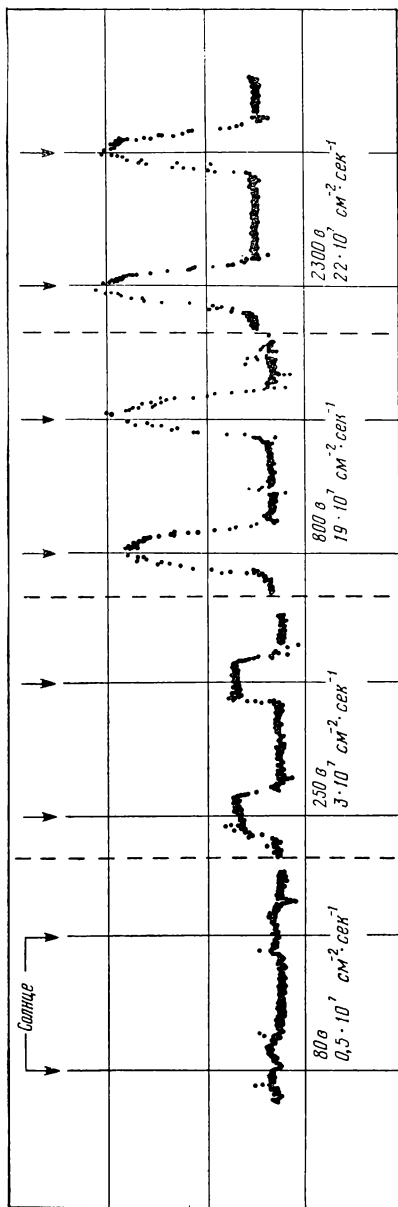


Рис. 10. Траектория орбиты «Эксплорера-10» и предполагаемое положение магнитопаузы.

оказывалось Солнце. Нет никаких указаний на существование изотропного потока.

Исходя из геометрии траектории спутника, я полагаю, что данные «Эксплорера-10» необходимо интерпретировать следующим образом: спутник проходил через магнитопаузу в переходную область, а не через ударную волну в межпланетное пространство. Но в таком случае необходимо объяснить, почему данные «Эксплорера-10» не дают указаний на изотропный поток. Из данных «ИМП-1», полученных на 1-м и 2-м витках (рис. 4 и 5), 10-м витке (рис. 6 и 7) и 20-м витке (рис. 8 и 9), видно, что по мере удаления спутника от подсолнечной точки изотропность плазмы уменьшается, а степень модуляции потока из-за вращения спутника вокруг своей оси растет. Ввиду этого мы ожидали присутствия направленных потоков плазмы в «боковых» областях. Наблюдения на «Эксплорере-18» вполне согласуются с наблюдениями на «Эксплорере-10». Основное различие в данных этих двух спутников можно объяснить лишь теми обстоятельствами, что: а) «Эксплорер-18» прошел меньший путь вокруг Земли, чем «Эксплорер-10», и б) угол между нормалью к входному отверстию ловушки и направлением на Солнце составлял 20° для «Эксплорера-10» и $\sim 35^\circ$ для «Эксплорера-18».



Р и с. 11. Характер плазменных данных «Эксплорера-10», полученных 26 марта в 12 час. 12 мин. вс. вр. с плазменной ловушкой. Приведены модулирующее напряжение и вычисленные потоки протонов.

Графики пересечения переходной области

На рис. 12 приведены суммарные графики. Кривые *б* и *в* представляют собой сумму сигналов всех пяти протонных каналов и являются мерой полного потока протонов. Логарифмическая шкала изменяется от 10^7 до 10^9 частиц/см²·сек. Кривая *б* представляет поток, наблюдаемый в направлении на Солнце, а кривая *в* — минимальный поток, наблюдаемый при всех возможных углах вращения спутника. То же самое можно сказать о кривых *г* и *д* электронных потоков, для которых также используется логарифмический вертикальный масштаб.

Кривая *а* является средней энергией (первым моментом) распределения протонов, т. е. суммой потока в каждом канале, умноженного на среднее геометрическое значение напряжения этого канала и поделенного на сумму потоков.

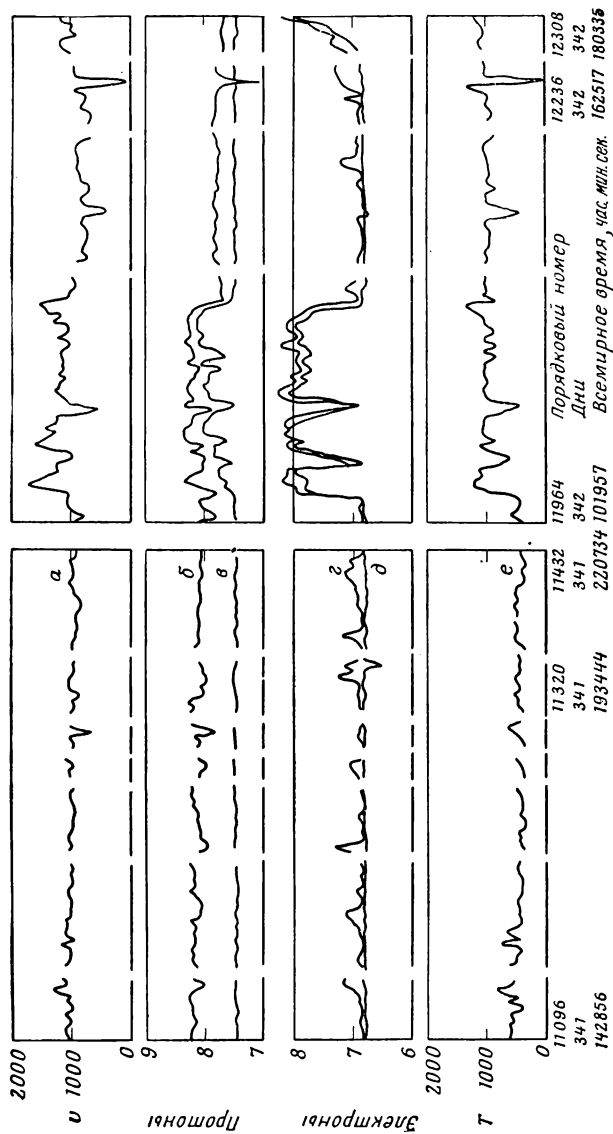
Кривая *е* является вторым моментом распределения, который определяется как

$$T = \left[\frac{\sum F_j (V_j - V)^2}{\sum F_j} \right]^{1/2},$$

где F_j и V_j — поток и напряжение в канале j , а V — среднее напряжение, представленное на рис. 12 кривой *а*. Таким образом, кривая *е* представляет собой среднее квадратичное отклонение или грубую меру температуры (хотя ее нельзя связать численно с фактической температурой плазмы).

Кривые в левой части рис. 12 соответствуют времени, когда спутник находился за пределами ударной волны, где температура плазмы низка. Затем имеется временной разрыв (центральная часть рисунка), после чего оси продолжают вьновь. Когда спутник входит в переходную область, то ширина распределения электронов по скоростям (т. е. электронная температура) увеличивается. В пределах переходной области наблюдалось увеличение минимального значения протонного потока, а также рост минимального и максимального значений потоков электронов. При переходе спутника через границу иногда наблюдалась отчетливая линия разделения, но иногда ее обнаружить не удалось.

Протонный поток и средняя энергия за пределами ударной волны были сравнительно постоянны. Однако иногда в этой области наблюдались флуктуации. Например, такая флуктуация имела место однажды, когда спутник «ИМП-1» находился за пределами ударной волны на расстоянии $\sim 2R_\oplus$ от нее. Внезапно в протонном канале появился довольно большой всплеск; зафиксировано также изменение средней энергии протонов,



Р и с. 12. Данные для переходной области, полученные в 342-й день.

а — средняя энергия протонов; *б* — максимальный, или направленный от Солнца, поток протонов; *в* — минимальный, или направленный не от Солнца, поток протонов; *г* — максимальный, или направленный от Солнца, поток протонов; *а* — минимальный, или направленный не от Солнца, поток электронов; *б* — минимальный, или направленный не от Солнца, поток электронов; *в* — второй момент распределения энергии протонов.

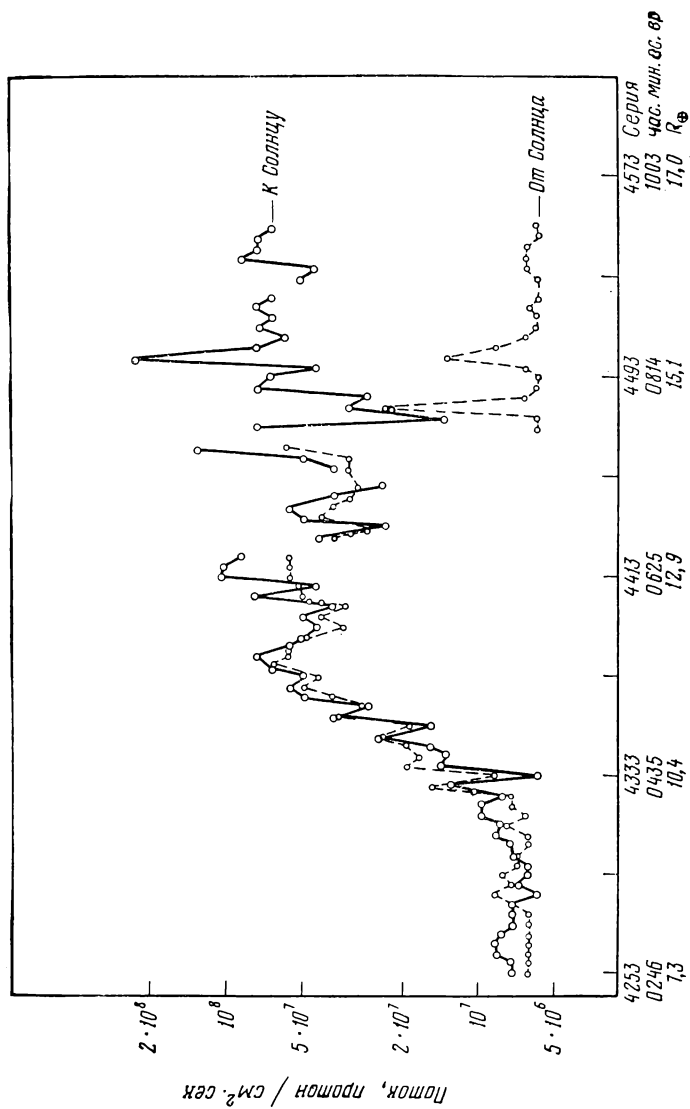


Рис. 13. Поток протонов 3-го энергетического интервала (220—640 е) для восходящей части 2-го витка, начиная с 02 час. 46 мин. вс. вр., 335-й день.

которая в этом случае равнялась ~ 1000 эв. Затем энергия резко повысилась до 1700 эв, удерживалась на этом уровне в течение 10 мин и снова снизилась до 1000 эв. Одновременно несколько снизилось максимальное значение потока, а минимальный протонный поток значительно увеличился. Наиболее отчетливо это событие проявилось в электронном потоке, в котором произошел скачок по существу от нулевого значения до $2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ для максимального и минимального потоков.

Изредка условия в переходной области оказывались аналогичными условиям за пределами ударной волны. Временной масштаб этих изменений, по-видимому, был меньше 5-минутного цикла измерений, поскольку эти изменения «размываются» в протонных каналах. Для отдельного протонного спектра в некоторых каналах могут регистрироваться потоки со свойствами, характерными для переходной области, тогда как в других каналах — потоки с параметрами, характерными для межпланетного пространства. В таком случае вычисленные средние параметры смазывают резкость перехода через границу, хотя резкие переходы существуют и их можно было найти на рис. 12. Последний график в правой части относится ко времени, когда спутник находился внутри магнитосферы.

Другой переход, наблюдавшийся на восходящей части 2-го витка, представлен на рис. 13 в виде графика максимального и минимального значений потоков для одного канала, именно канала 3, на который подается напряжение от 220 до 640 в.

Левая часть графика соответствует времени, когда спутник находился внутри магнитосферы. В этот период потоки заряженных частиц по существу не обнаруживаются. Когда спутник прошел через магнитопаузу, наблюдалось увеличение как потока от Солнца, так и минимального потока. Затем, после того как спутник покинул переходную область, зарегистрировано довольно много пиков, которые хорошо коррелировали с данными магнитометра. За пределами переходной области в направлении на Солнце наблюдался устойчивый поток протонов умеренной интенсивности. Из рис. 3 видно, что на этом витке магнитопауза располагалась на расстоянии $10 R_{\oplus}$, а фронт ударной волны $\sim 15 R_{\oplus}$.

Электронные потоки на малых высотах

На рис. 14 представлен график для электронного сигнала вблизи перигея. Он довольно хорошо согласуется с данными Грингауза [2], согласно которым электронная концентрация с приближением к Земле возрастает.

Когда «ИМП-1» приближался к перигею, то наблюдалось увеличение максимального и минимального потоков электронов. В этой области данные теряются из-за трудностей, связанных

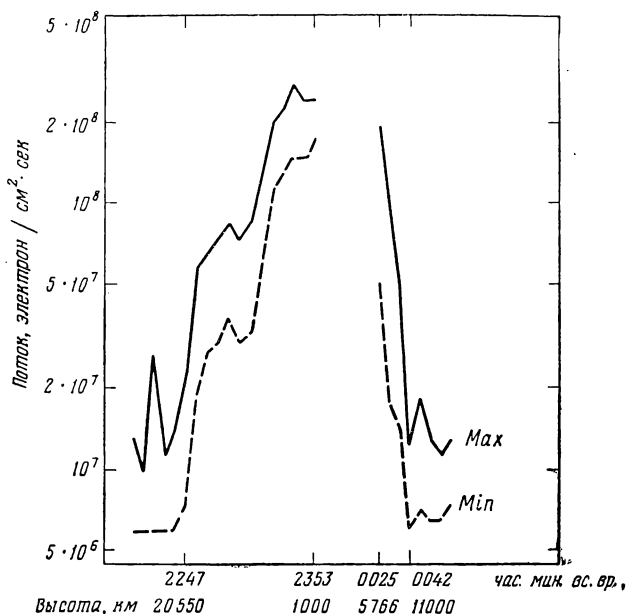


Рис. 14. Максимальный и минимальный потоки электронов около первого перигея в функции времени и высоты (336-й день).

с получением информации, когда спутник движется близко к Земле и огибает ее очень быстро. По-видимому, существует асимметрия относительно прямой Земля — Солнце.

Аномальные особенности переходной области

Имеется еще одно очень интересное явление, пока не вполне понятное. Внизу на рис. 15 нанесены 3-часовые значения индекса K_p геомагнитной активности за период с 13 по 20 января 1964 г. В первые два дня значения K_p были относительно низкими, а затем произошло умеренно быстрое, но заметное увеличение вплоть до 5 или 5—, хотя магнитной бури не наблюдалось. Над значениями K_p для того же периода нанесен график потока протонов, усреднявшегося за $1/10$ суток. Значительная часть данных потеряна по причине, о которой я скажу ниже.

Поток протонов удерживался на довольно устойчивом уровне, несколько превышающем $10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$. Поток как будто сперва несколько уменьшился, а затем увеличился по величине примерно на порядок. За этим увеличением последовало новое понижение. В то же самое время энергия направленного движения, которая была довольно устойчивой, увеличилась, затем уменьшилась, потом снова увеличилась и после этого, вероятно, постепенно начала понижаться.

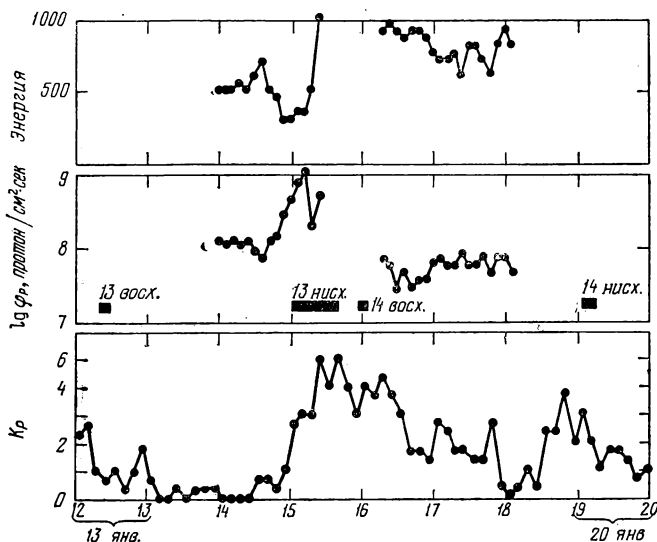


Рис. 15. Вверху — 0,1-дневные средние значения кинетической энергии направленного движения протонов, в центре — логарифмы одной десятой среднего за сутки потока протонов. Внизу — 3-часовые значения индекса K_p геомагнитной активности с 13 по 20 января 1964 г.; черные прямоугольники на графике в центре указывают прохождение через переходную область.

По-видимому, существует много структурных особенностей, которые в настоящее время трудно объяснить. Однако только что описанное явление объяснит аномальное поведение данных на нисходящей части 13-го витка, представленных на рис. 3. Переходная область растянулась довольно далеко. Короткие черные полосы на рис. 15 представляют периоды времени, в течение которых в переходной области наблюдалась изотропная плазма. Прохождение через переходную область занимало обычно 0,1—0,2 суток. Но на нисходящей части 13-го витка, как раз тогда, когда произошло одновременное увеличение индекса геомагнитной активности K_p , потока протонов и энергии прото-

пов, наблюдалось исключительно длительное пересечение переходной области и резко отклоняющийся характер данных.

Если сопоставить суммарные данные 13-го витка, то выявляется высокая степень модуляции минимального потока протонов, близкого к уровню шумов (причем этот поток был направлен от Солнца), перемежающаяся с довольно высокими значениями минимального потока. Такое поведение продолжалось с самого начала наблюдений, обозначенного на рис. 3 числом 13, и вплоть до начала сплошной линии, где отмечается возвращение к непрерывному изотропному сигналу. Затем, ближе к Земле, характер плазмы снова становится изменчивым.

Довольно заманчиво связать это поведение с тем, что увеличение скорости солнечного ветра и последующее сжатие границы магнитосферы совпадает с прохождением спутника через переходную область. Безусловно, спутник не движется точно в направлении, перпендикулярном к поверхности границы, так что скорость движения внешней границы переходной области может быть несколько меньше скорости спутника.

Сделаем грубую оценку. На основе сглаженных значений наблюдаемого увеличения интенсивности потока и энергии мы вычислили, что давление плазмы увеличивается в 10—12 раз. Теперь допустим, что

$$\frac{nmv^2}{n_0mv_0^2} = \frac{B^2}{B_0^2} = \frac{r_0^6}{r^6};$$

эти равенства описывают равновесие между давлением плазмы и магнитным давлением дипольного поля. Если поле было сжато в 2 раза, то $r_0/r=2$, а $(r_0/r)^6=64$. Таким образом, наблюдаемого изменения давления плазмы было недостаточно для объяснения сжатия магнитного поля, основанного на этой простой модели.

Мы пытались проделать аналогичные расчеты для магнитопаузы или для внутренней границы магнитосферы, определив невозмущенное положение магнитопаузы по концам смежных траекторий на рис. 3. Начало нисходящей части 13-го витка, обозначенной сплошной линией, было принято за возмущенное положение магнитопаузы. В этом случае изменение давления было, вероятно, слишком велико для согласования с этой моделью.

Таким образом, предложенная простая модель является довольно гипотетической. Однако совершенно очевидно, что внутренняя и внешняя границы переходной области смещаются от одного витка к другому. Заметим также, что движение спутника

на 13-м витке совпало со вторым прохождением через след Луны. Возможно, что смещение границы и увеличение индекса K_p отчасти связано с прохождением Земли через этот след¹⁾.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bonetti A., Bridge H. S., Lazarus A. J., Rossi B., Scherb F., J. Geophys. Res., **68**, 4017 (1963).
2. Грингауз К. И., Искусственные спутники Земли, **12**, 114 (1963); Space Res. II, 574 (1961).
- 3*. Безруких В. В., Грингауз К. И., Мусатов Л. С., Рыбчинский Р. Е., Хохлов М. З., Докл. АН СССР, **163**, № 4, 873 (1965).
- 4*. Serbu G. R., Space Res., **5**, 564 (1965).
- 5*. Freeman J. W., Van Allen J. A., Cahill L. J., J. Geophys. Res., **68**, 2121 (1963).
- 6*. Wolfe J. H., Silva R. W., Myers M. A., J. Geophys. Res., **71**, № 5, 1319 (1966).
- 7*. Coon J. H., Radiation Trapped in the Earth's Magnetic Field, ed. B. M. McCormac, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 1966, p. 231. (Русский перевод в сб. «Солнечно-земная физика», М., изд-во «Мир», 1968.)

¹⁾ На основе исследования магнитных данных и траектории спутника Несс сделал вывод, что на 13-м витке след Луны не был зарегистрирован (см. гл. 28).

НАБЛЮДЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ВБЛИЗИ МАГНИТОПАУЗЫ
И В ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ
НА СПУТНИКЕ «ИМП-1»

Н. Ф. Несс

Введение

Описание спутника «ИМП-1» приведено при обсуждении точности магнитных измерений в гл 6. Точность измерений равна $\pm 0,25 \gamma$. Первые магнитные данные по магнитопаузе и области взаимодействия были получены с помощью «Эксплорера-12» [1]¹⁾, точность магнитных измерений на котором составляла всего $\pm 12 \gamma$. Несмотря на сравнительно низкую точность измерений, на «Эксплорере-12» была получена весьма обширная информация, и на основе ее установилось твердое убеждение [2], что любая зарегистрированная «граница» представляет собой магнитопаузу.

Ориентация орбиты спутника в пространстве уже рассматривалась. Напомним, что орбита спутника фиксируется лишь в инерциальной системе координат, тогда как Земля движется вокруг Солнца. Следовательно, орбита испытывает годовое изменение положения относительно Солнца. На рис. 1 по оси абсцисс отложено время жизни «ИМП-1», измеряемое в сутках с момента запуска. Сплошная линия представляет угол между направлениями Земля — апогей спутника и Земля — Солнце. Первоначально этот угол составлял $25^\circ,6$. Апогей спутника удалялся от прямой Земля — Солнце со скоростью 1° в сутки.

Мы рассмотрим данные измерений на первых 19 витках. Период обращения спутника равен ~ 4 суткам, так что угол апогей — Земля — Солнце изменяется от 25 до $\sim 93^\circ$. После 90 суток жизни спутника его апогей все время находился внутри ударной волны, возникающей в результате взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем. Предполагается, что спутник будет функционировать по крайней мере до того момента,

¹⁾ Подробное изложение данных «Эксплорера-12» по магнитопаузе и переходной области можно найти в [8*]. — *Прим. перев.*

пока не достигнет максимального угла апогей — Земля — Солнце, хотя и существуют серьезные опасения относительно возобновления работы спутника, поскольку он окажется в тени Земли. Таким образом, есть основание полагать, что будет построена карта ночной магнитосферы по крайней мере для 60—90 дней, что даст надежную информацию топологии магнитного поля в этой области¹⁾. Измерения в этой области были выполнены и

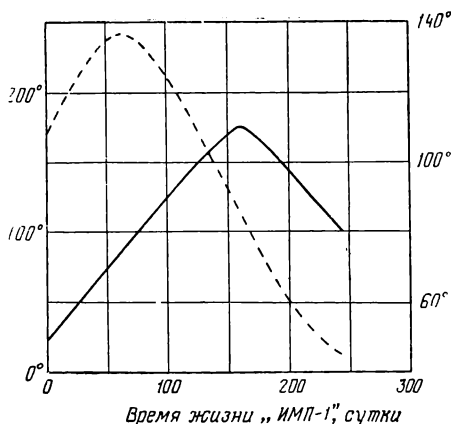


Рис. 1. Угол между векторами Земля — апогей и Земля — Солнце (сплошная кривая, шкала слева) и угол между осью вращения спутника и вектором Земля — Солнце (штриховая кривая, шкала справа).

спутником «Эксплорер-14» [3]. Но апогей ($15,5 R_{\oplus}$) «Эксплорера-14» был значительно ближе апогея спутника «ИМП-1» ($31,7 R_{\oplus}$).

На рис. 6 гл. 6 представлена использованная система координат, удобная для анализа измерений межпланетного магнитного поля, а также полей, измеренных внутри магнитосферы и в переходной области. В дальнейшем измеренные магнитные поля будут характеризоваться их напряженностью F и двумя углами: широты θ (выше или ниже плоскости эклиптики) и азимута ϕ , отсчитываемого от направления на Солнце. Первоначально апогей спутника «ИМП-1» находился в квадранте $(+X, -Y)$ солнечно-эклиптической системы координат.

¹⁾ См. примечание переводчика на стр. 271 и 272. — *Прим. ред.*

Примеры данных по магнитному полю на границе геомагнитного поля

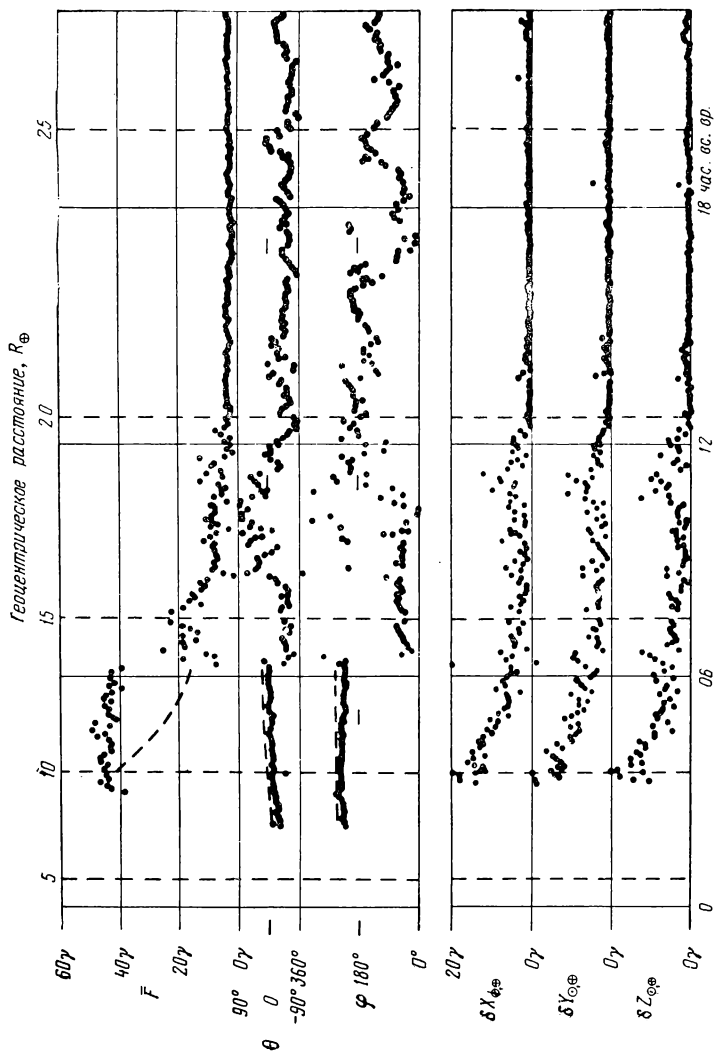
На рис. 2 представлены данные, полученные 5 января 1964 г. на восходящей части 11-го витка. В гл. 6 были приведены данные о межпланетном магнитном поле за следующие 24 час. Здесь сохранен тот же вариант представления данных, лишь вертикальная шкала несколько продлена. Измеряемые магнитные поля были значительно больше, чем поля в межпланетном пространстве, и превышали 40γ . Хотя при определенной ориентации полей (относительно спутника) можно было с помощью феррозондовых магнитометров измерять более сильные магнитные поля, тем не менее значения выше 40γ не слишком надежны, если они получены лишь с помощью феррозондового магнитометра. Мы еще не использовали данные рубидиевого магнитометра, который измеряет напряженность поля вплоть до нескольких сот γ .

Штриховые кривые на рис. 2 представляют теоретические значения F , θ и ϕ , вычисленные на основе коэффициентов Финча и Литона¹⁾. Для рассматриваемых расстояний теоретические значения поля не сильно отличаются от аппроксимации поля центральным диполем, поскольку на этих расстояниях наиболее существенным членом разложения по сферическим гармоникам является член, соответствующий центральному диполю. По мере удаления спутника от Земли оба угла в общем согласуются с теоретическими значениями, хотя угол θ (отрицательный) имеет несколько большую величину, чем по теории.

Мы отождествляем магнитосферу с областью пространства, пересекаемой спутником вплоть до 6 час. 20 мин. вс. вр. Мне хотелось бы подчеркнуть, что геомагнитные силовые линии в магнитопаузе часто не перпендикулярны к плоскости эклиптики. Наблюдаемая ориентация поля связана с тем обстоятельством, что Земля находится вдали от солнцестояния и приближается к точке весеннего равноденствия. Другими словами, ориентация зависит от наклона оси вращения Земли к плоскости эклиптики и от наклона оси диполя к оси вращения.

Угол ϕ не был столь большим, как это ожидалось на основе теоретических расчетов. Напряженность поля на расстоянии $\sim 10 R_{\oplus}$ примерно равнялась теоретической, но в конце достигала значения, в два раза превышающего теоретическую. На геоцентрическом расстоянии $13,6 R_{\oplus}$ примерно в 6 час. 20 мин. вс. вр. наблюдалось внезапное изменение величины поля и двух углов, определяющих вектор поля. Составляющая, направленная

¹⁾ Эти коэффициенты см. в [10*]. — Прим. ред.



Р и с. 2. Измерения магнитного поля на восходящей части 11-го витка 5 января 1964 г. Каждая точка представляет 5-минутное среднее. Пунктирные кривые — невозмущенное теоретическое геомагнитное поле.

от Солнца, внезапно повернулась в сторону Солнца. Но хотя угол φ изменился на 180° , что согласуется с требованиями теории, угол θ также изменился примерно на 60° . Поэтому отмеченное изменение поля не было простым обращением; поле повернулось.

По мере дальнейшего перемещения спутника на орбите ориентация поля в общем сохранялась, тогда как напряженность поля менялась от 7 до 20γ , иногда падая до нуля. Поле продолжало довольно сильно флуктуировать до тех пор, пока «ИМП-1» не достиг межпланетного пространства.

Десслер утверждал, что магнитопауза, которая располагается на расстоянии $13,6 R_\oplus$, должна представлять собой устойчивую поверхность [4, 5]. Однако наличие постоянных вариаций при пересечении границы указывает на то, что энергия распространяется через границу в форме возмущений, связанных с переходной областью.

Возникает еще один вопрос. На рис. 2 ударная волна располагается на расстоянии $19,7 R_\oplus$. Наше определение положения ударной волны основано на внезапном изменении конфигурации поля от очень устойчивой к весьма неустойчивой, что следует из данных по среднеквадратичным отклонениям. В некоторых случаях подобные определения были довольно простыми, но в других случаях это было не так. Возможно, это связано с тем, что нам неизвестны физические предпосылки, которые необходимы для уверенного определения. Кроме того, мы не знаем причин непродолжительных возрастаний среднеквадратичных отклонений, когда спутник находится на расстоянии в несколько $R_\oplus$ за пределами ударной волны. Довольно продолжительный рост флуктуаций имел место, например, приблизительно в 13 час. 50 мин вс. вр. (см. рис. 2). Можно привести другие примеры, в которых период этого роста был более ограничен во времени. Это явление, по-видимому, связано с поверхностью ударной волны, а не со спокойной межпланетной средой.

На рис. 3 представлены данные, полученные на нисходящей части 11-го витка. Граница располагается на расстоянии $9,7 R_\oplus$. Хотя она менее четко выражена, чем на восходящей части витка, магнитопауза все же обнаружилась по резкому изменению угла φ . Направление поля было ближе к нормали к плоскости эклиптики по сравнению с полем на рис. 2, хотя изменения напряженности выявлялись менее четко. Для данного витка ударная волна располагалась на расстоянии $16 R_\oplus$. Внезапного увеличения напряженности поля не происходило; поле постепенно увеличивалось, и наряду с этим локализованно росли среднеквадратичные отклонения. Разумеется, отдельные определения положения границы не бесспорны. Однако критерии, согласно

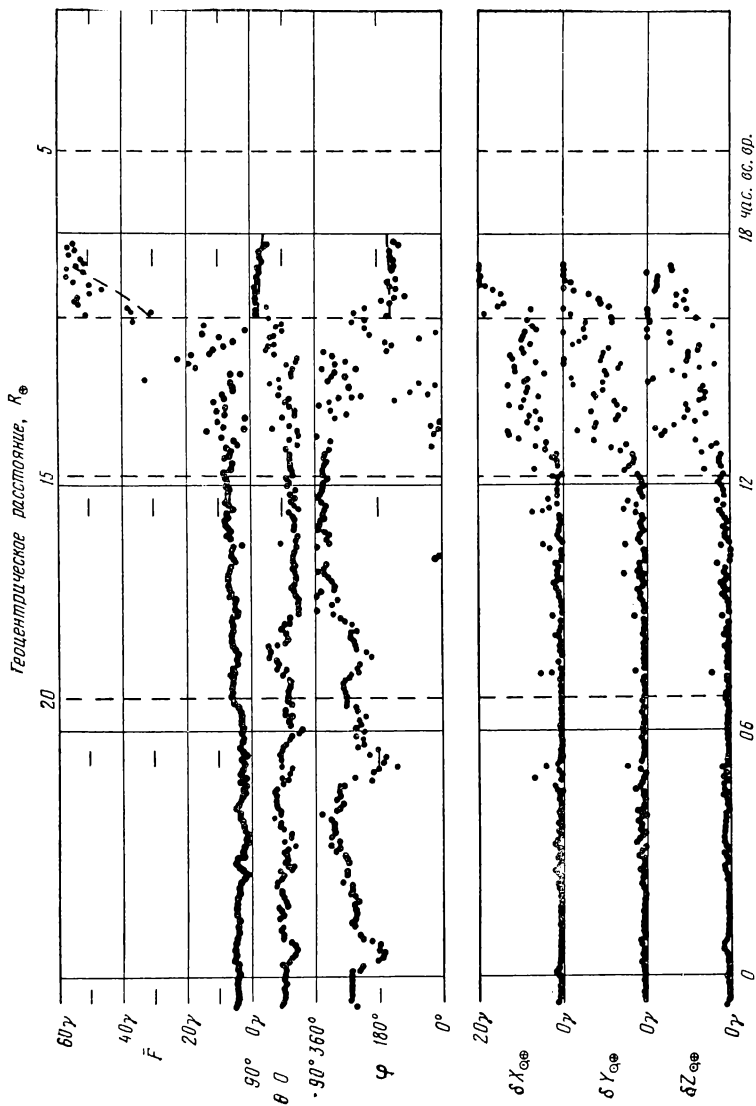


Рис. 3. Измерения магнитного поля на нисходящей части 11-го витка 8 января 1964 г.

которым мы определяли пересечения границы, не изменялись от одного витка к другому. Будущий детальный анализ одновременных плазменных и магнитных данных может потребовать такого изменения.

На рис. 4 приведены данные восходящей части 15-го витка, полученные еще на 16° дальше от прямой Земля — Солнце. Этот виток был классическим — геомагнитное поле было измерено за значительно больший интервал времени и на значительно большем расстоянии, чем когда-либо. Внутреннее поле лежало почти в плоскости эклиптики; теоретические значения ϕ были больше наблюдаемых. Поле искажалось таким образом, что его силовые линии были направлены в сторону от Солнца. Это свидетельствует о том, что на ночной стороне магнитные силовые линии стремятся стать параллельными поверхности магнитопаузы. Это ситуация аналогична обнаруженной на «Эксплорере-10» [2].

По изменениям напряженности поля и характеризующих его углов отчетливо видна граница магнитосферы. Угол ϕ изменился опять на 180° , и, кроме того, изменился угол θ . Когда спутник пересек границу и оказался в переходной области, вектор поля был направлен к Солнцу под углом $\theta = -60^\circ$ относительно плоскости эклиптики. Затем по мере дальнейшего удаления спутника от Земли поле внезапно вернулось к прежнему направлению, хотя спутник все еще находился в переходной области.

За пределами установленного положения границы ударной волны примерно в 8 час. 00 мин. вс. вр. у всех трех компонент зарегистрировано крайнее локальное увеличение среднеквадратичного отклонения магнитного поля. Я не думаю, что эти увеличения отклонений были связаны с межпланетным явлением, отождествляемым нами как нейтральные поверхности (см. гл. 6). Их детальное рассмотрение не позволило обнаружить, что поле стремилось к нулю. Вероятно, это явление было связано с положением фронта ударной волны.

На рис. 5 представлены данные нисходящей части 6-го витка. На основе анализа плазменных данных, полученных с помощью модуляционной ловушки, авторы эксперимента утверждали, что этот виток является аномальным (гл. 21). Обсуждаемый виток, по-видимому, также является аномальным с точки зрения данных по магнитному полю. Когда спутник вернулся с участков орбиты близ апогея, произошло внезапное изменение угла ϕ на 180° . Одновременно вектор поля, который был направлен ниже плоскости эклиптики, изменил свое направление и оказался выше ее. В то же время наблюдалось незначительное увеличение напряженности поля, сменившееся сначала уменьшением, а затем новым быстрым увеличением. Однако изменения углов не

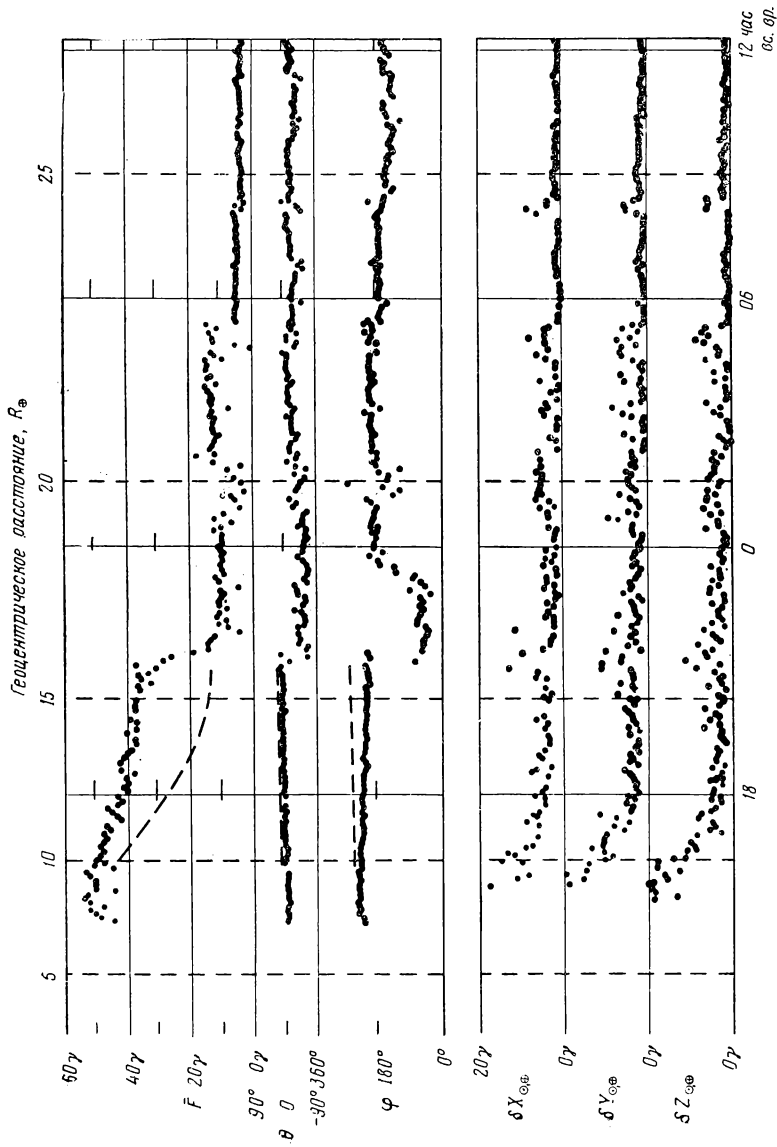
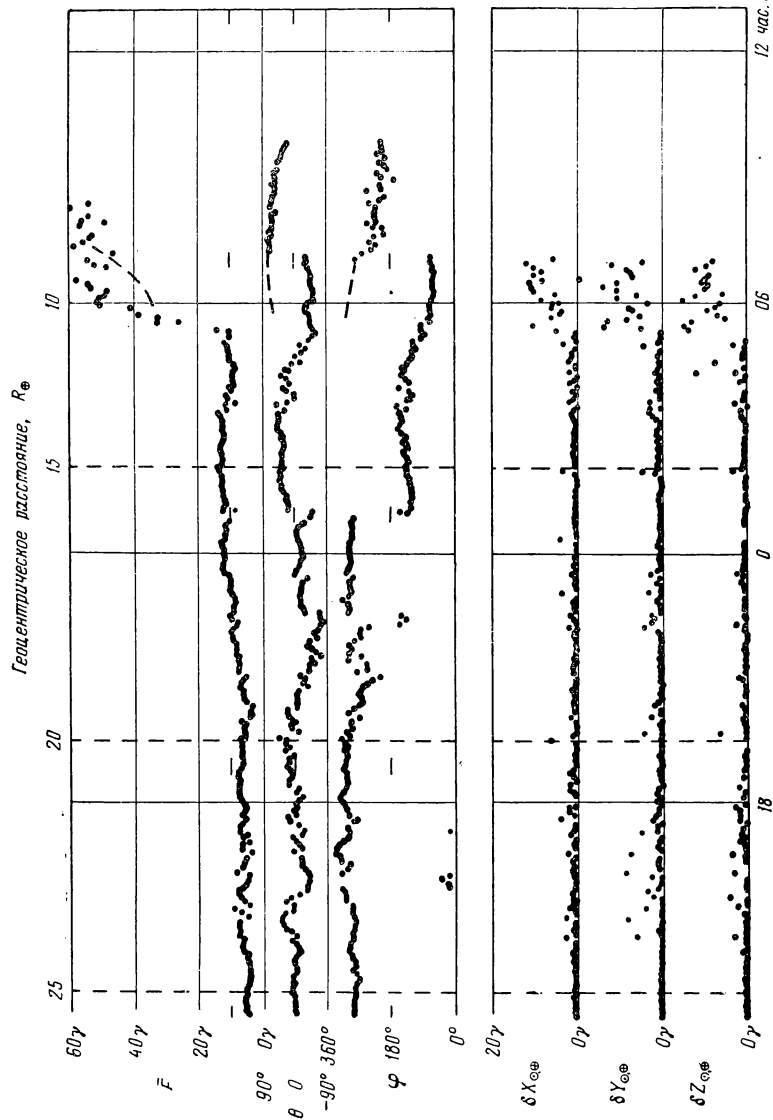


Рис. 4. Измерения магнитного поля на восходящей части 15-го витка 21 января 1964 г.



Р и с. 5. Измерения магнитного поля на нисходящей части 6-го витка 20 декабря 1963 г.

совпадают со вторым возрастанием поля. В общем среднеквадратичное отклонение было малым примерно до 5 час. 00 мин. вс. вр., когда спутник определенно попал в область, где произошли первые зарегистрированные изменения поля. В этом случае трудно определить положение магнитопаузы или ударной волны на основе ранее сформулированного критерия. В качестве предварительного вывода мы поместили ударную волну близ 5 час. 00 мин. вс. вр., а магнитопаузу — близ 7 час. 10 мин. вс. вр.

Определение положения и формы границ

Расстояния, на которых спутник пересекает границы магнитопаузы и ударной волны, представлены на рис. 6—9. Последовательные пересечения границ соединены прямыми. На этих рисунках также приведены значения K -индекса станции Фредериксберг и угол χ_{ss} — геомагнитная широта подсолнечной точки. В период солнцестояния этот угол составляет $\sim 36^\circ$. По мере приближения Земли к точке весеннего равноденствия среднее значение χ_{ss} увеличивается.

Первые две точки границ магнитопаузы и ударной волны на рис. 6 были получены при движении спутника на восходящей и нисходящей частях 1-го витка. Геоцентрические расстояния границ для этих двух прохождений несколько отличаются друг от друга. По мере удаления орбиты на ночную сторону от линии Земля — Солнце расхождение между положением границ, определяемым на восходящей и нисходящей части каждого витка, все больше возрастает. Расстояние до магнитопаузы и ударной волны также становится больше. Кроме того, необходимо рассмотреть некоторые переходные явления, а также изменение χ_{ss} . Максимальная поправка, которую необходимо ввести в определение точек пересечения границы при учете эффекта χ_{ss} , равна 12%. Хотя поправка мала, но она имеет такой же порядок величины, как и наблюдаемое максимальное изменение положения границы. Поправка за эффект χ_{ss} очень важна с физической точки зрения (поправка первого порядка для меняющегося угла атаки солнечного ветра, падающего на геомагнитное поле). Остаточные изменения положения границы свидетельствуют о переменности давления солнечного ветра. На рис. 6 показано явление 2 декабря. Оно привело к сжатию магнитосферы по сравнению с размером, наблюдавшимся при предыдущем пересечении границы на нисходящей части витка. К моменту пересечения границы спутником на восходящей части 3-го витка граница вернулась в прежнее положение. Вопросительные знаки на рис. 9 указывают прохождения спутника, для которых

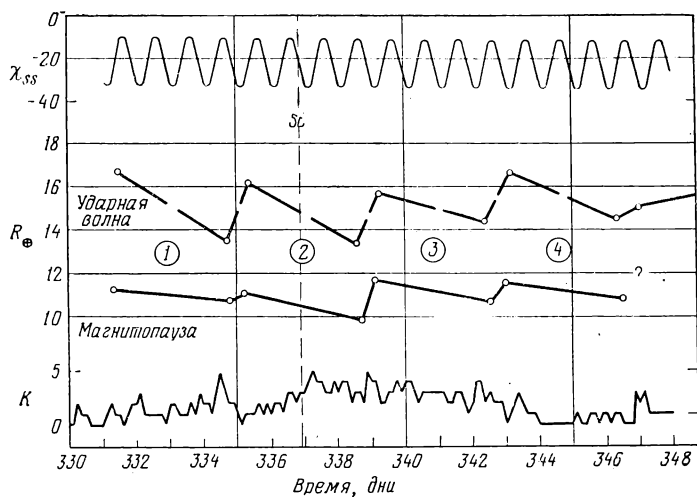


Рис. 6. Поведение магнитной широты подсолнечной точки χ_{ss} , положения ударной волны и магнитопаузы (в центре) и трехчасового индекса геомагнитной активности K (внизу) для станции Фредериксберг с 1-го по 4-й виток (с 330-го по 348-й день 1963 г.).

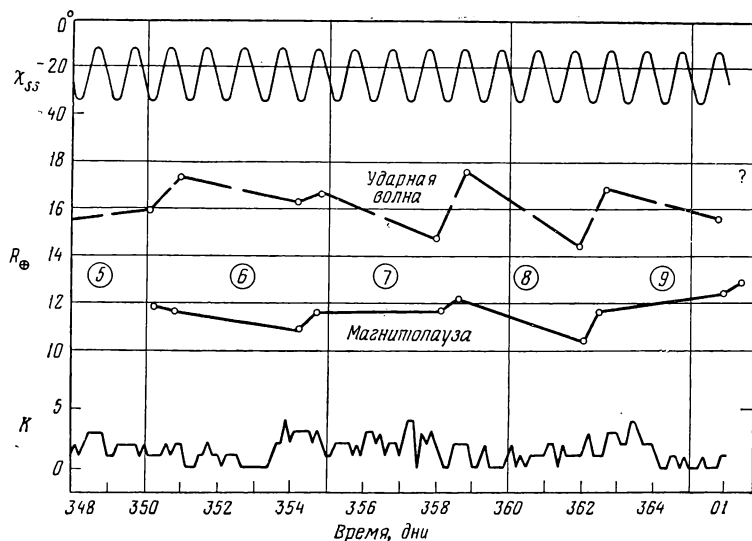


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но с 348-го дня 1963 г. по 1-й день 1964 г.

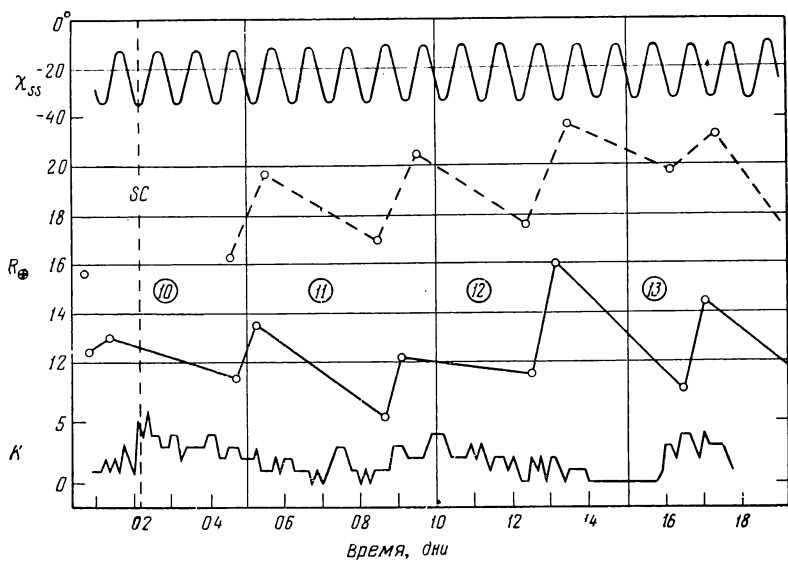


Рис. 8. То же, что на рис. 6, но с 1-го по 18-й день 1964 г.

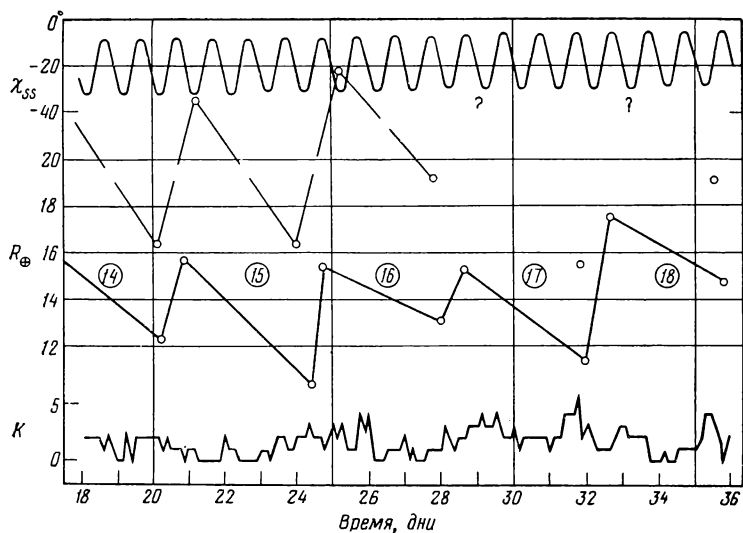


Рис. 9. То же, что на рис. 6, но с 18-го по 35-й день 1964 г.

было трудно определить пересечения, согласно нашим предварительным критериям.

На рис. 10 дана общая сводка данных о пересечении границ, которые получены к настоящему времени. Пересечения границ на нисходящих частях витков с 1-го по 19-й соединены отрезками прямых; так же соединены пересечения для восходящих частей

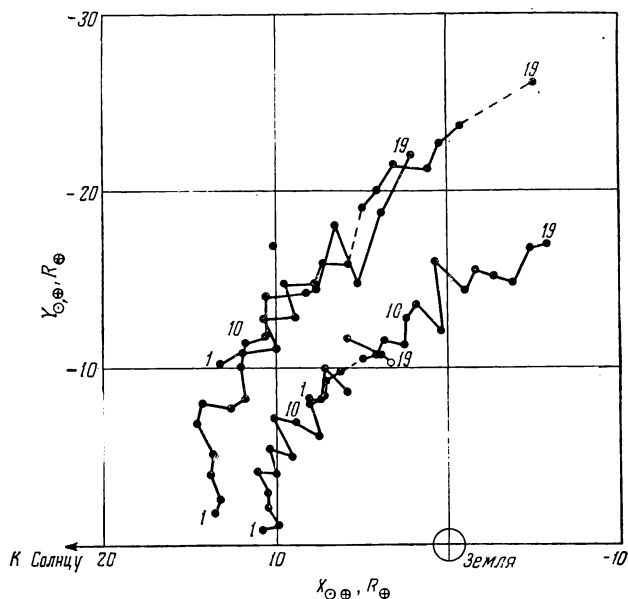


Рис. 10. Карта пересечений спутником «ИМП-1» ударной волны и магнитопаузы по данным первых 19 витков с 30 ноября 1963 г. по 8 февраля 1964 г.

тех же витков. Пунктирные линии отмечают либо потерю данных, либо сомнения в правильности определения границы. Например, штриховой линией отмечен 13-й виток, который по анализу плазменных данных (см. гл. 21) считался довольно аномальным случаем пересечения границы.

Сравнение наблюдаемых и теоретических границ

Рис. 11 иллюстрирует зависимость фактора расширения магнитопаузы K от χ_{ss} для простой модели дипольного поля. Наблюдаемое расстояние каждого пересечения границы делится на K , соответствующее значению χ_{ss} для момента пересечения.

На рис. 12 представлены исправленные положения точек пересечения границ, а также теоретические границы. Положение

ударной волны было вычислено Спрейтером и Джонсом [6] на основе аэродинамики затупленного тела. Чтобы получить то полное согласие, которое представлено на рисунке, оказалось необходимым повернуть источник давления на 5° для учета абберации солнечного ветра; величина абберации 5° соответствует скорости 360 км/сек. Кривые подгонялись к экспериментальным данным визуально, а не методом наименьших квадратов. Интересно узнать, сохранится ли это согласие между наблюдаемыми и теоретическими положениями границ на почной стороне Земли.

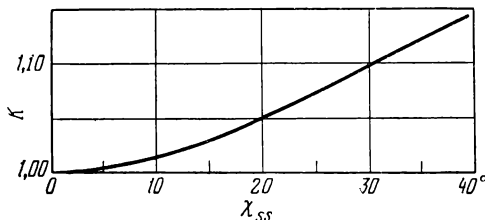


Рис. 11. Зависимость коэффициента расширения магнитопаузы K от геомагнитной широты подсолнечной точки ($K = \sqrt[6]{1 + 3 \sin^2 \chi_{ss}}$).

Геоцентрические расстояния магнитопаузы и ударной волны на прямой Земля — Солнце равны соответственно 10,25 и 13,4 $R_\oplus$. Отношение этих двух величин хорошо согласуется со значением, полученным при рассмотрении этой задачи в аэродинамическом приближении [6, 7].

На рис. 13 показаны результаты ньютоновского приближения в задаче о взаимодействии солнечного ветра с геомагнитным полем: ожидаемые значения отношения концентрации протонов, положения магнитопаузы и энергии протонов (или их скорости).

Давление за фронтом ударной волны определяется давлением на ее фронте. Если эффективное давление на магнитопаузе равно примерно половине давления невозмущенного солнечного ветра, то в таком случае можно оценить концентрацию частиц, необходимую, чтобы сдержать геомагнитное поле, поскольку по измерениям с модуляционной ловушкой на «ИМП-1» приближенно известна скорость невозмущенного солнечного ветра. Для скорости 400 км/сек концентрация должна быть ~ 3 протон/см³ или 6 протон/см³, если полное давление направленного движения внутри переходной области составляет $1/2$ от наружного. Теоретическое расстояние до магнитопаузы близ подсолнечной точки определяется выражением

$$\frac{R_c}{R_\oplus} = \left[\frac{B^2}{4\pi n m v^2} \right]^{1/6},$$

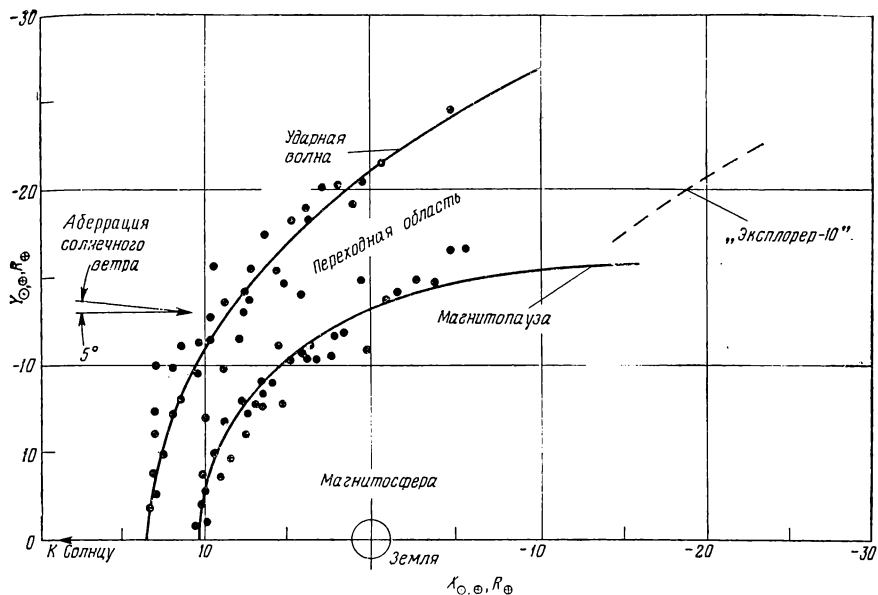


Рис. 12. Карта ударной волны и магнитопаузы, показывающая скорректированные пересечения границ спутником «ИМП-1» (точки) и их теоретическую форму (кривые). Приведена также геометрия магнитопаузы, определенная по данным «Эксплорера-10».

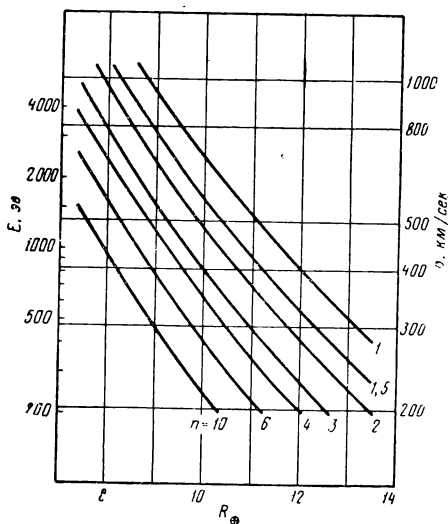


Рис. 13. Зависимость вычисленной энергии протонов E или скорости v от расстояния до магнитопаузы в подсолнечной точке для нескольких значений протонной концентрации n (см^{-3}). $R_c = \left(\frac{B^2}{4\pi n m v^2} \right)^{1/2} R_{\oplus}$; $B = 0,312$ гс.

где $B=0,312$ гс, так что

$$\frac{\delta R_c}{R_c} = \frac{1}{6} \frac{\delta(nmv^2)}{nmv^2}.$$

Для изменения положения магнитопаузы, соответствующего $\delta R_c/R_c \leq 0,1$, как это следует из наших данных, давление солнечного ветра в период первых 19 витков спутника «ИМП-1» может измениться не более чем на 60%. Свойства плазмы, рассчитанные на основе магнитных измерений при разумном использовании ньютоновской и аэродинамической теории течения потока, достаточно хорошо согласуются с фактическими плазменными

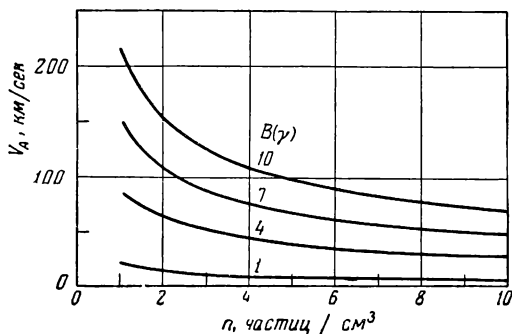


Рис. 14. Зависимость альвеновской скорости V_A от концентрации протонов для нескольких значений напряженности магнитного поля B . $V_A = \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho}}$; $\rho = nm$.

данными, полученными на «Эксплорере-18» с помощью модуляционной ловушки.

На рис. 14 приведен график зависимости альвеновской скорости V_A от концентрации протонов и напряженности магнитного поля. Если предположить, что для вычисления числа Маха для потока подходит лишь альвеновская скорость, то можно сравнить расстояния до ударной волны близ подсолнечной точки по данным «ИМП-1» с теоретическими значениями, вычисленными на основе задач об аэродинамическом обтекании затупленного тела при высоких скоростях или сверхальвеновском потоке. Ранее я уже отмечал (см. гл. 6), что напряженность межпланетного поля обычно находится в пределах 4—7 γ, временами изменяясь от 1 γ и вплоть до 10 γ [за исключением одного случая, когда, вероятно, был зарегистрирован след Луны (см. гл. 28)]. В гл. 6 также показано, что концентрация частиц близка к ~ 4 —6 протон/см³. Для этих значений концентрации частиц и напряженности магнитного поля альвеновская скорость ме-

няется от 40 до 75 км/сек. Для солнечного ветра со скоростью 400 км/сек соответствующие альвеновские числа Маха меняются от 7 до 10.

На рис. 15 представлена зависимость теоретических отношений расстояния до ударной волны к расстоянию до границы магнитосферы в точке остановки потока от альвеновских чисел Маха. Верхняя кривая соответствует модели аэродинамического потока вокруг затупленного тела для отношения теплоемкостей,

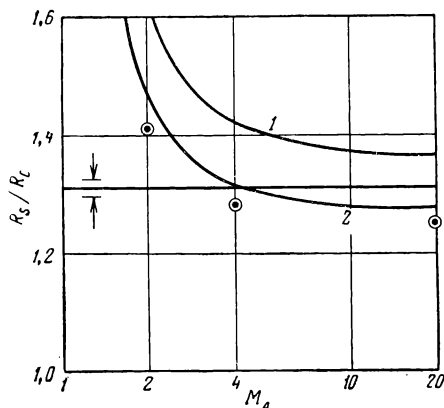


Рис. 15. Зависимость R_s/R_c от альвеновского числа Маха M_A , вычисленная для сферы (1) и для тела примерно такой же формы, как магнитосфера (2), при $\gamma=2$.

R_s — расстояние до фронта ударной волны, а R_c — расстояние от центра Земли до магнитопаузы (оба расстояния относятся к точке остановки потока).

Кривые заимствованы из [3], а кружочки с точками — из [4].

равного 2,0 [6]. Для сравнения приведена кривая для сферы. Стрелками указано значение, выведенное из магнитных данных; оно равно $1,31 \pm 0,01$. Таким образом, наблюдаемое отношение находится значительно ниже кривой, аппроксимирующей магнитосферу. Мы знаем, что происходит в случае сферы, когда отношение теплоемкостей изменяется от 2 до $5/3$; по-видимому, полученные результаты служат указанием на то, что значение 2,0 является слишком высоким и больше подходит значение, более близкое к $5/3$.

Рис. 16 суммирует наше представление об условиях в околоземном космическом пространстве. Предложенная интерпретация опирается на описанные выше магнитные данные. На рисунке показано слабое отклонение солнечного ветра; межпланетное магнитное поле начерчено под углом, соответствующим теорети-

ческому углу. Если орбиту «Эксплорера-10» повернуть вокруг прямой Земля — Солнце и совместить с плоскостью эклиптики, то положения границы, определяемые на «Эксплорере-10», достаточно хорошо согласуются с соответствующими значениями,

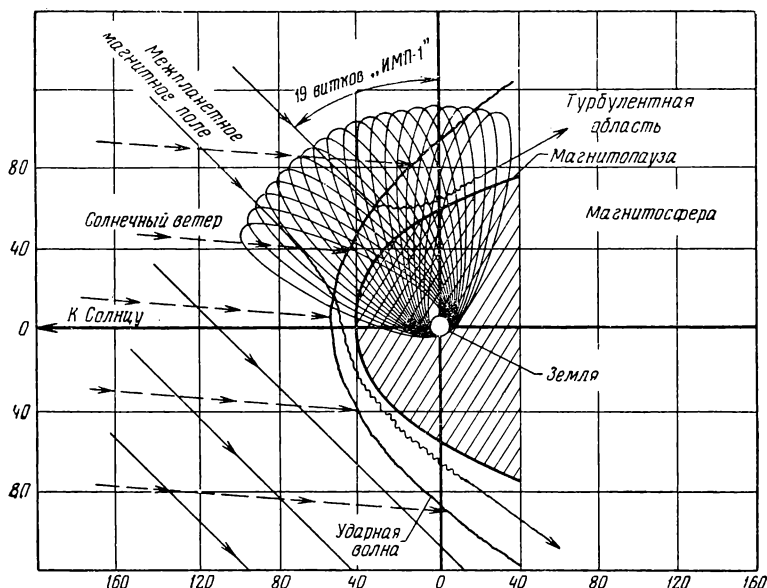


Рис. 16. Диаграмма околоземного космического пространства, построенная по данным спутника «ИМП-1». Диаграмма вычерчена в плоскости эклиптики. Расстояние дается в 10^3 миль (1миля $\approx 1,6$ км).

полученными на «ИМП-1». [Около точки остановки потока на «Эксплорере-12» наблюдалась магнитопауза на расстоянии $8-9 R_{\oplus}$ ¹⁾. Это явное расхождение могло возникнуть из-за возможного уменьшения давления солнечного ветра за время между наблюдениями этих двух спутников.]

Связь данных по плазме и магнитному полю

На рис. 17 иллюстрируется связь данных по магнитному полю с плазменными данными. Сравнение данных производилось совместно с экспериментаторами Массачусетского технологического института. Данные получены на нисходящей части 1-го витка, очень близко к прямой Земля — Солнце. Прохождение через

¹⁾ См. примечание переводчика на стр. 355. — Прим. ред.

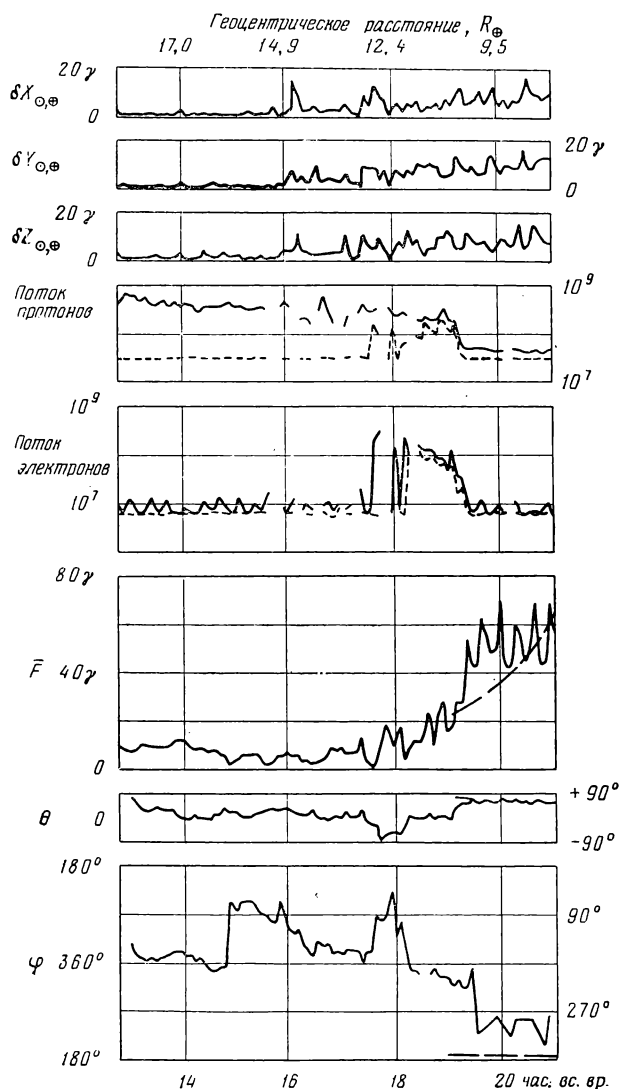


Рис. 17. Среднеквадратичное отклонение магнитного поля, интенсивность плазменного потока и магнитное поле на нисходящей части 1-го витка спутника «ИМП-1» 30 ноября 1963 г. Интенсивность потока протонов и электронов дается в единицах $\text{частиц}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$.

Сплошные линии представляют потоки в направлении от Солнца, штриховые линии — минимальные значения потоков.

магнитопаузу было зарегистрировано примерно в 19 час. 20 мин. вс. вр., когда внезапно увеличилась напряженность поля и произошло резкое изменение угла ϕ . В течение этого витка геомагнитное поле было почти перпендикулярным к плоскости эклиптики. Интенсивность потока электронов и потока протонов скачком упала до нуля, когда «ИМП-1» пересек границу на расстоянии $10,8R_{\oplus}$.

На основе магнитных данных ударная волна была помещена на расстояние $13,6R_{\oplus}$. Однако такой выбор границы плохо согласуется с плазменными данными: характеристики плазмы в этой области весьма переменны, но сказать что-либо еще затруднительно. В предположении изотропности плазменного потока можно было бы выбрать в качестве расстояния ударной волны значение $13,0R_{\oplus}$. С другой стороны, если при выборе положения ударной волны полагаться исключительно на среднеквадратичные отклонения магнитного поля, то волну можно поместить на расстоянии $14,7R_{\oplus}$ (~ 16 час. 10 мин. вс. вр.). За пределами этого расстояния плазма также была довольно однородной и устойчивой.

Другая интересная особенность, которая наблюдалась не более одного-двух раз, имела место примерно в 14 час. 50 мин. вс. вр.: в плоскости эклиптики магнитное поле изменило свое направление на $\sim 90^\circ$, а напряженность поля резко уменьшилась. Однако нам не удалось выявить какие-либо соответствующие изменения свойств плазмы или среднеквадратичного отклонения магнитного поля.

Заключение ¹⁾

Можно сделать вывод, что существует ударная волна, связанная с движением потока плазмы, огибающего Землю и ее магнитное поле. Возникновение волны можно понять на основе аэродинамической аналогии. Регистрация некоторых особенностей вне этой ударной волны указывает, что поток, огибающий Землю, имеет свойства непрерывного плазменного потока; тем не менее временами проявляется природа плазмы как совокупности частиц. Другое возможное объяснение состоит в том, что эти наблюдаемые явления могут быть результатом свойственной

¹⁾ Многие результаты по магнитному полю, касающиеся положения ударной волны, магнитопаузы и переходной области, подтверждаются данными, полученными на спутниках «ИМП-2», «ОГО-1», «ИМП-3» [9*]. — *Прим. перев.*

плазме неустойчивости. Более детальное исследование связей между плазменными и магнитными данными предстоит сделать в ближайшем будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cahill L. J., Amazeen P. G., J. Geophys. Res., **68**, 1835 (1963).
2. Heppner J. P., Ness N. F., Searce C. S., Skillman T. L., J. Geophys. Res., **68**, 1 (1963).
3. Cahill L. J., I. G. Bulletin 79, Trans. Amer. Geophys. Union, **45**, 231 (1964).
4. Dessler A. J., J. Geophys. Res., **66**, 3587 (1961).
5. Dessler A. J., J. Geophys. Res., **67**, 4892 (1962).
6. Spreiter J. R., Jones W. P., J. Geophys. Res., **68**, 3555 (1963).
7. Kellogg P. J., J. Geophys. Res., **67**, 3805 (1962).
- 8*. Cahill L. J., Ratel V. L., Planet. Space Sci., **15**, № 6, 997 (1967).
- 9*. Ness N. F., Observations of the solar wind interaction with the geomagnetic field: conditions quiet, GSFC Res. Rept. X-612-66-381, 1966. (Русский перевод в сб. «Солнечно-земная физика», М., изд-во «Мир», 1968.)
- 10*. Finch H. F., Leaton B. R., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl., **7**, 314 (1957).

ФОРМА МАГНИТОСФЕРЫ
И ВОЗМУЩЕНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ¹⁾

Г. Д. Мид

Основные предположения

Пока основной упор делался на гидродинамический подход к исследованию магнитосферы. В настоящем сообщении я хотел бы рассмотреть некоторые аспекты ньютоновского приближения. Две причины, по которым я считаю возможным высказаться в защиту метода Чепмена — Ферраро, состоят в следующем.

Во-первых, до сих пор только ньютоновский подход дал нам довольно подробные теоретические данные как о форме магнитосферы, так и о напряженности и направлении магнитного поля внутри нее. Теоретические расчеты можно было детально сравнить с данными наблюдений. Во-вторых, вряд ли допущения, опирающиеся на ньютоновское приближение, оказываются несправедливыми, даже если учитывать ударную волну, предсказываемую гидродинамическим анализом. И наконец, я полагаю, что в ряде очень важных областей результаты ньютоновской теории согласуются с данными «Эксплорера-12» и «ИМП-1». Таким образом, ньютоновский подход не может быть слишком ошибочным.

Поэтому я хотел бы рассмотреть допущения, на которых основана ньютоновская теория, и попытаться установить справедливость результатов, полученных при этих допущениях. Кое-что по этому вопросу мной уже опубликовано [1, 2]²⁾.

Прежде всего предположим, что магнитосфера замкнута, другими словами, что пересоединение силовых линий геомагнитного и межпланетного полей (подробнее об этом см. гл. 17—19) не играет существенной роли, по крайней мере для рассматриваемых нами задач. (Как сообщалось в гл. 18, вероятно, ~10% магнитных силовых линий пересоединяется.)

¹⁾ См. гл. 16, а также [8*—16*]. — *Прим. перев.*

²⁾ К этим работам можно добавить еще две недавно опубликованные [5*, 6*]. — *Прим. перев.*

Далее будем считать, что магнитопауза (но не ударная волна) определяется равенством магнитного давления внутри магнитосферы и давлением плазмы снаружи. Вряд ли на это равенство давлений оказывает существенное влияние присутствие ударной волны или то, что поток за пределами магнитопаузы ведет себя как сплошной.

Давление внутри магнитопаузы просто равно $B^2/8\pi$. Но следует быть очень осторожным при выборе значения B . Используемое мною значение является самосогласованным: используется приближение высокого порядка, получаемое методом итераций. Таким путем удастся избежать задачи, в которой необходимо было знать форму магнитосферы для определения B , и наоборот.

Давление плазмы снаружи равно $2nmv^2 \cos^2 \psi$, где ψ — угол между вектором скорости солнечного ветра и нормалью к поверхности. По-видимому, это значение следует уменьшить вдвое из-за термализации плазмы при ее прохождении через ударную волну. Это уменьшение окажет влияние на размер, но не на форму магнитопаузы. Множитель $\cos^2 \psi$ также может оказаться неточным. Однако показатель степени $\cos \psi$ должен быть близким к 2 или к 1,5. Я не думаю, что точное значение окажет существенное влияние на результат.

Таким образом, хотя используемые здесь формулы основаны на ньютоновском приближении, кажется вероятным, что приближение сплошной среды даст довольно похожие граничные условия.

До настоящего времени мы предполагали, что вектор скорости солнечного ветра является перпендикулярным к вектору диполя. Это означает, что наши результаты справедливы лишь вблизи равноденствий. Зимой и летом эти результаты необходимо несколько видоизменить.

Форма магнитосферы

На рис. 1 представлена форма магнитосферы, определенная из условия равенства давлений на поверхности через интервалы 5° . Точность равенства составляет доли процента. Результаты представлены в системе координат, начало которой расположено в центре Земли, а ось Z направлена по прямой Земля — Солнце; θ — полярный угол, а ϕ — азимут, причем для плоскости экватора $\phi = 0^\circ$. Расстояние выражается в единицах $r_0 = (M^2/4\pi n m v^2)^{1/2}$, где M — магнитный момент земного диполя, а $2nmv^2$ — давление солнечного ветра на границу магнитосферы в подсолнечной точке. Самая верхняя кривая на рисунке изображает границу в плоскости экватора, а самая нижняя — границу в плоскости полуденного меридиана. Как отмечалось Бердом [3], поверхность

магнитосферы с дневной стороны представляет собой почти точную полусферу. Точка, обозначенная буквой N , отмечает положение нулевой точки магнитного поля.

Заметим, что все магнитные силовые линии справа сливаются. Это означает, что на больших расстояниях с ночной стороны Земли поверхность по существу становится цилиндрической, с

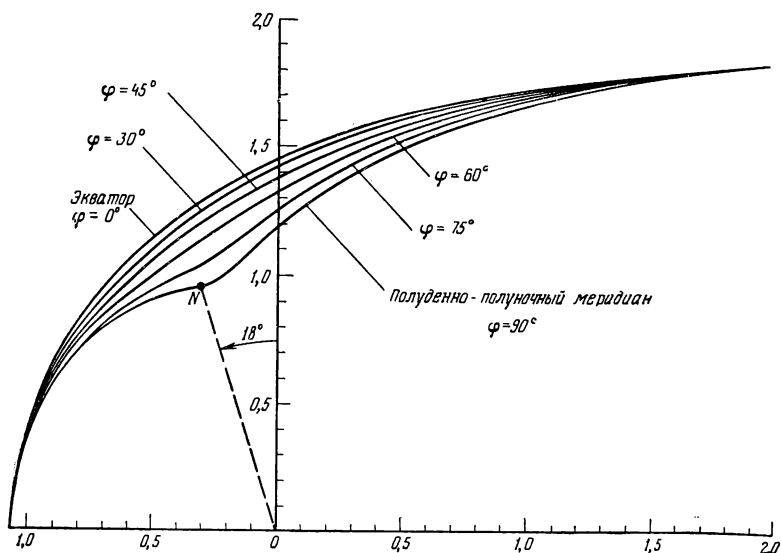


Рис. 1. Сечение вычисленной границы геомагнитного поля плоскостями с различными φ .

Пересечение границы с плоскостью $\varphi=15^\circ$ не показано, поскольку оно практически совпадает с границей сечения с $\varphi=0$. Солнце расположено слева.

открытой полостью. К сожалению, такая форма плохо согласуется с данными «Эксплорера-10», согласно которым на ночной стороне поверхность магнитосферы может расширяться под довольно большим углом. Это несоответствие может быть вызвано рядом причин. Быть может, существует дополнительное внутреннее магнитное давление или давление плазмы, которое не было учтено. Возможно и другое объяснение: наружное давление может быть значительно меньше или будет уменьшаться с гораздо большей скоростью по сравнению с предсказанной на основе нашей теории. Мне кажется, что это основное расхождение (если оно реально существует) объясняется присутствием значительных внутренних источников давления, не учтенных в теории. Спутник «ИМП-1» еще не пересекал эту область пространства и

данные, которые будут получены на нем в течение следующих двух месяцев, представят значительный интерес.

На рис. 2 представлены результаты расчетов формы магнитосферы, если смотреть со стороны Солнца. Обратите внимание

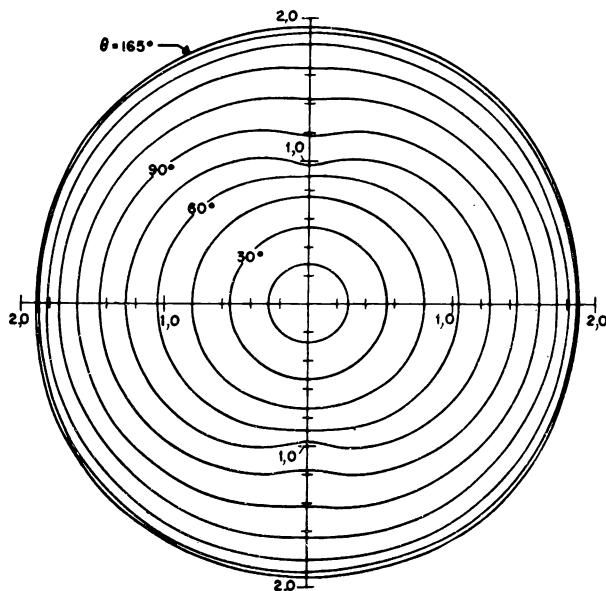


Рис. 2. Вид магнитопаузы со стороны Солнца.

Каждая кривая является пересечением с одной из поверхностей постоянных значений θ (угол, образуемый с линией Земля — Солнце). Расстояния по осям даны в единицах $r_0 = (M^2/4\pi\mu v^2)$.

на впадины около нулевых точек. При больших углах к прямой Земля — Солнце магнитопауза имеет форму цилиндра (внешняя окружность).

Действие температуры солнечного ветра

Для исключения предположения о нулевой температуре была исследована модель, в которой плазме приписывалась как скорость направленного движения, так и кинетическая температура. Плазма создает поперечное давление на границу и тем самым замыкает ее. Характер смыкания границы в зависимости от предполагаемой температуры показан на рис. 3. Разумеется, подобные модели нельзя применять без ряда оговорок. Параметр β эквивалентен параметру θ , приведенному Нейгебауэр (см. гл. 1). Он представляет собой отношение плотности тепловой энергии к

энергии направленного движения. Согласно [8], обычно $\beta \approx 0,01$ и очень редко превышает 0,02. При положении границ в подсолнечной точке на расстоянии $10R_{\oplus}$ и $\beta = 0,01$ смыкание границы начи-

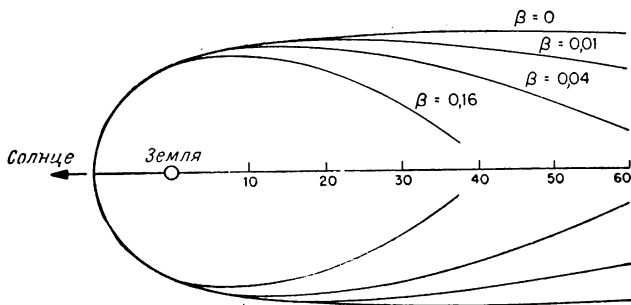


Рис. 3. Форма магнитопаузы для нескольких значений $\beta = 2kT/mv^2$ (отношение тепловой энергии к энергии направленного движения плазмы). Расстояние выражается в $R_{\oplus}$.

нается с расстояния $\sim 60R_{\oplus}$, т. е. вблизи орбиты Луны. Таким образом, можно думать, что близ лунной орбиты влияние магнитосферы все еще сказывается¹⁾.

Магнитное поле внутри магнитосферы

Расчет магнитного поля внутри магнитопаузы основан на ряде других предположений, большинство из которых, как нам кажется, достаточно надежны. Основное предположение заключается в том, что внутри границы ротор магнитного поля равен нулю. Другими словами, магнитное поле создается токами на границе, а не внутри границы, т. е. в области, где предстоит определить возмущенное магнитное поле, токи отсутствуют. Если бы существовали большие токи вблизи Земли, то наше предположение, а следовательно, и полученные результаты, оказались бы неверными.

Сделанное предположение позволяет выразить возмущенное магнитное поле в виде отрицательного градиента скалярного потенциала, который можно разложить в ряд по сферическим гармоникам. Предполагается, что солнечный ветер направлен перпендикулярно к дипольному полю и параллелен прямой Земля — Солнце. В этом случае магнитное поле обладает двумя плоскостями симметрии: относительно экваториальной плоскости и пло-

¹⁾ По-видимому, об этом же свидетельствуют данные «Эксплорера-33» [7*]. — *Прим. перев.*

скости полуденного меридиана. Такая симметрия понижает число ненулевых коэффициентов в разложении, и поле внутри магнитосферы можно описать посредством всего нескольких членов.

В сферической системе координат, в которой θ — коширота, а φ — местное время, отсчитываемое от полуночного меридиана, основные члены составляющих магнитного поля имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} B_r &= -\frac{0,62 \cos \theta}{r^3} - g_1^0 \cos \theta - 2\sqrt{3} g_2^1 r \sin \theta \cos \theta \cos \varphi, \\ B_\theta &= -\frac{0,31 \sin \theta}{r^3} + g_1^0 \sin \theta - \sqrt{3} g_2^1 r (2 \cos^2 \theta - 1) \cos \varphi, \\ B_\varphi &= \sqrt{3} g_2^1 r \cos \theta \sin \varphi, \end{aligned}$$

где r выражается в единицах $R_\oplus$.

Члены, содержащие g_1^0 , дают постоянное поле северного направления везде внутри магнитосферы. Это поле должно иметь северное направление ввиду наличия северо-южной и восточно-западной симметрий. Члены, содержащие g_2^1 , дают градиент поля, который возрастает в направлении к Солнцу. Ввиду этого поле не обладает азимутальной симметрией.

Коэффициенты g_1^0 и g_2^1 зависят от интенсивности солнечного ветра через параметр r_b — расстояние до границы магнитосферы в подсолнечной точке:

$$\begin{aligned} g_1^0 &= -\frac{0,2515}{r_b^3} \text{ эс}, \\ g_2^1 &= -\frac{0,1215}{r_b^4} \text{ эс}. \end{aligned}$$

При $r_b = 10R_\oplus$ $g_1^0 = 25\gamma$, т. е. ток на поверхности магнитосферы создает вблизи Земли поле 25γ .

На рис. 4 представлено возмущенное магнитное поле в экваториальной плоскости. В направлении на Солнце напряженность поля у внутренней границы магнитосферы превышает более чем в 2 раза напряженность невозмущенного геомагнитного поля. Вдали от прямой Земля — Солнце это отношение все еще равно ~ 2 .

На рис. 5 представлены напряженность магнитного поля вместе с углами δ и ϵ для 30° северной широты. Эти углы определяют направление поля и аналогичны углам θ и φ , введенным Хэппнером и др. [4] и Нессом (гл. 6 и 22). Угол δ — это угол, образуемый вектором поля с плоскостью эклиптики, а ϵ — азимутальный угол между прямой Земля — Солнце и составляющей вектора поля в плоскости эклиптики. Из рис. 5 видно, что на-

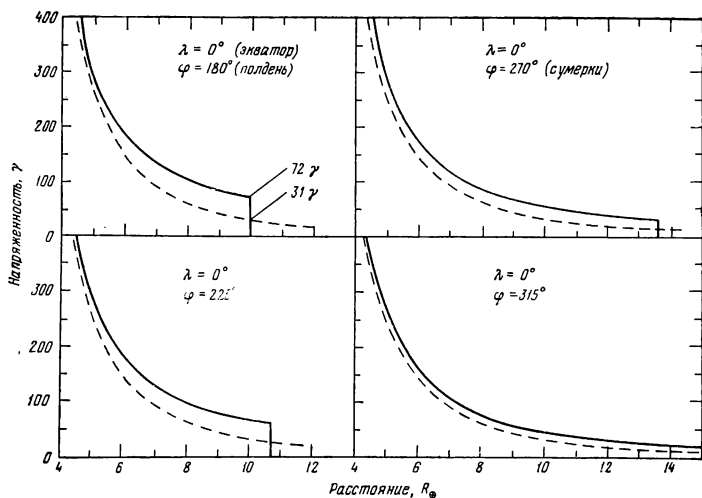


Рис. 4. Сравнение напряженности возмущенного магнитного поля (сплошная линия) с невозмущенным дипольным полем (штриховая линия) в экваториальной плоскости ($\lambda=0^\circ$).

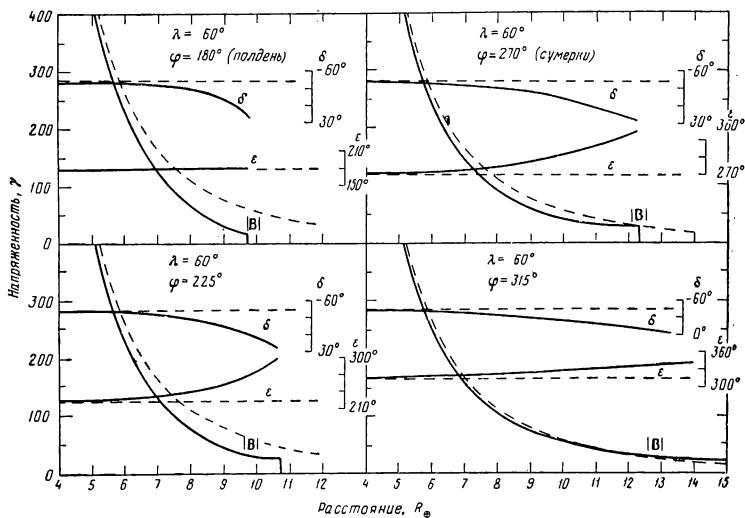


Рис. 5. Сравнение напряженности и направления возмущенного поля (сплошная линия) с невозмущенным полем (штриховая линия) при северной широте $\lambda=30^\circ$.

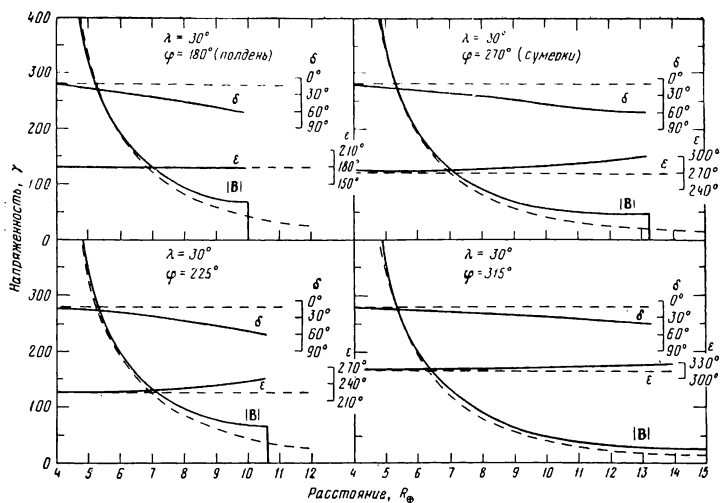


Рис. 6. Сравнение напряженности и направления возмущенного магнитного поля (сплошная линия) с невозмущенным дипольным полем (штриховая линия) при северной широте $\lambda=60^\circ$.

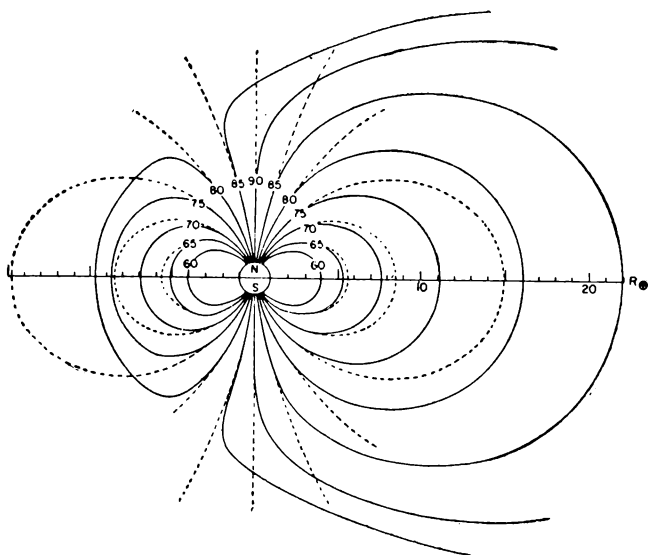


Рис. 7. Конфигурация возмущенного поля (сплошные линии) и невозмущенного дипольного поля (штриховые линии) в плоскости полуденного меридиана.

пряженность и направление полного поля значительно отклоняются от дипольного. На рис. 6 приведены аналогичные графики для широты 60° .

На рис 7 представлена конфигурация магнитных силовых линий, построенных по нашим расчетам. Из рисунка видно, что поле сдвинуто как с дневной, так и с ночной стороны. Таким образом, трудно согласиться с замечанием Данжи (см. гл. 17), что магнитные силовые линии сжимаются на дневной стороне и вытягиваются на ночную сторону.

Итак, ньютоновский метод позволяет сделать довольно точные расчеты возмущенного поля. Думается, что для анализа данных по захваченным частицам важно понять, где проходят магнитные силовые линии. Вот почему я пытаюсь сейчас видоизменить эти расчеты посредством включения некоторых неньютоновских представлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mead G. D., Beard D. B., J. Geophys. Res., **69**, 1169 (1964).
2. Mead G. D., J. Geophys. Res., **69**, 1181 (1964).
3. Beard D. B., J. Geophys. Res., **65**, 3559 (1960).
4. Heppner J. P., Ness N. F., Searce C. S., Skillman P. L., J. Geophys. Res., **68**, 1 (1963).
- 5*. Beard D., Radiation trapped in the earth's magnetic field, ed. McCormac B. M., D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 1966, p. 457.
- 6*. Mead G. D., Cahill L. J., J. Geophys. Res., **72**, № 11, 2737 (1967).
- 7*. Ness N. F., Behannon K. W., Cantarano S. C., Searce C. S., J. Geophys. Res., **72**, № 3, 927 (1967).
- 8*. Chapman S., Geophysics, The Earth's Environment, eds. C. de Witt, J. Hiebolt, A. Lebeau, Gordon and Breach, New York, 1963. (Русский перевод в сб. «Околоземное космическое пространство», М., изд-во «Мир», 1964, стр. 243.)
- 9*. Beard D. B., Rev. of Geophys., **2**, № 2, 335 (1964).
- 10*. Mead G. B., Radiation trapped in the earth's magnetic field, ed. McCormac B. M., D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 1966, p. 481.
- 11*. Parker E. N., Radiation trapped in the earth's magnetic field, ed. McCormac B. M., D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 1966, p. 302.
- 12*. Spreiter J. R., Summers A. L., Alksne A. Y., Planet. Space Sci., **14**, № 3, 223 (1967).
- 13*. Лиз Л., Ракетная техника и космонавтика, **2**, № 9, 74 (1964).
- 14*. Калинин Ю. Д., в кн. «Геофизика 1964», М., изд-во ВИНТИ АН СССР, 1965, стр. 133.
- 15*. Самохин М. В., Геомагнетизм и аэрономия, **6**, № 3, 582 (1966).
- 16*. Самохин М. В., Геомагнетизм и аэрономия, **7**, № 2, 248 (1967).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДОВ ЛАЙОНА, НЕССА И МИДА

Изменчивость переходной области

Скарф. Сравнение данных плазменного зонда с данными магнитометра, полученными на нисходящей части 1-го витка «Эксплорера-18» (см. рис. 17 из гл. 22), показывает, что переходная область может быть исключительно ши-

рокой и сложной по структуре. Я хотел бы вернуться к объяснению сверхзвукового потока Эксфордом и прокомментировать происхождение некоторых трудностей.

Чтобы оправдать использование непрерывного потока для взаимодействия бесстолкновительной плазмы и магнитного поля, исследуются волны, возникающие в переходной области. Если скорость солнечного ветра v_0 больше любой допустимой скорости волны, то в таком случае поток является «сверхзвуковым». Поскольку v_0 значительно больше локальной альвеновской скорости, то принято связывать сверхальвеновский поток с наличием четко выраженного фронта ударной волны. Однако, как указывал Эксфорд, из граничной поверхности могут генерироваться волны другого типа. Одним из таких типов волн является продольная ионная звуковая волна¹⁾. Скорость такой волны равна $\sqrt{\gamma k T_e / m_p}$, где $k T_e$ — тепловая энергия электрона, m_p — масса иона, а $\gamma \geq 1$ зависит от функции распределения электронов по скоростям. Для $\gamma = 1$ и $T_e = T_i$ скорость ионной волны несколько меньше альвеновской скорости. Следовательно, набегающий поток является сверхзвуковым по отношению как к звуковым, так и к альвеновским волнам. Фактически при $T_e = T_i$ ионные волны сильно затухают, так что в этом случае их можно не рассматривать.

Однако, если нелинейные эффекты, связанные, например, с электрическими полями, возникающими в результате разделения зарядов, приводят к локальному увеличению отношения T_e/T_i , то затухание ионных волн становится несущественным. Для возникновения неустойчивости достаточно наличия даже очень слабого тока или электронно-протонной дрейфовой скорости²⁾. По данным модуляционной ловушки во внешней части переходной области электроны термализуются гораздо больше, чем ионы. Учитывая равное распределение энергии по степеням свободы, мы получаем, что максимально возможное значение $k T_e$ равно $m_p v_0^2 / 4$ с понижением в результате локальной дрейфовой скорости ионов до $\sim v_0 / \sqrt{2}$. После такой термализации скорость ионной волны равна $\sqrt{\gamma} (v_0 / 2)$, и скорость волны достигает локальной скорости иона $v_0 / 2$ или превышает ее.

Предположим, что ионноволновая неустойчивость достаточна для объяснения уширения и изменчивости переходной области, появления вверх по потоку предвестников, всплесков сверхтепловых электронов и временных исчезновений четко выраженной внешней границы. Поскольку частота ионной волны перекрывает локальную электронную gyroчастоту

$$v_{\max} = \frac{\sqrt{k T_e / m_p}}{\lambda_D}$$

(где λ_D — дебаевская длина), то взаимодействие волн и частиц может нарушить распределение скоростей электронов низких энергий (0,5—3 кэВ) и привести к образованию небольшого немаксвелловского хвоста распределения

¹⁾ О регистрации таких волн с помощью спутника во внешней магнитосфере и в переходной области сообщалось в работе: F. U. Scarf, G. M. Crook, R. W. Fredericks, J. Geophys. Res., **70**, № 13, 3045 (1965). Подробнее о плазменных волнах см. В. Л. Гинзбург, Распространение электромагнитных волн в плазме, 2-е переработан. изд., М., изд-во «Наука», 1967. — Прим. перев.

²⁾ W. Bernstein, R. W. Fredricks, F. L. Scarf, J. Geophys. Res., **69**, 1201 (1964).

($E \geq 30$ кэв). (При экспериментах в Окридже¹) легко возникают вследствие пучковой неустойчивости плазмы электроны с энергией 100 кэв. Стикс показал²), что в этом случае электронные плазменные волны взаимодействуют с частицами посредством электронного циклотронного резонанса.) Это возмущение приводит к созданию всплесков электронов высокой энергии, особенно в областях, где локальная неупорядоченность магнитного поля невелика. В результате возмущения γ растет, а область источника ионных волн из-за быстрых процессов диффузии расширяется. Набегающий ветер становится менее сверхзвуковым, а небольшие флуктуации позволяют изолированным предвестникам перемещаться вверх по течению, передавая энергию ионных волн изолированным электронным выбросам. Когда возмущение распределения скорости является достаточно большим, набегающий ветер становится дозвуковым по отношению к ионным акустическим волнам, а весь слой ослабляется, пока следующее усиление интенсивности солнечного ветра не даст начало новому неустановившемуся процессу.

Голд. Я хочу прокомментировать данные 13-го витка, которые рассматривал Лайон. Насколько справедливо предложенное им изменение динамического давления? Расстояние до ударной волны в подсолнечной точке зависит в конце концов от того, что происходит за фронтом ударной волны, и особенно от того, что там уже существовало. Разве не могло произойти сильных изменений среды в течение 13-го витка? Например, если в это время снаружи существовало поле с очень большой кривизной линий, то после прохождения через ударную волну кривизна линий увеличится. В итоге поле оказалось бы в среде со значительно меньшим давлением, чем необходимо для его сжатия. По-видимому, поле с очень искривленными линиями создаст значительно более длинные пути, чем поле с более или менее параллельными линиями. Другими словами, наиболее подходящим значением γ является $\frac{5}{3}$, но это значение не зависит от случайной геометрии накладываются полей. Возможно, что в период 13-го витка магнитное поле было сильно искривленным, а это привело к значительному уменьшению расстояния до ударной волны.

Лиз. В тех местах, где существует много степеней свободы, γ может достигать 1.

Несс. Магнитные данные были приведены для 6-го витка; графики для 13-го витка не построены. По-видимому, условия для 13-го и 6-го витков были различными. Но данные 6-го витка, в течение которого наблюдался целый ряд неясных явлений, свидетельствуют, что поле за пределами ударной волны было очень устойчивым. Безусловно, для выяснения состояния поля в период 13-го витка и для выяснения вопроса, было ли высоким среднеквадратичное отклонение магнитного поля, необходим дополнительный анализ.

Фримен. Я хотел бы сделать пояснение относительно переменности положения границы. Думается, что это позволит поместить данные «ИМП-1» на соответствующее место в цикле солнечной активности.

В период 112 дней жизни «Эксплорера-12», запуск которого на 2,5 года предшествовал нынешней фазе солнечной активности, наблюдались три магнитные бури, амплитуда главных фаз которых превышала 100 γ . Данные «Эксплорера-12» за первые 2,5 месяца его полета указывают на то, что среднее расстояние до границы магнитосферы составляло примерно 10 $R_{\oplus}$ (более

¹) I. Alexeff, R. W. Neidigh, W. F. Peed, E. D. Shipley, E. G. Harris, Phys. Rev. Letters, **10**, 273 (1963); И. Ф. Харченко, Я. Б. Файнберг, Р. М. Николаева, Е. А. Корнилов, Е. И. Лутченко, Н. С. Педенко, Ядерный синтез, Дополнение 1962, ч. 3, 1962, стр.1101; L. D. Smullin, W. D. Getty, Phys. Rev. Letters, **9**, № 2, 3 (1962).

²) T. H. Stix, Princeton University Plasma Physics Laboratory MATT-239, Princeton Univ., 1964.

точно 66 000 км). Наиболее близкое положение границы составляло $8,5 R_{\oplus}$, но иногда граница удалялась за пределы апогея спутника, т. е. на расстояние более $13 R_{\oplus}$ ¹⁾. Указанные крайние положения границы наблюдались несколько раз²⁾. Таким образом, «Эксплорер-12» регистрировал более изменчивый характер положения границы магнитосферы³⁾ по сравнению с тем, что было обнаружено с помощью спутника «ИМП-1»⁴⁾. Этого и следовало ожидать, поскольку в период полета «Эксплорера-12» имела место более сильная магнитная активность.

Несс. Ваше утверждение, что среднее расстояние до магнитопаузы составляло $\sim 10 R_{\oplus}$, указывает на удивительно длительное постоянство солнечного ветра. Если среднее давление ветра в течение 2,5 лет солнечного цикла примерно постоянно, то хотя другие проявления солнечного цикла имеют значительно большую изменчивость, тем не менее можно сделать вывод, что на поверхности Солнца существует какой-то устойчивый физический процесс.

Слуц. Не может ли постоянство положения магнитопаузы свидетельствовать о малой чувствительности корня шестой степени к изменению аргумента? Теоретически расстояние от центра Земли до магнитопаузы пропорционально корню шестой степени из давления. Приведенные выше числа (8 и $13 R_{\oplus}$) соответствуют изменению давления в солнечном ветре в 18 раз. В выступлении Мида очень наглядно объяснены трудности исследования оттекания потока магнитосферы. Поскольку этот поток воздействует на форму ночной части магнитосферы, то возникает очень широкий перепад давлений, начиная от давления с дневной стороны и до давления с ночной стороны. Тем не менее форма магнитосферы получается почти одинаковой, что опять-таки свидетельствует о малой чувствительности корня шестой степени. Интересно, однако, то, что требуется весьма слабое давление с ночной стороны, чтобы удерживать ночную часть магнитосферы на расстоянии всего лишь $25\text{--}35 R_{\oplus}$.

Вилкерсон. Вероятно, за пределами границы магнитосферы существуют довольно регулярные колебания интенсивности потока электронов. За 2-часовой период наблюдалось около 6 колебаний. Эти колебания, как мне кажется, вызваны структурой солнечного ветра или создаются на Солнце.

Лайон. Это явление иногда наблюдается, а иногда нет, но все же эффект, по-видимому, является реальным.

Эксфорд. Что касается наблюдений флуктуаций на фронте бесстолкновительной ударной волны, то следует иметь в виду, что такая волна очень похожа на волну, возникающую на поверхности потока жидкости при оттекании препятствия. Возмущение, возникающее при оттекании рекой устоев моста, является довольно резким, но при этом вся картина колеблется, т. е. существуют значительные мелкомасштабные флуктуации. Аналогичной хаотической структуры следует ожидать и в бесстолкновительной ударной волне.

¹⁾ Положение границы магнитосферы по магнитным данным «Эксплорера-12» можно найти в работе: L. J. Cahill, V. L. Patel, Planet. Space Sci., 15, № 6, 997 (1967). — *Прим. перев.*

²⁾ Положение границы магнитосферы определялось с помощью детекторов высокоэнергичных заряженных частиц, установленных на «Эксплорере-12» [см. J. W. Freeman, J. Geophys. Res., 69, 1691 (1964)].

³⁾ В этой связи укажем на работу J. W. Freeman, L. D. Kavanaugh, L. J. Cahill, J. Geophys. Res., 72, № 7, 2040 (1967), где освещается вопрос об изменчивом положении границы в период работы «Эксплорера-12». — *Прим. перев.*

⁴⁾ О положении границы, наблюдаемой с помощью спутника «ИМП-1» см. гл. 22. — *Прим. перев.*

Смит. Я хотел бы спросить Несса. У вас была возможность наблюдать в периоды измерений с помощью феррозондового магнитометра флуктуации с довольно высокой частотой? Скарф только что указал, что высокочастотные флуктуации могут играть важную роль. Вы рассматривали эту проблему?

Несс. Этот вопрос нуждается в дальнейшем исследовании. Но при этом следует иметь в виду ограничения, накладываемые методами измерения и обработки данных и диапазоном спектра, который можно изучать. Замер длится в течение 5 сек и повторяется через каждые 20 сек. Замеры через каждые 20 сек приводят к частоте, кратной 0,025 гц. Поскольку производится сглаживание, то можно ожидать, что окончательный спектр будет свободным от стробоскопического эффекта.

Смит. На некоторых витках на «Эксплорере-12» наблюдались очень сильные магнитные поля. Полная амплитуда колебания составляла ~ 50 γ с довольно большим периодом. Наблюдали ли вы поля со сравнимыми амплитудами? Если нет, то, вероятно, это дает еще одно указание на изменение условий на Солнце.

Несс. «Эксплорер-12» находился в магнитосфере значительно глубже по сравнению с теми положениями, которые рассматривались мной.

Смит. Наблюдения, которые я имею в виду, были получены в переходной области за пределами характерного изменения направления поля, которое указывает на окончание магнитосферы. Кроме того, очень большие изменения поля наблюдались на «Пионере-1»: полная амплитуда изменения составляла от 50 до 100 γ. Из среднеквадратичных отклонений и из ваших усредненных данных довольно трудно определить, наблюдали ли вы такие большие флуктуации.

Несс. Нет, таких флуктуаций мы не наблюдали.

Смит. Какова была максимальная амплитуда по вашим данным?

Несс. Вблизи прямой Земля — Солнце максимальное наблюдаемое среднее значение составляло 10—20 γ, а максимальное среднеквадратичное отклонение поля было около 5—15 γ.

Петчек. Не было ли возможности поискать связи между направлением магнитного поля впереди ударной волны и появлением переходной области и предвестника? Дело в том, что и волны и частицы легче распространяются вдоль магнитных силовых линий. Поэтому, если магнитное поле перпендикулярно к ударной волне, то следует ожидать более широкой ударной волны и больше предвестников.

Несс. Такие поиски пока не производились.

Берд. Если проследить за траекториями отдельных частиц, то легко показать, что при движении из слабого межпланетного поля в переходную область, в которой магнитное поле в 2—3 раза больше, на границе возникнет электрическое поле, а все направленное движение протонов будет передаваться электронам, которые проходят через эту границу. Таким образом, электроны в переходном слое будут обладать энергией ~ 1 кэв, что близко к цифре, названной Эксфордом.

В этой связи у меня вызывают сомнения измерения плазмы на «ИМП-1». Спутник в среде с большим количеством электронов с энергией ~ 1 кэв станет отрицательно заряженным до потенциала 1 кэв. Все зарегистрированные плазменным зондом протоны должны пройти через этот потенциал и, следовательно, будут иметь очень высокую энергию. Хотя вторичные электроны и в значительно меньшей степени фотоэлектроны могут понизить этот потенциал, тем не менее я сомневаюсь, что можно полностью исключить этот потенциал для большинства материалов поверхности спутника.

Несс. К сожалению, Сербу не присутствует здесь и не сможет ответить на этот важный вопрос. Я полагаю, что его эксперимент с ионной ловушкой свидетельствует об отсутствии заряда спутника, исключая отрицательный потенциал 1—2 в.

Блок. Можно ли измерить заряд спутника?

Бридж. Я не знаю, как это сделать. Были разработаны кое-какие приборы, чтобы получить информацию о заряде спутника в ионосфере. Но я не уверен, что любой из этих методов можно использовать в космическом пространстве на большом расстоянии от Земли. Я полагаю, что может помочь теория¹⁾.

Что касается влияния электронов с энергией 1 кэв, то для таких электронов, падающих на металлические поверхности, скорость образования вторичных электронов достаточно велика, чтобы аннулировать входящий ток и поддерживать потенциал спутника вблизи нуля.

Люст. Иногда в рассматриваемых задачах существенным параметром считается дебаевский радиус, иногда гирорадиус. Не пояснит ли этот вопрос Эксфорд?

Эксфорд. Когда я говорю, что минимальная толщина бесстолкновительной ударной волны равна гирорадиусу, то я стараюсь быть консервативным. Однако иногда газ будет вести себя до некоторой степени как жидкость, даже если размеры тела в потоке достигают нескольких дебаевских радиусов.

Голд. Для развития неустойчивости течения размер тела должен составлять много дебаевских радиусов.

Открытая или закрытая магнитосфера

Дэвис. Мы уже обсуждали вопрос, соединяются ли магнитные силовые линии геомагнитного и межпланетного полей через магнитопаузу, или нет. Из данных «ИМП-1» следует, что при прохождении через границу в магнитном поле наблюдается разрыв. Если такой разрыв существует и магнитные силовые линии не пересекают границу, то в таком случае поверхность границы можно определить по поведению магнитных силовых линий по обе ее стороны. Указывают ли данные «ИМП-1» на наличие заметной границы?

Несс. Пока данные, необходимые для определения формы поверхности, еще не обработаны. Вероятно, мы получим значительный разброс, если поверхность не является идеально гладкой или если она изменяется со временем. Такой разброс мог бы затруднить выявление этой весьма критичной меры связности.

Смит. Регистрировалась ли плазма внутри магнитосферы?

Лайон. Регистрировались лишь электроны, но не протоны.

Ночная сторона магнитосферы

Слутц. Я хотел бы привести пример вычисления, которое достаточно хорошо согласуется с расчетами Мида лобовой части магнитосферы, но дает совершенно другую картину для ночной стороны магнитосферы.

Я довел до конца самосогласованное решение, в котором давление взято в виде $A + B \cos^2 \psi$, и получил полное решение как для лобовой, так и для ночной части магнитосферы. Постоянную A можно интерпретировать как давление за счет теплового движения, тогда как B — за счет направленного. Эти расчеты показывают существование довольно обширной и плоской поверхности на ночной части магнитосферы. Если положить $A = 10^{-2} B$, как это следует из данных «Маринера-2», то граница с ночной стороны будет

¹⁾ Теоретические исследования явлений, возникающих в сильно разреженной плазме в окрестности движущихся в ней тел, выполнены Я. Л. Альпертом, А. В. Гуревичем, Л. П. Питаевским (Искусственные спутники в разреженной плазме, М., изд-во «Наука», 1964). — *Прим. перев.*

простирается до $\sim 25 R_{\oplus}$. Если принять $A=10^{-3} B$, то она будет простирается до $35 R_{\oplus}$. При $A=10^{-4} B$ (что совершенно неразумно) граница отодвинется всего лишь до $40-50 R_{\oplus}$.

Возникает интересный вопрос. Поток солнечного ветра не может сомкнуться за такой короткой и плоской границей. Я предполагаю в соответствии с аэродинамической аналогией потока вокруг довольно затупленного тела, что с ночной стороны существует вторая область, в которой жидкость срывается с границы, и эта вторая область, может быть, оканчивается на очень большом расстоянии. Эта вторая область является «заводью» турбулентности солнечного ветра. Давление в ней может быть очень небольшим и тем не менее ограничивать заднюю поверхность магнитосферы на расстоянии $25-35 R_{\oplus}$. Эксперименты в реальной жидкости показывают, что давление в такой области в 2—3 раза превышает статическое давление в текущей жидкости.

Если взять две такие границы для случая $A=10^{-3} B$ и поместить переднюю поверхность на расстояние по данным «Эксплорера-12»¹⁾, тогда положение границ на ночной стороне согласуется с положениями, наблюдавшимися на «Эксплорере-10»²⁾. Безусловно, наблюдения на «ИМП-1» помогут нам приблизиться к истине.

Эксфорд. Если учитывать только давление солнечного ветра, то магнитные силовые линии с внутренней стороны магнитосферы были бы просто изогнуты, как в дипольном поле. Однако данные измерений указывают на то, что магнитное поле вытягивается, а это требует тангенциальных напряжений в дополнение к тем перпендикулярным напряжениям, которые обычно принимаются во внимание.

Бридж. Уже отмечалось, что понижение магнитного поля, наблюдаемое на «Эксплорере-10», происходило значительно медленнее, чем это следовало ожидать для дипольного поля. Разве какие-либо другие результаты дают нам сведения о радиальном изменении поля позади Земли?

Несс. Поле действительно увеличивается, когда вы огибаете ночную сторону.

Бридж. Я думаю, что радиальное изменение окажет значительное воздействие на схемы, представляющие конфигурацию магнитного поля.

¹⁾ L. J. Cahill, P. G. Amazeen, J. Geophys. Res., 68, 1835 (1963).

²⁾ J. P. Heppner, N. F. Ness, C. S. Scearce, T. L. Skillman, J. Geophys. Res., 68, 1 (1963).

Часть V

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С КОМЕТАМИ И ЛУНОЙ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С КОМЕТАМИ (ЕСТЕСТВЕННЫМИ И ИСКУССТВЕННЫМИ) ¹⁾

Л. Бирман и Р. Люст

Введение

Несмотря на то что в ближайшие годы с космических аппаратов будет поступать информация все более высокого качества, следует продолжать получать данные о солнечном ветре, основанные на исследовании комет, а также рассеяния радиоволн, зодиакального света и космических лучей. Действительно, если правильно интерпретировать взаимодействие солнечного ветра с кометами, то можно извлечь подробную информацию, которую нельзя получить в ближайшем будущем с космических зондов. Прежде всего следует учитывать, что кометы встречаются на любой эклиптической широте, тогда как довольно трудно запускать космические аппараты под большими углами к плоскости эклиптики.

Мы рассмотрим четыре вопроса: 1) доказательства взаимодействия солнечного ветра с кометами; 2) различные типы взаимодействия солнечного ветра с кометами; 3) некоторые теоретические аспекты, которые в этой связи могут оказаться очень важными [эта тема в дальнейшем будет рассмотрена Бирманом (см. гл. 25)]; 4) некоторые предварительные эксперименты с ионными облаками, которые могут помочь понять физику комет и их взаимодействия с солнечным ветром.

Свойства комет ²⁾

Кратко опишем свойства комет, определенные с Земли. Согласно классификации Бредихина ³⁾, существуют три типа

¹⁾ Поскольку в докладах зарубежных авторов об исследованиях комет не упоминаются работы советских ученых, отметим, что в СССР проводятся весьма обширные исследования в этой области. В частности, в 1966 г. (26—29 октября) в Киеве проходила 3-я Всесоюзная конференция исследователей комет [11*]. См. также примечания переводчика к гл. 25. — *Прим. ред.*

²⁾ Сведения о физических характеристиках комет 1961—1965 гг. можно найти в работе С. К. Всехсвятского [12*]. — *Прим. перев.*

³⁾ Имеется в виду работа [13*]. — *Прим. ред.*

кометных хвостов. Хвосты I типа состоят из CO^+ , N_2^+ , CO_2^+ и других ионов. Этот тип хвостов представляет особый интерес. Хвосты II и III типов состоят в основном из пылевых частиц или неионизированных молекул. Различие между хвостами II и III типов не имеет важного значения для настоящей работы.

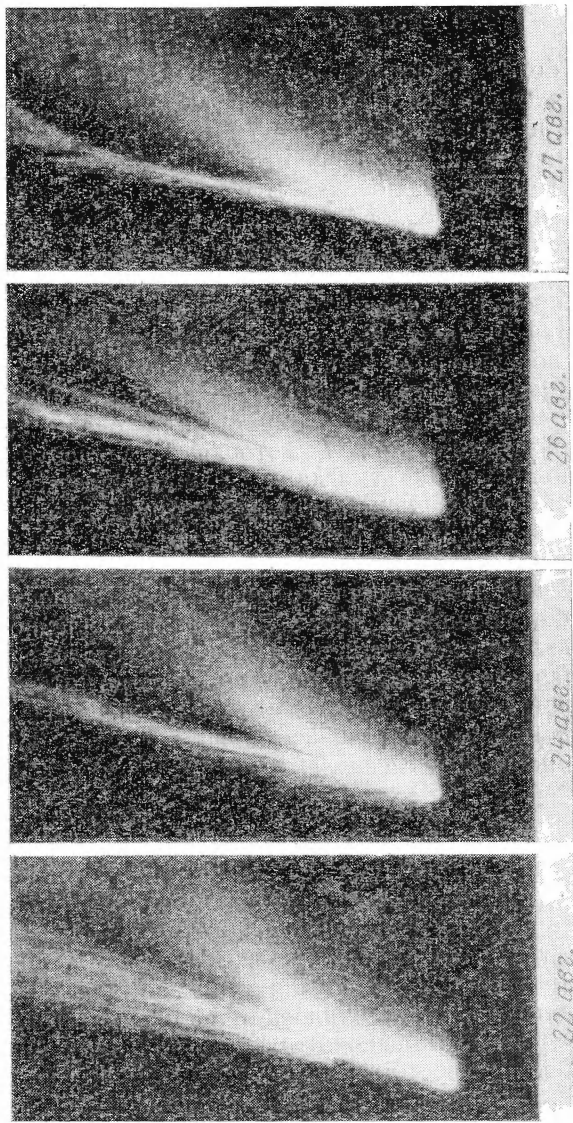
Комета имеет твердое ядро с диаметром $\sim 10\text{--}20$ км. Ядро, вероятно, состоит из пыли и замерзших молекул, включающих углерод, азот, кислород и водород C, N, O и H. Согласно модели, предложенной Уипплом [1, 2], молекулы образуют куски льда с вмороженными в них пылевыми частицами.

Если комета приближается к Солнцу на расстояние нескольких астрономических единиц, то у нее развивается кома, состоящая из неионизированных молекул типа CN, C_2 , C_3 , CH, NH и OH. Кроме того, она будет иметь один или два хвоста. Длинный прямой хвост I типа направлен почти радиально от Солнца. Хвосты II и III типа часто бывают изогнутыми. Диаметр комы равен $\sim 10^5$ км; диаметр хвоста составляет $\sim 10^5$ км, а его длина достигает $10^6\text{--}10^7$ км.

На рис. 1 показана комета Мркоса 1957d для четырех различных дней. Эти снимки были получены на 48-дюймовом телескопе Шмидта обсерватории Маунт Паломар. Отчетливо видны два хвоста. Один хвост изогнут и не обладает никакой структурой, тогда как другой — прямой и состоит из ионизированного вещества. Ниже мы рассмотрим этот хвост. Можно заметить изменения, происшедшие за 4 дня.

Ускорение в ионизированных хвостах комет

Итак, мы можем задать следующий вопрос: какие существуют доказательства того, что солнечный ветер взаимодействует с хвостами комет I типа, как впервые предположил автор [3]? Наиболее замечательным экспериментальным доказательством такого взаимодействия является ускорение, наблюдаемое в хвостах комет. Хвосты I типа обычно обладают очень высокими ускорениями, на два-три порядка превышающими ускорение тяготения Солнца, тогда как ускорение пылевых хвостов комет по порядку равно ускорению силы тяжести Солнца (что на расстоянии 1 а. е. составляет $0,6$ см/сек²). Ускорение в хвостах, состоящих из пыли, можно объяснить давлением солнечного света. Однако ускорение в ионизированных хвостах слишком велико, чтобы его можно было объяснить этим механизмом. Это заставляет нас считать, что высокое ускорение, по-видимому, вызвано взаимодействием заряженных частиц с солнечным ветром.



Р и с. 1. Четыре изображения кометы Мркоса 1957d, сфотографированной на 48-дюймовом телескопе Шмидта. Фотографии получены на обсерваториях Маунт Вилсон и Маунт Паломар.

Корреляция между геомагнитными возмущениями и активностью комет

Вторым и более непосредственным доказательством такого взаимодействия является корреляция между геомагнитными возмущениями и активностью комет. Обнаружено всего лишь несколько случаев такой корреляции, потому что комета должна быть соответственно расположена. В частности, комета должна находиться на низкой гелиографической широте, иначе она не встретится с усиленным корпускулярным потоком. Кроме того, разность долгот между Землей и кометой не должна быть слишком велика, в противном случае интенсивность корпускулярного потока изменится. Однако два случая такой корреляции между геомагнитным возмущением и активностью кометы были обнаружены [3] для кометы Галлея 1910 II и кометы Уиппла—Федтке—Тевзадзе 1962g. Р. Люст обнаружила очень хорошую корреляцию для кометы 1899 I, которая появилась в период низкой солнечной активности, когда на Солнце существовал всего лишь один устойчивый сильный источник корпускулярного излучения.

Но эти случаи связаны лишь с усиленной геомагнитной активностью. Следующий вопрос состоит в том, зависит ли существование ионизированных хвостов комет от усиленного корпускулярного излучения. Статистически было установлено, что присутствие плазменных хвостов не зависит заметно от общего уровня солнечной активности. Этот факт подтверждается тем, что в течение довольно длительного периода низкой геомагнитной активности появлялось несколько комет с нормальной активностью хвостов.

Угол аберрации

Существует замечательное доказательство взаимодействия кометных хвостов I типа с невозмущенным солнечным ветром. Это доказательство было найдено ХOFFMEЙстером и объяснено Бирманом. Направление ионизированного хвоста не совсем совпадало с радиальным, а отклонялось от радиуса-вектора Солнце—комета в сторону, противоположную орбитальному движению кометы. Угол между хвостом и радиусом-вектором составляет примерно $3-6^\circ$. Его можно объяснить аберрацией, вызванной составляющей скорости орбитального движения кометы, перпендикулярной радиусу-вектору. Эта скорость составляет около $30-50$ км/сек. Если предположить наиболее простой случай передачи механического импульса, то по наблюдаемому

углу аберрации можно вычислить, что скорость солнечного ветра примерно несколько сот км/сек¹⁾).

Поскольку угол аберрации, вероятно, отражает орбитальное движение кометы со скоростью $\sim 30\text{--}50$ км/сек и поскольку мы получаем правильный порядок величины скорости солнечного ветра, то ясно, что составляющая скорости солнечного ветра перпендикулярно радиусу-вектору не может быть большой: она не превышает 50 км/сек и, возможно, меньше 30 км/сек. Если бы солнечный ветер на расстоянии 1 а. е. вращался вместе с Солнцем, то составляющая скорости, перпендикулярная к радиусу-вектору, была бы порядка 450 км/сек, что не выявляется из наблюдений кометных хвостов. Это веское доказательство того, что солнечный ветер на расстоянии 1 а. е. не вращается вместе с Солнцем. Статистические исследования показывают, что не существует различия в угле аберрации для комет с прямым и обратным движением. Поэтому такие наблюдения надежно подтверждают, что солнечный ветер на расстоянии 1 а. е. не вращается вместе с Солнцем.

Типы взаимодействия

. Какие типы взаимодействия следует ожидать? Рассмотрим различные типы взаимодействий, а затем сделаем некоторые теоретические выводы.

1. Поток массы

Первый тип взаимодействия — это, конечно, простое взаимодействие кометы с потоком массы, поскольку масса солнечного ветра обтекает комету. Из наблюдений комет и особенно из интерпретации наблюдений линий ОI [4] и происхождения ионов CO^+ Бирман и Треффтц сделали заключение, что довольно яркие кометы теряют $\sim 10^{31}$ молекул/сек [5]. При среднем молекулярном весе 20 эта скорость соответствует скорости потери массы $\sim 3 \cdot 10^8$ г/сек. Поток массы солнечного ветра через кому с радиусом $\sim 10^5$ км был бы на два порядка меньше потери массы кометы. Поэтому, чтобы обе массы по порядку величины были сравнимы, необходимо, чтобы сфера была несколько больше 10^6 км.

¹⁾ В частности, в [10*] на основе ориентации ионных кометных хвостов было установлено, что радиальная скорость солнечного ветра равна $175 \pm \pm 2$ км/сек, а трансверсальная (в направлении вращения Солнца) — 10 км/сек. — *Прим. перев.*

2. Обмен зарядом

Следующий механизм взаимодействия, который следует рассмотреть,—это так называемый механизм обмена зарядом между частицами солнечного ветра и веществом кометы. Это означает, что солнечные протоны, сталкивающиеся с нейтральными молекулами СО или N_2 , ионизируют молекулы, отбирая электрон и образуя нейтральный атом водорода. Сечение такого взаимодействия сильно зависит от природы и энергии частиц. В частности, для СО это сечение очень велико ($\sim 3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$) для скоростей 200—2000 км/сек. Если предположить, что интенсивность потока солнечного ветра составляет $10^8 \text{ ион/см}^2 \cdot \text{сек}$, то можно подсчитать, что характерное время обмена зарядом ~ 35 суток. Для кометы это слишком большое характерное время. Чтобы объяснить наблюдаемые изменения структуры хвостов комет, необходимо время порядка одного дня. Следовательно, одного этого механизма недостаточно, чтобы вызвать наблюдаемую ионизацию вещества комет. Тем не менее обмен зарядом может играть существенную роль в физике комет.

3. Передача импульса и энергии

Существует передача импульса и энергии от солнечного ветра к веществу кометы. Большие ускорения в плазменных хвостах комет, обнаруженные по наблюдениям смещений облаков, волокон и других плазменных структур, обычно приписываются передаче импульса от солнечной плазмы к плазме кометы. Известно, что суммарный импульс спокойного солнечного ветра составляет около 10^{-8} дин/см^2 , а поток энергии примерно $10^{-1} \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$. Какое количество этого суммарного импульса или потока энергии может быть передано кометам и их хвостам? В таблице перечислены некоторые существенные параметры, которые следует рассматривать при обсуждении этого вопроса. Приведенные значения верны лишь по порядку величин.

а. Соударения за счет кулоновского дальнего действия. Итак, рассмотрим, как можно объяснить необходимую передачу импульса [3]. Одним из механизмов взаимодействия солнечного ветра с веществом кометы являются соударения за счет кулоновского дальнего действия. Прямое взаимодействие солнечных протонов с ионизированными молекулами будет довольно слабым, поэтому электроны играют существенную связующую роль в этом механизме. Ионизованные молекулы ускоряются за счет соударений с солнечными электронами. В свою очередь импульс

Таблица

**Параметры, важные для исследования процессов
передачи импульсов**

<i>Принимаемые параметры</i>	
Электронная концентрация	$1-10 \text{ см}^{-3}$
Тепловая скорость электрона	10^8 см/сек
Напряженность магнитного поля	10^{-5} гс
<i>Вычисленные параметры</i>	
Дебаевский радиус	10^3 см
Плазменная частота	10^5 рад/сек
Циклотронная частота протонов	10^{-1} рад/сек
Циклотронная частота электронов	10^2 рад/сек
Ларморовский радиус протонов	
(тепловая скорость, 10^4 K)	160 км
(скорость солнечного ветра)	10^4 км
Ларморовский радиус электронов	
(тепловая скорость, 10^4 K)	4 км

электрона восстанавливается за счет импульса солнечных протонов.

Ускорение a , которое может быть достигнуто за счет этого процесса, определяется выражением

$$a = \frac{e^2 n v}{M_{\text{ион}} \sigma},$$

где e — заряд электрона, n — концентрация солнечной плазмы, $M_{\text{ион}}$ — масса кометного иона, σ — электрическая проводимость (CGSE) и v — скорость потока солнечного ветра. Если в формулу ускорения подставить наблюдаемые значения соответствующих параметров, скажем $v = 3 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$, $n = 10 \text{ см}^{-3}$, $M_{\text{ион}} = 28 \text{ ат. ед. массы}$ и $\sigma = 0,5 \cdot 10^{13} \text{ CGS}$ (для температуры 10^4 K), тогда ускорение будет несколько меньше единицы. Это находится в противоречии с наблюдаемыми значениями, которые в нормальных случаях равны $\sim 10^2 \text{ см/сек}^2$. Ускорения в 10^3 см/сек^2 могут возникнуть за счет либо более высокой концентрации, либо более высокой скорости солнечных потоков.

Следовательно, этого механизма недостаточно для объяснения наблюдаемого ускорения. Однако следует указать, что прямые соударения могут играть существенную роль очень близко к ядру кометы (вплоть до расстояния, скажем, 10^5 км).

б. *Плазменные неустойчивости*¹⁾. Другой механизм, который мог бы оказаться более эффективным при передаче импульса, зависит от так называемых плазменных неустойчивостей. Существует много разновидностей плазменной неустойчивости, которая может усилить взаимодействие солнечной плазмы с плазмой кометы. Поскольку поток одного газа (солнечные частицы) сталкивается с другим газом (частицы кометы), то может иметь место так называемая «двухпотоковая» неустойчивость²⁾. Этот случай был рассмотрен Хойлом и Харвитом [6], которые пришли к выводу, что этот тип неустойчивости может возникнуть на короткий период, если солнечные электроны являются достаточно холодными (скажем, холоднее $\sim 10^3$ К при разумных значениях температуры электронов кометы). Однако этот тип неустойчивости оказывает лишь кратковременное воздействие. Как только электроны теряют свою поступательную скорость, их температура становится достаточно высокой, чтобы восстановить устойчивость плазмы даже по отношению к втекающим электронам.

В настоящее время невозможно объяснить передачу достаточного количества движения за счет двухпотоковой неустойчивости. Однако мы не знаем, все ли соответствующие типы неустойчивости исследованы. Таким образом, некоторые типы плазменной неустойчивости могут играть важную роль в передаче импульса от солнечного ветра к ионам кометы.

в. *Магнитные поля*. Начиная с 1951 г. Бирман [3], Альвен [7], а также Харвит и Хойл [8] исследовали сцепление посредством магнитных полей.

Уже указывалось, что поток импульса солнечного ветра составляет примерно 10^{-8} дин/см². Величина потока импульса, необходимая для объяснения ускорений в плазменных хвостах, равна $\sim 10^{-9}$ дин/см² и соответствует скорости потери массы 10^{28} СО⁺ ион/сек при скорости ее движения 10^7 см/сек через поперечное сечение 10^{21} см². Такой поток импульса требует существования магнитного поля напряженностью около 10^{-4} гс. Для поля такой напряженности ларморовский радиус мал по сравнению с размерами кометы, а период вращения ионов (~ 1 сек) короток по сравнению с временным масштабом явлений, происходящих в хвосте. Взаимодействие двух потоков плазмы, движущихся с различными скоростями, путем магнитного сцепления становится эффективным для временного масштаба порядка периода вращения рассматриваемых ионов. (Более подробно об этих исследованиях см. в гл. 25.)

¹⁾ Исследованию плазменной неустойчивости применительно к хвостам комет посвящена работа [9*]. — *Прим. перев.*

²⁾ Этот тип неустойчивости принято называть пучковой. — *Прим. ред.*

Кометы как зонды солнечного ветра

1. Естественные кометы

Если представленная картина верна (а мы полагаем, что это так), то кометы с ионизированными хвостами можно использовать в качестве естественных зондов для исследования солнечного ветра. Можно будет получить данные о направлении, скорости и о других кинематических свойствах солнечного ветра. Безусловно, эти естественные зонды были бы особенно важны для исследования тех областей, в которые не могут еще проникать космические аппараты, а именно областей, удаленных от плоскости эклиптики или же расположенных на очень больших расстояниях от земной орбиты. Естественные зонды также можно использовать, когда на орбитах нет космических аппаратов. Но наиболее эффективное использование этих естественных зондов возможно лишь в том случае, если будет понята физика плазмы кометы и ее взаимодействия с солнечным ветром. Как уже отмечалось, кометы пока еще точно «не откалиброваны».

2. Искусственные ионные облака

Естественные кометы можно откалибровать, наблюдая взаимодействия солнечного ветра с искусственными ионными облаками, свойства которых известны. В Мюнхене начаты подготовительные работы для выбрасывания такого облака с космического аппарата или со спутника с сильно вытянутой орбитой.

а. Описание эксперимента. Облако будет наблюдаться с Земли. Чтобы обнаружить и измерить структуры в облаке, его поверхностная яркость должна быть по крайней мере сравнимой с поверхностной яркостью ночного неба в соответствующей спектральной области. Это условие определяет минимальную выбрасываемую массу с учетом диффузии облака после его выброса и с учетом того, что сначала при регистрации не будут использоваться фильтры. Время $t_{\min}$, в течение которого облако можно наблюдать, должно быть достаточно большим, чтобы можно было измерить смещения и ускорения и пронаблюдать изменения структуры со временем.

Поскольку масса ограничена из-за технических возможностей, планируется выбросить газ в неионизованном состоянии. Газ будет ионизироваться путем фотоионизации. Реакция обмена зарядом с протонами солнечного корпускулярного излучения происходит настолько медленно, что этим процессом можно пренебречь.

Лучше всего подходят для этих экспериментов тяжелые щелочные металлы и некоторые редкоземельные элементы. В настоящее время планируется использовать барий или редкоземельные элементы, поскольку ионы этих элементов имеют очень сильную резонансную линию в области видимого спектра и поскольку вероятность их ионизации солнечным светом довольно высока. Хотя в настоящее время скорость фотоионизации недостаточно хорошо известна, тем не менее разумные оценки дают минимальную массу бария порядка 1 кг . Эта оценка основана на длительности времени наблюдения 10^3 сек и температуре выбрасываемого газа $\sim 2000^\circ \text{ K}$.

Наконец, предполагаемое время наблюдения можно значительно увеличить, а минимальную массу значительно уменьшить, если использовать спектральные фильтры. Таким образом, яркость ночного неба может быть сильно снижена. Несомненно, что спектральные фильтры будут использоваться, но при первом эксперименте мы все-таки выбросим 1 кг бария. Испарение бария будет осуществлено химически.

б. Взаимодействие солнечного ветра с ионным облаком. При рассмотрении взаимодействия солнечного ветра с ионным облаком необходимо учитывать, будет ли облако оставаться компактным, или отдельные ионизированные частицы будут сразу уноситься солнечным ветром, поскольку существуют электрическое $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}/c$ и магнитное $\mathbf{B}$ поля. Можно показать, что облако нельзя рассматривать как отдельные несвязанные частицы и что облако должно сохраняться в течение необходимого времени наблюдения 10^3 сек .

Согласно современным представлениям о времени ионизации бария, потребуется около 10^4 сек , чтобы плотность облака уравновесилась за счет процесса диффузии с плотностью окружающей межпланетной плазмы. Это время можно даже увеличить, если учесть действие магнитного поля. Другой вопрос, достаточно ли велик электрический ток, который может переноситься облаком, для его экранирования от внешнего магнитного поля. Оценки показывают, что такое экранирование возможно в течение периода наблюдения 10^3 сек , даже если магнитное поле резко изменяется в пределах ларморовского радиуса.

в. Предварительные эксперименты. Мы выполнили предварительные эксперименты в ионосфере для проверки этого метода. Но в то же время мы попытались произвести полезные измерения в ионосфере. Эти эксперименты проводились в Сахаре совместно с французской группой, возглавляемой Бламон. До сих пор было произведено четыре запуска, позволивших создать

искусственные облака. Я не буду подробно рассказывать об этих экспериментах, поскольку результаты относятся к ионосфере. Я лишь упомяну, что при этом удалось измерить диффузию, или изменение радиуса облака со временем, и, таким образом, попытаться определить коэффициент диффузии. Оказалось, что наблюдаемую диффузию нельзя объяснить исключительно на основе термодиффузии и что турбулентная диффузия присутствует на высотах 100—200 км.

ЛИТЕРАТУРА

1. Whipple F. L., *Astrophys. J.*, **111**, 375 (1950).
2. Whipple F. L., *Astrophys. J.*, **113**, 464 (1951).
3. Biermann L., *Zs. Astrophys.*, **29**, 274 (1951); *Mémoires in —8° de la Société Royale des Sciences de Liège, Ser. 4*, **13**, 291 (1953).
4. Swings P., Greenstein J. L., *Compt. Rend. Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, **246**, 511 (1958).
5. Biermann L., Trefitz E., *Zs. Astrophys.*, **59**, 1 (1964).
6. Hoyle F., Harwit M., *Astrophys. J.*, **135**, 867 (1962).
7. Alfvén H., *Tellus*, **9**, 92 (1957).
8. Harwit M., Hoyle F., *Astrophys. J.*, **135**, 875 (1962).
- 9*. Wallis M. K., *Planet. Space Sci.*, **15**, № 1, 137 (1967).
- 10*. Brandt J. C., Belton M. J. S., Stephens M. W., *Astron. J.*, **71**, № 3, 157 (1966).
- 11*. Комиссия по кометам и метеорам Астрономического совета АН СССР, Информ. сообщ. № 5, Москва, декабрь 1966.
- 12*. Всехсвятский С. К., *Астрон. ж.*, **43**, № 6, 1292 (1966).
- 13*. Бредихин Ф. А., О хвостах комет, М.—Л., Гостехиздат, 1934.

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
С КОМЕТАМИ

Л. Бирман

Я хочу рассмотреть более подробно взаимодействие комет с солнечным ветром с точки зрения магнитной гидродинамики ¹⁾ и гидродинамики.

Число 10^{31} молекул/сек, приведенное в гл. 24, относится к скорости потери достаточно ярких комет, довольно легко наблюдаемых невооруженным глазом. Кроме того, это число является приближенным в следующем смысле. Выбор молекул и ионов, которые можно наблюдать с Земли (CN, C₂, CO⁺ и нескольких других), определяется спектроскопическими условиями. Многие молекулы, которые из общих соображений должны присутствовать, не обладают резонансными полосами в спектральной области за 3000 Å, поэтому из-за сильного ослабления солнечного света в пределах рассматриваемых расстояний мы не надеемся обнаружить эти молекулы. Подробный анализ механизма возбуждения, выполненный Свингсом, показал, что эта модель в основном правильна [1]. Следовательно, мы имеем право предположить, что существует много других молекул, помимо тех, которые мы видим в обычном спектральном диапазоне. Элеонора Треффтц и я недавно сделали количественные оценки на основе наблюдений запрещенных линий кислорода [2]. Эти линии были впервые отождествлены в спектрах ряда объектов Свингсом и Гринстейном [3], но их присутствие еще твердо не установлено для большого числа комет. Скорость потери должна быть определена в будущем более точно. Спектральные наблюдения в далеком ультрафиолете с космических аппаратов или ракет позволят это сделать. Мы планируем выполнить такие наблюдения в течение нескольких лет.

К списку данных, приведенных Люстом, я хочу добавить характерное время ионизации. Помимо механизма обмена заря-

¹⁾ Многие магнитогидродинамические аспекты комет и их связь с геомагнитными потоками рассмотрены в обзоре Л. С. Марочника [7*]. — *Прим. перев.*

дом, безусловно, имеет место фотоионизация солнечным ультрафиолетовым светом. Используя последние результаты о потоке излучения Солнца в далекой ультрафиолетовой области и о потоках частиц, мы нашли, что оба эти потока дают почти одинаковую скорость ионизации от $\sim 10^{-6,5}$ до $\sim 10^{-7}$ сек $^{-1}$ в зависимости от молекулы. Эти числа приводят к трудностям, упоминавшимся ранее Люстом: наблюдаемое характерное время возникновения и изменения структуры комет не согласуется с характерным временем ионизации. Эта задача была рассмотрена и, по-видимому, решена в [2].

Можно использовать значение скорости потерь молекул 10^{31} сек $^{-1}$ наряду с наблюдаемой скоростью истечения, чтобы получить постоянную концентрацию неионизованных молекул, равную $(10^{25}/r)$ см $^{-3}$, где r — расстояние в см от ядра кометы. Даже на расстоянии 10^5 км полная концентрация неионизованных частиц, согласно этой модели, все еще будет 10^5 см $^{-3}$. Безусловно, эта концентрация должна быть верхним пределом для многих комет. Аналогично можно получить установившуюся концентрацию ионов вокруг ядра по скорости фотоионизации $10^{-6,5}$ — 10^{-7} сек $^{-1}$. На основе этой модели ионная концентрация обратно пропорциональна расстоянию r . Можно использовать эти данные, например, чтобы лучше понять химические реакции.

Поскольку ларморовский радиус меньше размеров видимых структур, из этого следует, что межпланетные магнитные поля могут обеспечить взаимодействие плазмы кометы с солнечной плазмой, если молекулы кометы ионизованы одним из рассмотренных выше способов. Однако необходимо рассмотреть временной масштаб взаимодействия, чтобы убедиться в том, что он меньше времени, за которое происходят наблюдаемые изменения структуры.

Для дальнейшего исследования можно использовать магнитогидродинамику, в частности уравнения трехкомпонентной жидкости для смеси электронов и двух сортов ионов. В качестве начального условия предположим, что обе ионные компоненты имеют различную массовую скорость и что электроны движутся со средней скоростью ионов, так что суммарный электрический ток равен нулю. В таком случае из уравнений видно, что массовые скорости обоих сортов ионов стремятся уравниваться за время, определяемое периодами вращения рассматриваемых ионов. Таким образом, пределы изменения временного масштаба взаимодействия составляют от долей секунды до ~ 10 сек тогда как наблюдаемые изменения в кометах происходят в пределах 10—20 мин либо от часа к часу, либо от ночи к ночи. Следовательно, можно сделать вывод, что магнитное взаимодействие эффективно. Запишем уравнения, выражающие обычные

законы сохранения для плоско-параллельного случая, чтобы показать, насколько они отличаются от обычно используемых в магнитной гидродинамике. Уравнение для концентрации ионов (и электронов) записывается в виде

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(nv)}{\partial x} = n_0 v_i, \quad (1)$$

где n_0 — концентрация нейтральных молекул, v_i — скорость ионизации, а v — массовая скорость плазмы. Обычно правая часть уравнения (1) равна нулю, но в рассматриваемом случае необходимо принять во внимание создание ионов фотоионизацией. Поскольку сечение взаимодействия неионизованных молекул относительно мало, в качестве грубого приближения предположим, что молекулы, вытекающие из кометы, не взаимодействуют с плазмой до тех пор, пока не станут ионизованными. На ионизованные молекулы воздействуют магнитные силы и электрическое взаимодействие с другими ионами и электронами. Член в правой части уравнения представляет локальную добавку к числу заряженных частиц.

Далее мы имеем подобное уравнение для массы:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n\bar{m}) + \frac{\partial}{\partial x}(n\bar{m}v) = n_0 v_i (M + m_e) + n_0 n_p \omega_{p0} Q_{p0} (M - m_p), \quad (2)$$

где $\bar{m}$ — средний молекулярный вес, Q_{p0} — сечение реакции обмена зарядом, ω_{p0} — относительная скорость взаимодействующих частиц (индексы p и 0 относятся к солнечным протонам и нейтральным частицам соответственно) и $(M - m_p)$ — разность между массой создаваемого при этом процессе иона и массой протона. Мы снова получаем член, представляющий добавку частиц плазмы за счет эффекта фотоионизации. M — масса возникающего таким образом иона, которая обычно больше массы ионов солнечной плазмы m_p . Последний член справа в (2) представляет изменение массы в результате процесса обмена зарядом. Этот процесс не меняет числа заряженных частиц, но сильно влияет на среднюю массу. Допустим, что 1% протонов обменивается своим зарядом с ионизованными молекулами типа CO или N₂, тогда имеет место увеличение средней массы на 20–30%.

Уравнение переноса импульса записывается в виде

$$\frac{\partial}{\partial t} n\bar{m}v + \frac{\partial}{\partial x} (n\bar{m}v^2 + p + \frac{B^2}{8\pi}) = -n_0 n_p \omega_{p0} Q_{p0} m_p v. \quad (3)$$

Имеется перенос, обусловленный магнитным полем. В правой части уравнения (3) необходимо рассмотреть члены, связанные с фотоионизацией и обменом заряда. При этом увеличение им-

пульса не происходит, поскольку скорость молекул кометы сначала довольно мала и не возрастает существенно в процессе перезарядки или в процессе фотоионизации. Вывод о перезарядке подвергался сомнению, но Треффтц и я показали, что увеличение импульса в этом процессе довольно мало [4], поэтому потеря импульса происходит лишь за счет правой части (3).

В таком случае уравнение энергии запишется в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{n\bar{m}v^2}{2} + p + \frac{B^2}{8\pi} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{n\bar{m}v^3}{2} + 2 \left(p + \frac{B^2}{8\pi} \right) v \right] = \\ = - \frac{n_0 n_p w_{p0} Q_{p0} m_p w_{p0}^2}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

В левую часть уравнения (4) входят члены, встречающиеся при рассмотрении магнитогидродинамических ударных волн. Возникает вопрос о числе используемых степеней свободы. Мы использовали две степени свободы, а не три, как предложено на этой конференции (см. гл. 22). Правая часть в (4) представляет потерю энергии, вследствие того что солнечные протоны исчезают, унося свою энергию (увеличение энергии за счет фотоионизации относительно мало).

Наконец, имеются уравнения сохранения магнитного потока и сохранения среднего магнитного момента протона:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} B + \frac{\partial}{\partial x} (Bv) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \frac{w_{p0}^2 - v^2}{B} + v \frac{\partial}{\partial x} \frac{w_{p0}^2 - v^2}{B} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Один из результатов, который можно получить из этой системы уравнений, относится к взаимодействию солнечного ветра с разреженным газом кометы на большом расстоянии (по направлению к Солнцу) от кометы. Нас интересует состояние, при котором все еще происходит небольшая потеря солнечных частиц, но заметно относительное увеличение среднего молекулярного веса $\bar{m}$; для сечения реакции обмена зарядом $3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ это должно соответствовать слою газа с поверхностной плотностью $10^{13} \text{ молекул/см}^2$. Рассматривая квазистационарную задачу, можно показать, что массовая скорость плазмы первоначально пропорциональна $\bar{m}^{-3/2}$ [5]. Иными словами, произведение $\bar{m}v$ не является постоянным, оно уменьшается по направлению к комете всякий раз, когда этот процесс имеет место. Этот вопрос представляет некоторый интерес, поскольку в приближении нулевого порядка следует ожидать, что это произведение будет постоянным [6].

Я хотел бы подчеркнуть еще раз, что мы имели дело с магнитогидродинамической задачей, причем скорость солнечного ветра в свободном межпланетном пространстве является сверхзвуковой. Комета служит источником заряженных частиц, движение которых в потоке солнечного ветра будет упорядоченным,— ситуация, которая в какой-то степени напоминает обтекание Земли солнечным ветром. Можно показать [5], что не существует стационарного решения, по крайней мере для плоско-параллельного случая, для которого средняя молекулярная масса увеличивается более чем в $\frac{4}{3}$ раза. В действительности изменение массы может оказаться значительно больше. Вывод сводится к тому, что стационарное решение невозможно без ударных волн и что трехмерным характером задачи ни в коем случае нельзя пренебрегать.

Таким образом, следует ожидать, что вокруг комет существует нечто аналогичное магнитопаузе Земли и фронту ударной волны в направлении к Солнцу. Кроме того, массовая скорость будет иметь заметный градиент вокруг кометы. На фотографиях, показанных Люстом (см. гл. 24), за пределами основной части хвоста I типа можно увидеть струи. Такие струи видны довольно часто, и, как следует из наблюдений, они смещаются со временем (в течение нескольких часов) по направлению к главному хвосту. Если смещение этих струй рассматривать как движение плазмы, большая часть которой невидима (как дым или облака указывают на воздушные течения в нашей атмосфере), то можно получить представление о природе движения массы и связать эту информацию с теоретическими моделями, полученными на основе наших уравнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Swings P., Lick Observatory Bull., **19**, № 508, 131 (1941).
2. Biermann L., Trefitz E., Zs. Astrophys., **59**, 1 (1964).
3. Swings P., Greenstein J. L., Compt. Rend. Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, **246**, 511 (1958).
4. Biermann L., Trefitz E., Zs. Astrophys., **49**, 111 (1960).
5. Biermann L., Brosowski F. B., Schmidt H.-U., Sitzungsberichte der Bayerische Akademie der Wissenschaften, 1962.
6. Harwit M., Hoyle F., Astrophys. J., **135**, 875 (1962).
- 7*. Марочник Л. С., Успехи физ. наук, **82**, вып. 2, 221 (1964).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДОВ ЛЮСТА И БИРМАНА

Голд. На каком расстоянии от Солнца совместное вращение отсутствует?

Бирман. Наблюдения комет обычно производятся вплоть до 0,5 а.е. Многие кометы приближались значительно ближе к Солнцу, но когда они

подходят к Солнцу слишком близко, их нельзя увидеть. Хоффмейстер исследовал эту проблему в 1942 г.¹⁾. С тех пор мы просмотрели 10 или 20 орбит комет как перпендикулярных к плоскости эклиптики, так и с попятным и прямым движением вблизи плоскости эклиптики. В поведении хвостов этих комет нам не удалось обнаружить доказательств совместного вращения.

Голд. Значит, даже на расстоянии 0,5 а. е. отсутствует совместное вращение?

Бирман. Да.

Эксфорд. Я хочу указать на возможную роль электронов в других процессах, помимо реакции обмена зарядом. Даже в невозмущенном солнечном ветре следует ожидать, что электронная температура сравнима с ионной температурой, равной $\sim 10^5$ К. Таким образом, электроны обладают довольно существенной энергией, по крайней мере 10 эв. Они могут играть важную роль в возбуждении некоторых линий, в частности запрещенных линий кислорода. Кроме того, вполне возможно, что ударная волна обуславливает перекачку энергии протонов к электронам, создавая при этом мощный поток электронов с энергией в килоэлектронвольт²⁾. По-видимому, можно было бы обнаружить довольно существенную ионизацию, возникающую за счет этих быстрых электронов.

Бирман. Из оценки характерного времени следует, что процесс возбуждения идет довольно медленно, поскольку сечение реакции этого типа довольно мало. Даже если предположить, что скорость электронов равна 10^8 см/сек, а концентрация электронов составляет 10 см⁻³, то поток будет всего лишь 10^{10} см⁻² · сек⁻¹. При сечении 10^{-17} см² скорость возбуждения равна 10^{-7} сек⁻¹. Хотя эта скорость возбуждения, по-видимому, слишком мала, чтобы играть важную роль в возбуждении линий OI, тем не менее не следует полностью забывать об этом.

Эксфорд. Берд говорил, что возможны более высокие значения сечений. Однако окончательное решение этого вопроса следует предоставить экспертам. Электроны обладают тем преимуществом, что они способны производить много актов ионизации посредством соударений, тогда как при реакции обмена зарядом каждый протон создает лишь один ион. См. гл. 26.] Кроме того, трудно понять, как может образоваться луч из холодных молекул, если только их не расположить в линию и не ионизовать одновременно. Более вероятно, что ионизация имеет место около ядра и что ионы распространяются вдоль магнитных силовых линий. Мы имеем дело с очень тяжелыми ионами без начальной энергии (обмен зарядом не может сообщить ионам много энергии). Но для создания луча в пределах разумного интервала времени, т. е. в пределах нескольких часов, частица должна двигаться очень быстро. Электроны могут создать этот эффект, так как они движутся вдоль магнитных силовых линий и увлекают с собой ионы, тем самым усиливая диффузию медленных ионов вдоль магнитных силовых линий.

Бирман. Электроны обладают очень большой энергией, поскольку энергия ионизирующего кванта изменяется в диапазоне от 20 до 30 эв. Дальнейшее развитие этой проблемы требует особого внимания³⁾.

Братенагл. Не исследовался ли вопрос об обнаружении радиоизлучения, создаваемого электронными процессами в кометах? Такое излучение, по-видимому, существует, однако оно может оказаться слишком слабым, чтобы его обнаружить. Если бы это излучение было обнаружено, то результаты его исследования оказались бы весьма полезными.

¹⁾ C. Hoffmeister, Zs. Astrophys., 22, 265 (1943).

²⁾ Подробнее об этом см. W. I. Axford, Planet. Space Sci., 12, № 7, 719 (1964). — Прим. перев.

³⁾ L. Biermann, E. Trefitz, Zs. Astrophys., 59, 1 (1964).

Бирман. Такая попытка делалась, но результаты были неубедительными. Иногда следует ожидать существования радиоизлучения, однако очень трудно оценить его интенсивность и частоту. Наблюдателям на радиотелескопах следует заняться низкочастотным излучением комет.

Андерсон. Верно ли, что существует корреляция между образованием кометных хвостов и гелиографической широтой и что нет корреляции между образованием хвостов и общим уровнем солнечной активности?

Люст. Корреляция между формированием хвостов I типа и уровнем солнечной активности отсутствует. Штумпф обнаружил, что процент комет, проявляющих активность хвостов I типа, выше на более низких гелиографических широтах, но этот эффект незначителен¹⁾.

Голд. Безусловно можно ожидать корреляции между ускорением тяжелых ионов и уровнем солнечной активности. Количество газа в хвосте должно зависеть от нагрева Солнцем и не должно коррелировать с солнечной активностью. Однако скорость, с которой газ уносится, несомненно, должна изменяться в зависимости от уровня интенсивности солнечного ветра.

Бирман. Антрак, Р. Люст и я недавно исследовали около 100 комет (самые яркие кометы за последние 60 лет). Мы разделили их в соответствии с фазой солнечного цикла и исследовали частоту появления хвостов с плазменным веществом. Нам не удалось обнаружить зависимости от солнечной активности, хотя может существовать вариация порядка 20%.

Случай сильного ускорения действительно коррелирует с солнечной активностью. Все случаи, которые мы исследовали, зависят в некоторой степени от солнечной активности, определяемой по значениям магнитных характеристик, которые коррелируют с числом солнечных пятен.

Что касается широтного эффекта, то мы рассмотрели широту перигелия кометы, полагая, что наиболее бросающиеся в глаза явления будут иметь место именно там. Мы безуспешно пытались подтвердить результаты Штумпфа.

Фогт. На каком расстоянии от Солнца можно определить направление солнечного ветра по наблюдениям хвостов комет?

Бирман. Максимальное расстояние, на котором наблюдался хвост I типа, равно 5 а. е. (комета Юмасона 1962/1964, наблюдавшаяся примерно на орбите Юпитера).

¹⁾ P. Stumppf, Astron. Nachr., 286, 87 (1961).

ТЕОРИЯ КОМЕТНЫХ ХВОСТОВ I ТИПА ¹⁾

Д. Б. Берд

Влияние солнечного ветра на поведение кометных хвостов I типа было отмечено Бирманом [1]. Позднее Альвен [2] подчеркнул важную роль межпланетного магнитного поля при взаимодействии между ионами комет и протонами солнечного ветра. Исследуя динамику формирования хвостов, Харвит и Хойл [3] продолжили работу Альвена, а также Бирмана и Треффтца по изучению обмена зарядом [4]. Предыдущие ораторы представили превосходный обзор этой работы и последующего ее развития ²⁾).

Хотя процесс перезарядки, несомненно, имеет место и, вероятно, объясняет начало процесса формирования хвоста, тем не менее он не может объяснить высокие концентрации ионов, наблюдаемые в хвостах комет. Кроме того, ни процесс перезарядки, ни давление солнечного ветра не в состоянии объяснить высокую скорость движения вещества, требуемую для быстрого развития лучей хвоста. Как показали Харвит и Хойл [3], а также Бирман (см. гл. 25), межпланетные магнитные силовые линии сначала движутся со скоростью протонов солнечного ветра, но они очень сильно замедляются, когда происходит обмен зарядами между протонами и неподвижными тяжелыми молекулами кометного газа. Полусфера медленно движущихся магнитных силовых линий, вмороженных в плазму ионизованных молекул кометы, представляет препятствие для быстродвижущихся межпланетных магнитных силовых линий. Эти межпланетные магнитные силовые линии нагромождаются на поверхности полусферы и соскальзывают с ее краев, как показано на рис. 1—3.

Протоны солнечного ветра проникают в относительно неподвижное сжатое магнитное поле глубже, чем электроны, которые обладают меньшим импульсом. В результате разделения зарядов возникает электрическое поле на внешнем краю области

¹⁾ В более полном варианте эта работа опубликована в [9*]. — *Прим. перев.*

²⁾ См. примечания переводчика к гл. 25. — *Прим. ред.*

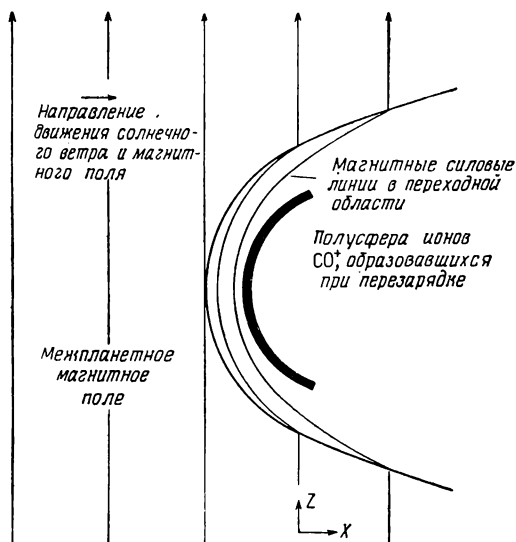


Рис. 1. Переходная область в голове кометы вдоль оси Y .

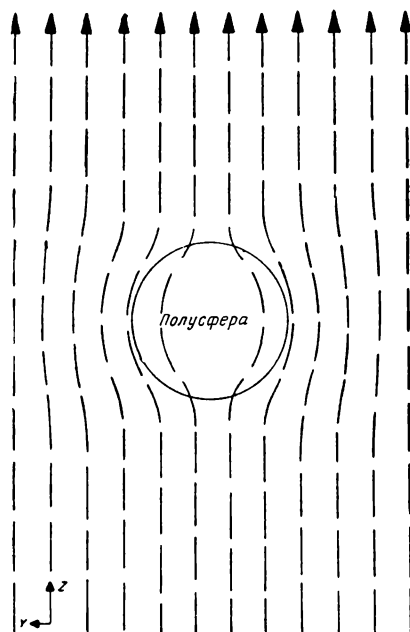


Рис. 2. Переходная область в голове кометы, если смотреть с Солнца (вдоль оси X).

сжатого магнитного поля. При входе в область сжатого поля протоны и электроны пересекают это электрическое поле, которое «заставляет» электроны отбирать энергию у протонов до тех пор, пока их импульсы не станут равны. Тогда разделение зарядов прекращается и протоны и электроны продолжают

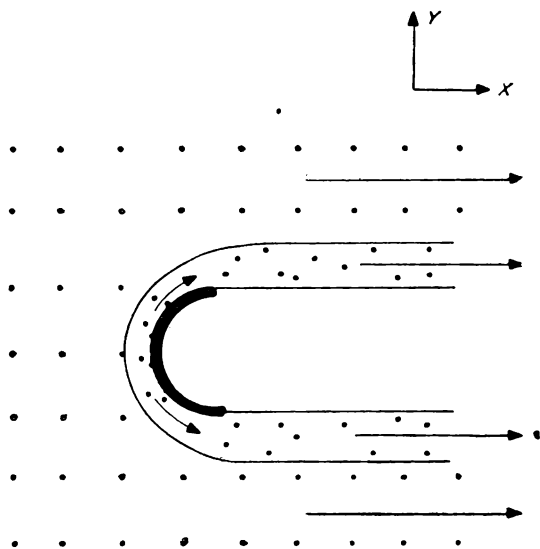
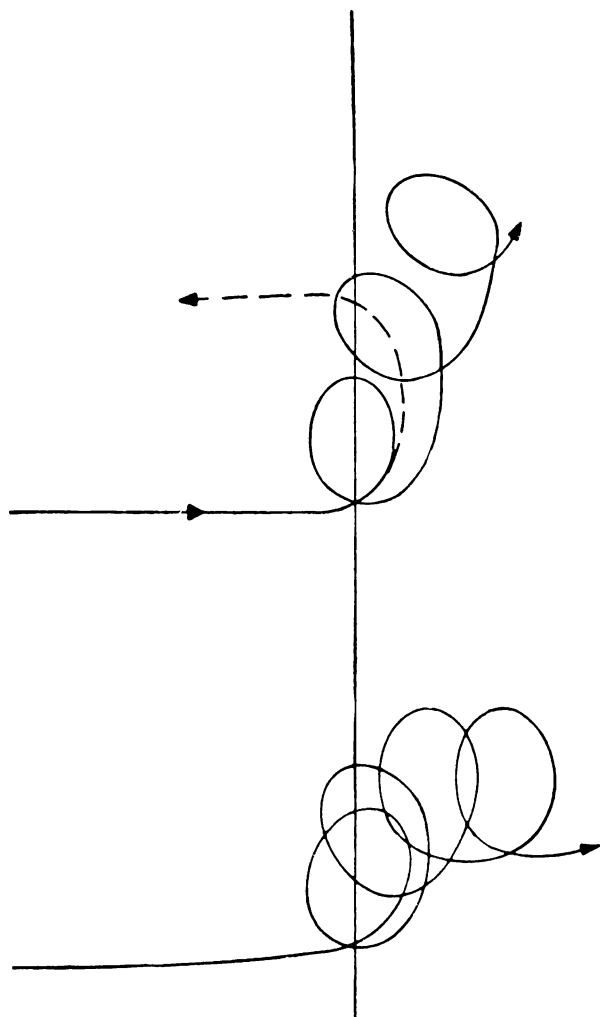


Рис. 3. Переходная область в голове кометы, если смотреть вдоль оси Z . Стрелки — векторы скорости магнитных силовых линий.

двигаться через переходную область. Траектории частиц показаны на рис. 4 и 5.

Теория частиц, отражающихся от неподвижного магнитного поля [5—8], несколько изменяется, когда магнитное поле движется со скоростью v_l . В системе отсчета движущегося магнитного поля частицы испытывают обычное циклотронное движение, но в неподвижной системе координат, в которой граница покоится, появляется эффективное электрическое поле $-\mathbf{v}_l \times \mathbf{B}$. Это электрическое поле создается движением магнитных силовых линий, которые захвачены частицами, движущимися в переходную область. Если направить ось X перпендикулярно к границе, а ось Z параллельно магнитному полю (см. рис. 1), то получим следующие уравнения для перпендикулярно



Р и с. 4. Траектории заряженных частиц, проникающих в область высокой напряженности магнитного поля.

Пунктирная линия — траектория частицы в стационарном магнитном поле. Сплошная линия — в движущемся магнитном поле. Магнитные силовые линии направлены перпендикулярно плоскости листа.

падающих частиц:

$$\ddot{y} = -\frac{e}{mc} B(\ddot{x} - v_l), \quad (1)$$

$$\ddot{x} = \frac{e}{m} E(x) + \frac{e}{mc} B\dot{y}. \quad (2)$$

Интегрируя один раз по времени, получим

$$v_y = -\frac{e}{mc} \int_{-\infty}^x B dx' + \frac{e}{mc} \int B v_l dt, \quad (3)$$

$$v_x^2 = v_0^2 + 2\frac{e}{m} \int_{-\infty}^x E dx' - \left(\frac{e}{mc}\right)^2 \left[\int_{-\infty}^x B dx' \right]^2 + \\ + 2\left(\frac{e}{mc}\right)^2 \int_{-\infty}^x B \int B v_l dt'' dx'. \quad (4)$$

Поскольку концентрация частиц пропорциональна $1/v_x$ и существенного разделения зарядов, по-видимому, не происходит, компоненты x скоростей электронов и ионов примерно одинаковы. Следовательно,

$$\int_{-\infty}^x E(x') dx' = -\frac{e}{m_e c^2} \left[\int_{-\infty}^x B dx' \right]^2 + \frac{e}{m_e c^2} \int_{-\infty}^x B \int B v_l dt'' dx'. \quad (5)$$

Второй член мал, но он ослабляет электрическое поле в предполагаемом слое разделения зарядов, поскольку кинетическая энергия протонов в системе координат движущихся магнитных силовых линий уменьшается. Дрейф за счет $\Delta B/B$ происходит в направлении поля $\mathbf{v}_l \times \mathbf{B}$. Он обуславливает потерю энергии частицы, которая пренебрежимо мала — меньше 60 эв для электронов и меньше 1 эв для протонов.

В переходном слое энергия электронов равна начальной кинетической энергии ионов $m_i v_0^2/2$, а энергия иона теперь равна $m_e v_0^2/2$. Поскольку импульс как электронов, так и протонов равен $v_0 \sqrt{m_i m_e}$, то дальнейшего разделения зарядов не происходит. Энергия, приходящаяся на электронно-протонную пару, не меняется под действием магнитных и электрических сил. Однако импульс электронно-протонной пары сильно уменьшается, тем самым четко ограничивая область высокой напряженности магнитного поля. Для стационарного случая напряженность магнитного поля в области разделения зарядов зависит от x приблизительно как e^{x/x_0} , где

$$x_0^2 = \frac{m_e c^2}{8\pi n_0 e^2}.$$

В нашей задаче необходимо заменить x_0 на $x'_0 = x_0 / (1 - v_l/v_0)$, чтобы учесть уменьшение граничного потока. Эта поправка вызвана тем, что v_{ey} уменьшается за счет поля $\mathbf{v}_l \times \mathbf{B}$.

Таким образом, все электроны в переходной области обладают кинетическими энергиями ~ 1 кэВ и скоростями, на два порядка превышающими скорости протонов. Следовательно, газ

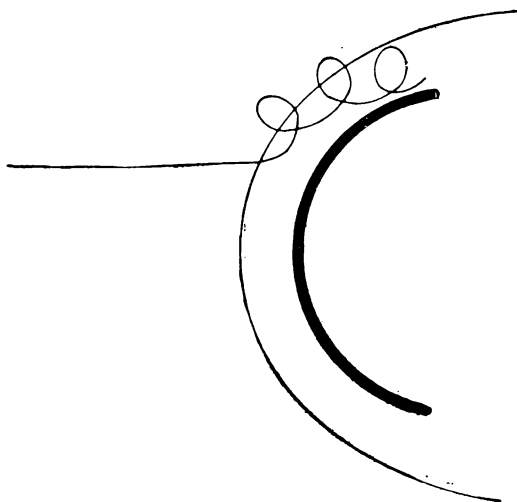


Рис. 5. Траектория частицы в переходной области в голове кометы.

в кометах легче ионизируется электронным ударом, чем при реакции обмена зарядом с протонами. Кроме того, поскольку электроны вращаются вокруг магнитных силовых линий, то число актов ионизации газа на единицу длины магнитной силовой линии не ограничено первоначальной концентрацией зарядов, как это имеет место при обмене зарядом. Сечение при ионизации электронным ударом остается высоким $[(1-3) \cdot 10^{-16} \text{ см}^2]$ даже для электронов с низкими энергиями порядка десятков электронвольт. При этом может быть создано несколько сот ионов в см^3 . Энергичные электроны могут также объяснить наблюдаемое быстрое формирование лучей хвоста. Как отметил Эксфорд (см. обсуждение гл. 24 и 25), электроны будут быстро диффундировать из головы кометы вдоль магнитных силовых линий. Эта диффузия вызовет разделение зарядов, что создаст электрическое поле, параллельное магнитному, и приведет к ускорению кометных ионов вплоть до энергий электронов. Время формирования луча хвоста длиной в 10^{10} см составляет $\sim 5000 \text{ сек}$,

По мере ионизации электронным ударом в переходной области скорость движения магнитных силовых линий в этой области уменьшается, и на большем расстоянии от кометного ядра образуется новый переходной слой. В конце концов концентрация нейтральных молекул в переходной области станет слишком низкой, чтобы поддерживать в дальнейшем значительную ионизацию. Затем процесс прекратится до тех пор, пока луч хвоста достаточно не приблизится к голове кометы, чтобы образовался новый луч.

Ускорение каждой единицы длины луча хвоста изменяется обратно пропорционально его массе и прямо пропорционально давлению nmv^2 солнечного ветра. Для изотропного распределения скорости электронов можно показать, что ускорение линейно зависит от расстояния до головы кометы, поэтому теоретически лучи хвоста должны оставаться прямыми, когда они приближаются к оси структуры хвоста, напоминая движение спиц закрываемого зонтика. Как указывала Люст, ось структуры хвоста параллельна солнечному радиусу-вектору.

Лучи хвоста формируются энергичными электронами в переходном слое, который располагается на внешней поверхности «замедленных» межпланетных магнитных силовых линий. Толщина области замедленных магнитных силовых линий должна составлять по крайней мере 10^3 км, чтобы толщина переходной области, определенная по магнитному потоку, была больше ларморовского радиуса протонов. Иначе при разделении зарядов не будет возникать электрическое поле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Biermann L., Zs. Astrophys., 29, 274 (1951).
2. Alfvén H., Tellus, 9, 92 (1957).
3. Harwit M., Hoyle F., Astrophys. J., 135, 875 (1962).
4. Biermann L., Trefftz E., Zs. Astrophys., 49, 111 (1960).
5. Ferraro V. C. A., J. Geophys. Res., 57, 15 (1952).
6. Dungey J. W., Cosmic Electrodynamics, Cambridge Univ. Press., New York, 1958. (Русский перевод: Дж. Данжи, Космическая электродинамика, М., Госатомиздат, 1961.)
7. Rosenbluth M. N., Magnetohydrodynamics, ed. R. K. M. Landshoff, Stanford Univ. Press, Stanford, Calif., 1957, p. 57.
8. Beard D. B., J. Geophys. Res., 65, 3359 (1960).
- 9*. Beard D. B., Planet. Space Sci., 14, № 4, 303 (1966).

МАГНИТОСФЕРА ЛУНЫ

Т. Голд

Луна, так же как и кометы, является препятствием на пути солнечного ветра. Во многих отношениях анализ взаимодействия Луна — солнечный ветер подобен анализу взаимодействия комета — солнечный ветер. Можно развить довольно исчерпывающую теорию и предсказать явления, которые должны наблюдаться около Луны вследствие этого взаимодействия.

Все это справедливо, если только Луна не имеет собственного магнитного поля. Если же магнитное поле Луны существует, то это внесет существенные поправки в результаты исследований. Предположим, что Луна в основном состоит из горных пород, обладающих лишь незначительными остаточными магнитными полями. В этом случае можно определить, что произошло бы, если бы Луна намагнитилась лишь за счет взаимодействия с солнечным ветром.

Магнитное поле вокруг неподвижной Луны

Характерное время намагничивания Луны внешним полем равно $L^2\mu\sigma$, где L — характерный размер (скажем, диаметр), μ — магнитная проницаемость и σ — электропроводность. Исходя из того, что Луна состоит из пород, подобных породам земной коры, но что ее недра, по-видимому, не разогреты очень сильно, можно заключить, что характерное время лежит в пределах от 1 месяца до сотни лет (а то и больше). Скорее всего оно составляет несколько лет. Во всяком случае, важно то, что это характерное время наверняка велико по сравнению с лунными сутками. Следовательно, Луна совершит много оборотов за период естественного затухания магнитного поля.

Предположим, что Луна вообще не обладает магнитным полем (рис. 1) и что солнечный ветер сталкивается с поверхностью Луны. Проводимость плазмы нарушается, поскольку сталкивающиеся с поверхностью Луны ионы плазмы рекомбинируют. Луна должна приобрести проводимость за счет ионов и электронов солнечного ветра.

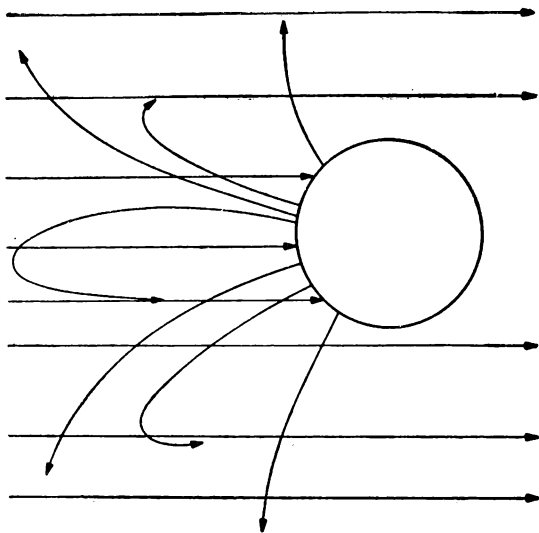


Рис. 1. Траектории частиц солнечного ветра (протоны с энергией $1-10$ кэв и малоэнергичные электроны), поражающих немагнитную Луну. Лишь нейтральные частицы термически переизлучаются.

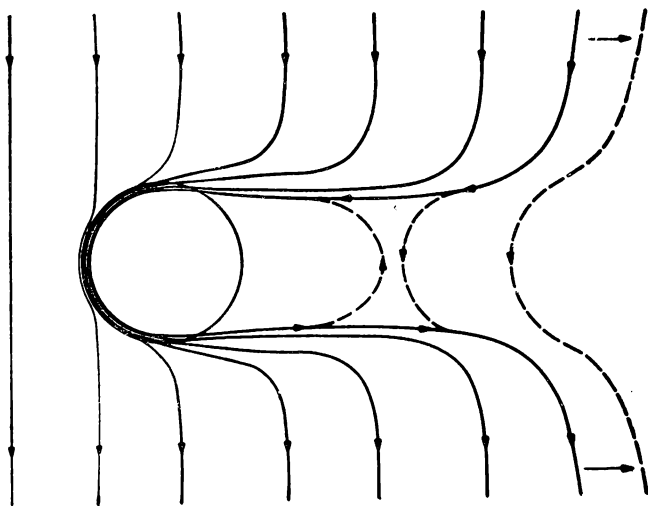


Рис. 2. Образование магнитной полости, когда магнитные силовые линии, пронизывающие солнечный ветер, накапливаются на лобовой поверхности Луны.

Итак, хотя мы и начали с предположения о ненамагниченности Луны, тем не менее за короткое время магнитные силовые линии, переносимые солнечным ветром, просачиваются через дневную сторону Луны (рис. 2). Если характерное время таково, что магнитные силовые линии не могут пройти сквозь Луну со скоростью солнечного ветра, т. е. в течение нескольких секунд, то магнитные силовые линии будут сосредоточены с лобовой стороны. Характерное время, безусловно, больше нескольких секунд.

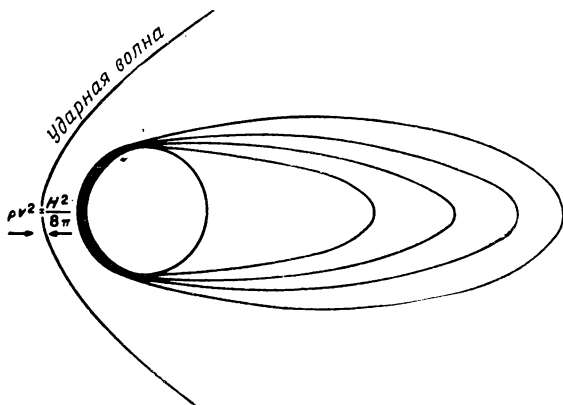


Рис. 3. Конечная стадия развития магнитосферы Луны после того, как диссипативные процессы привели к замыканию магнитных силовых линий в турбулентном следе.

Последующие силовые линии продолжают двигаться к Луне со скоростью нескольких сот км/сек, так что должны генерироваться соответствующие электрические поля, которые будут возмущать силовые линии. Поскольку солнечному ветру потребуется всего лишь несколько секунд, чтобы пройти сквозь Луну, то ясно, что позади Луны образуется длинная труба, в которой отсутствует магнитное поле, а с передней стороны магнитные силовые линии накапливаются.

Как долго будет продолжаться этот процесс? Магнитные силовые линии около передней поверхности будут утрамбовываться до тех пор, пока ни одна силовая линия не сможет проникнуть за счет лобового давления ветра. Напряженность магнитного поля, которая образуется на передней части поверхности Луны, будет равна напряженности в области полного торможения потока (рис. 3). Для нормального солнечного ветра с концентрацией $n=4$ частиц/см³ и скоростью $v=300$ км/сек напряженность магнитного поля в зоне полного торможения равна 30 γ.

Чтобы перевести магнитное поле из состояния, присущего межпланетному пространству, в состояние, характерное для области торможения, газ должен быть сжат всего лишь в ~ 10 раз. Таким образом, потребуется лишь несколько секунд для создания магнитного поля, характерного для области полного торможения потока. Область усиленного поля будет располагаться совсем близко к лобовой поверхности, поскольку несколько секунд соответствуют глубине проникновения магнитного поля только на несколько километров. Таким образом, на лобовой стороне образуется тонкий магнитный скин-слой.

Позади Луны возникает обычная ситуация для диссипации магнитного поля. Противоположно направленные магнитные силовые линии становятся смежными в вытянувшемся турбулентном следе, а при низкой концентрации это приведет к возникновению быстрых диссипативных процессов, которые обусловят пересоединение магнитных силовых линий и уменьшение энергии поля¹⁾. В результате магнитные силовые линии замыкаются позади Луны, как это показано на рис. 3.

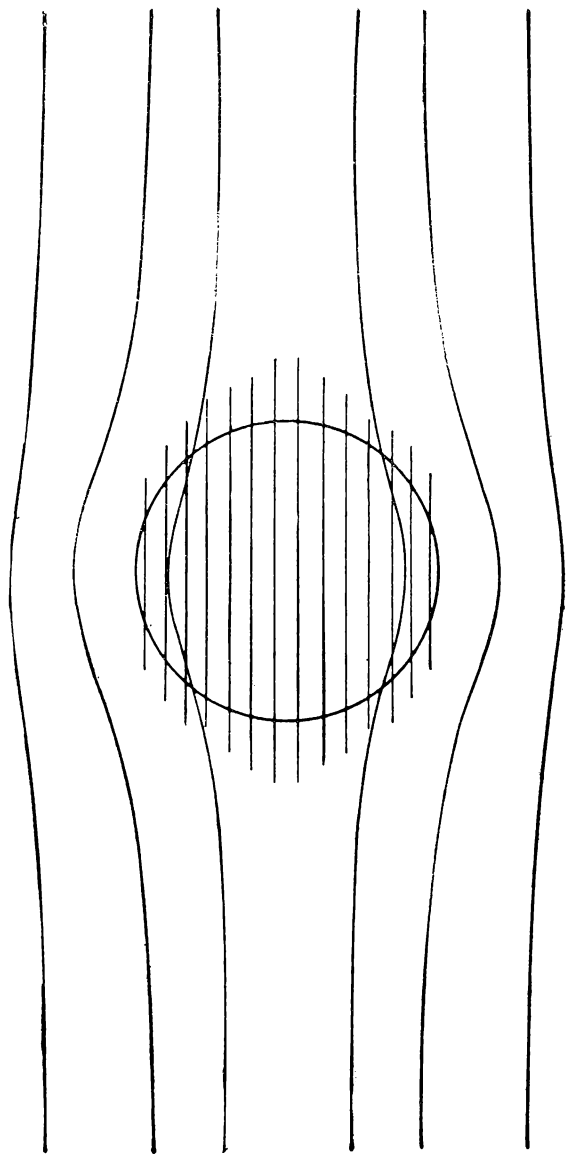
Итак, понятно, что поскольку напряженность магнитного поля с лобовой стороны достигла такой величины, что газ больше не сталкивается непосредственно с Луной, то образуется стоячая ударная волна, подобная той, которая имеется перед Землей. Эта ударная волна образуется при условии, что ее толщина значительно меньше радиуса Луны.

Безусловно, в этом случае ударная волна будет располагаться очень близко к Луне и любое изменение давления в области полного торможения будет сильно изменять положение ударной волны, тогда как положение ударной волны около Земли сильно стабилизируется геомагнитным полем. Около Луны имеются лишь принесенные солнечным ветром магнитные поля, и конфигурация поля при этом не оказывает стабилизирующего влияния, свойственного дипольному полю.

На рис. 4 представлен вид лунной магнитосферы, если смотреть с ночной стороны. Этот рисунок наглядно показывает, что раз давление в точке полного торможения достигнуто, то магнитное поле будет рассекается и обтекать Луну, смещаясь в поперечном направлении.

Таким образом, на лобовой стороне Луны существует заторможенное магнитное поле. Если давление в точке полной остановки потока немного увеличивается, то за время, исчисляемое секундами, Луна еще немного намагнитится. Если давление в точке полной остановки потока слегка уменьшится, то возникнет стоячая ударная волна с лобовой стороны Луны, а

¹⁾ См. гл. 15 и 18. — *Прим. ред.*



Р и с. 4. Вид лунной магнитосферы с ночной стороны. Показан характер отклонения магнитных силовых линий в солнечном потоке.

магнитопауза по существу будет находиться за пределами тела Луны. Как только давление падает, плазменный поток рассекается и обтекает Луну. Луна бомбардируется газом лишь в том случае, если давление в точке полной остановки потока увеличивается.

Таким образом, напряженность магнитного поля, переносимого солнечным ветром, не играет существенной роли. Если бы напряженность поля в солнечном ветре составляла всего лишь 10^{-7} эс, то наше описание почти не изменилось бы, потребовалось бы немного больше времени, чтобы вдавить магнитное поле области торможения в лобовую поверхность Луны.

Эффект вращения

Во вращающемся теле, намагничиваемом с одной стороны, составляющая поля вдоль оси вращения более устойчива. Составляющая в экваториальной плоскости уничтожается за счет вращения, поскольку поле, перенесенное на ночную сторону, будет направлено противоположно полю на лобовой стороне. Поскольку полярная составляющая не изменяет своего направления при вращении, она сохраняется, постепенно затухая. Были проделаны расчеты для намагничивающейся сферы, вращающейся вокруг оси, перпендикулярной к направлению поля. Это хорошо известный случай, поскольку сфера ведет себя как диамагнетик. Когда проводящая сфера вращается вокруг оси, перпендикулярной к магнитному полю, то поле не проникает внутрь сферы. Нейтральная точка всегда образуется в середине, а магнитное поле уничтожается.

Дэвис. В этом расчете требуется, чтобы внешнее поле было приложено с обеих сторон сферы или только с одной стороны?

Голд. Лишь с одной стороны. Если поле приложено с одной стороны, то, переместившись на другую сторону, оно удвоится.

Можно ожидать, что составляющая магнитного поля, переносимого солнечным ветром, которая направлена вдоль оси вращения Луны, с течением времени создаст полоидальное магнитное поле вдоль оси Луны. Напряженность этого полоидального поля зависит от того, сколько времени статистически магнитное поле солнечного ветра имеет одно направление и сколько времени оно имеет другое направление. Кроме того, оно зависит от постоянной времени затухания. Поэтому будут создаваться и затухать слои с противоположно направленными магнитными полями.

Очень трудно определить ситуацию в мультиполярном случае, поэтому рассмотрим униполярный случай. Для простоты

предположим, что Луна всегда находится в магнитном поле одной полярности, направленном вдоль оси вращения Луны. Затем предположим, что непосредственно перед Луной с дневной стороны имеется магнитное поле, в частности магнитное поле области торможения. В таком случае магнитное поле области торможения будет проникать на некоторую глубину в дневную сторону Луны, а с ночной стороны магнитное поле практически отсутствует. Если Луна вращается очень быстро по сравнению с характерным временем проникновения магнитного поля, то на дневной стороне будет тонкий слой с напряженностью, равной напряженности поля в области торможения, а с ночной стороны будет тонкий слой, в котором напряженность резко падает до нуля. Между этими двумя слоями напряженность магнитного поля будет постоянной, равной примерно половине напряженности в области торможения.

Диффузия осевой составляющей магнитного поля в проводник и теплопроводность описываются одним и тем же уравнением, т. е. эта задача аналогична нагреванию вращающейся сферы источником тепла, расположенным с одной ее стороны. Вся сфера нагреется до одинаковой температуры, только со стороны источника будет более горячий, а с противоположной стороны более холодный тонкий слой. Если сфера вращается с такой скоростью, что период вращения приближается к характерному времени диффузии, то распределение температуры будет более пологим. Следовательно, вполне возможно, что кривая намагничивания Луны даст информацию относительно внутренней проводимости.

Все эти выводы усложняются тем обстоятельством, что межпланетное магнитное поле не всегда имеет одно и то же направление, так что магнитное поле на Луне может содержать узлы. Перемещаясь с магнитометром по поверхности Луны, можно было бы обнаружить мультипольное поле, которое возникло в периоды противоположной намагниченности. Можно было бы обнаружить несколько циклов по выходящим наружу магнитным силовым линиям противоположной полярности. Если характерное время для Луны очень велико (около ста лет), то вполне возможно, что несколько таких узлов сохранится.

Предлагаемый эксперимент

Спутник Луны с низкой орбитой позволил бы независимо решить проблему узлов, изменение направления составляющей магнитного поля, перпендикулярной к плоскости эклиптики, со временем, а также изменение давления солнечного ветра в точке

полного торможения¹⁾. Лучше, если орбита спутника будет полярной, а не экваториальной. Желательно, чтобы на спутнике были установлены приборы, способные обнаружить более высокие гармоники, чем самые низкие гармоники лунного полоидального поля. По полученным данным можно было бы определить характерное время для Луны и узнать, каково было поле в прошлом. Таким образом, можно было бы выявить, например, влияние солнечного цикла. Мы предполагаем, что имеется полоидальное поле, направленное вдоль оси вращения, и его напряженность равна напряженности, определяемой из условия равенства давления этого поля и давления солнечного ветра в точке полной остановки потока, усредненной за период, равный характерному времени. Построив карты этого поля, можно было бы изучать изменение солнечного ветра во времени.

Энергичные электроны и рентгеновские лучи

Иногда около Луны может существовать ударная волна. Такая ударная волна имеет место, если ударное взаимодействие происходит в слое, достаточно тонком по сравнению с размерами Луны. Поэтому следует ожидать, что, как и в случае с Землей, ударная волна порождает энергичные электроны, т. е. стремится очень быстро передать электронам часть энергии протонов. Это явление, по-видимому, наблюдалось на спутнике «ИМП-1» (см. гл. 21). Если ударная волна действительно создает энергичные электроны, то интересно узнать, что произойдет с этими электронами, поскольку интенсивность потоков электронов довольно высока (около $10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$). В течение большей части времени электроны будут ударяться о поверхность Луны и убегать с нее. Ударная волна легко могла бы проникнуть в лунную поверхность и перенести с собой генерированные электроны. В результате этого процесса будет создан весьма изменчивый во времени источник рентгеновского излучения.

Интенсивность рентгеновского излучения будет преобладать в периоды магнитных бурь, поскольку именно тогда это явление значительно. Если солнечный ветер с концентрацией 10 частиц/см^3 и скоростью 1000 км/сек отдает свою энергию электронам, которые

¹⁾ Первый спутник Луны «Луна-10» позволил выполнить довольно обширные исследования магнитного поля в окрестности Луны, а также рентгеновского излучения Луны, излучения Луны в инфракрасной и видимой областях спектра, корпускулярной радиации, плазмы в окрестности Луны, гамма-излучения лунной поверхности [см. Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко, Л. Н. Жузгов, И. А. Жулин, Геомагнетизм и аэрномия, 7, № 3, 436 (1967)]. — *Прим. перев.*

затем поражают Луну, то плотность потока энергии, падающей на лунную поверхность, будет равна $10 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$. Если эффективность генерации рентгеновского излучения этими электронами составляет 10^{-4} или 10^{-3} (это характерная величина для электронов с энергией несколько кэв), то плотность потока энергии рентгеновского излучения равна 10^{-3} или $10^{-2} \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$. Поток энергии от всей Луны будет составлять $2 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{15} \text{ эрг/сек}$, или $20 - 200 \text{ Мвт}$. Если энергия рентгеновского излучения равна $\sim 5 \text{ кэв}$ (при более низкой эффективности генерации), то этот поток соответствует интенсивности 10^{22} квантов на Луне, или $1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ на Земле. Эту величину трудно, но все же возможно измерить.

Эти величины соответствуют не очень сильной магнитной буре. Поток плазмы с концентрацией 10 частиц/см^3 и со скоростью 10^3 км/сек довольно часто имеет место в период максимума солнечной активности. Поскольку эффективность генерации рентгеновского излучения будет сильно изменяться в зависимости от скорости, то источник рентгеновского излучения будет очень неустойчив даже в течение магнитной бури.

Не следует думать, что рентгеновское излучение будет наблюдаться в течение всей магнитной бури. Оно создается лишь в периоды увеличения давления и никогда не создается в периоды понижения давления. По сути дела, будет обнаруживаться производная по времени магнитной бури.

Это рентгеновское излучение Луны может представлять большую опасность для космонавтов. Потоки рентгеновского излучения не так уж слабы, и хотя рентгеновское излучение с энергией 5 кэв не является слишком жестким, чтобы его было трудно экранировать, тем не менее вряд ли легкого костюма космонавта будет достаточно для защиты. К тому же очень часто энергия рентгеновского излучения превышает 5 кэв . Рентгеновские лучи будут также оказывать весьма существенное воздействие на все фотографическое оборудование.

Хотя рентгеновское излучение легче всего обнаружить со спутника, его можно измерить и с Земли. Измерения потоков рентгеновского излучения прежде всего должны показать, верна ли основная гипотеза о том, что следует ожидать сильного увеличения интенсивности рентгеновского излучения в зависимости от изменения давления в точке полной остановки. Кроме того, такие измерения показали бы также, образуется ли около Луны ударная волна и в состоянии ли она, подобно ударной волне у Земли, сказочно быстро генерировать горячие электроны.

Луна — весьма подходящий объект как для исследования магнитогидродинамического течения солнечного ветра, так и поведения этого течения во времени.

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА ГОЛДА

Петчек. Верно ли, что полный магнитный поток Луны должен быть меньше произведения 15γ (что составляет половину напряженности магнитного поля в области полного торможения) на площадь лунного диска, а может быть еще меньше из-за изменений направления поля?

Голд. Да.

Колбон. Оказывает ли влияние на аккумуляцию атмосферы движение магнитных силовых линий вокруг Луны, поскольку небольшое количество тяжелых элементов солнечного ветра обтекают Луну, а не аккумулируются?

Голд. Если какой-либо газ выходит из Луны, то после его ионизации (оценки показывают, что максимальное время ионизации не превышает недели) он застрянет в солнечном ветре. Затем эти ионы за доли секунды приобретут скорость, равную скорости солнечного ветра. Большинство образовавшихся ионов покидает Луну и теряется ее атмосферой. При этих условиях физически невозможно образование атмосферы за счет медленного испарения газа из недр. Совершенно бесполезно рассматривать ксенон, криптон и другие тяжелые молекулы, поскольку сила тяжести фактически не оказывает никакого влияния на *ионизованный* газ.

Маккин. Как влияет на ваши выводы предположение о наличии изолирующей поверхностного слоя?

Голд. Если покрыть Луну диэлектриком, который может выдерживать напряжение в киловольты, то полученные выводы изменятся. Но такой диэлектрик должен быть настолько хорошим изолятором, чтобы характерное время проникновения магнитного поля было порядка секунд. Для горных пород это, по-видимому, невозможно.

Бирман. Можно ли ожидать, что толщина переходной области перед поверхностью Луны составляет несколько ларморовских радиусов? Тогда спутник, движущийся в пределах этого расстояния от поверхности Луны, без труда зарегистрировал бы магнитное поле.

Голд. Да. Однако позади Луны будет вытягиваться длинная «труба» с довольно слабым полем внутри нее. Понятно, что эта труба будет иметь конечную длину. Она сомкнется за счет диссипации, возникающей вследствие близости противоположно направленных магнитных силовых линий. При этом с ночной стороны Луны образуется своего рода полость, заполненная солнечным ветром.

Берд. При этом, по-видимому, следует ожидать хвост типа кометного, но простирающийся гораздо дальше, поскольку ионы в хвостах комет тяжелее.

Голд. Вопрос состоит в том, на какое расстояние простирается эта полость. Вполне возможно, что она простирается вплоть до Земли, во всяком случае, на большую часть расстояния до Земли.

Снайдер. Вряд ли эта полость достигает Земли, иначе она ежемесячно оказывала бы влияние на ее магнитосферу.

Голд. Таких эффектов не обнаружено.

Джюкипи. По-видимому, все же имеется некоторая корреляция между магнитными бурями и положением Луны. Имеются данные о наличии 29-дневного эффекта, помимо 27-дневного эффекта, обусловленного вращением Солнца¹⁾.

Голд. Луна совершает один оборот вокруг Земли приблизительно за время, равное обороту Солнца вокруг своей оси. Это совпадение затрудняет

¹⁾ E. K. Bigg, J. Geophys. Res., **68**, 1409 (1963); **69**, 4099 (1964).

Ряд вопросов о влиянии Луны на геомагнитную активность рассмотрен в работе К. У. Беханнона и Н. Ф. Несса [Геомагнетизм и аэрономия, **6**, № 3, 430 (1966)]. — *Прим. перев.*

статистические исследования. 27-дневную повторяемость довольно трудно отделить от 28-дневной повторяемости, особенно если они замечены всего лишь несколько раз.

Слутц. Но если напряженность магнитного поля у передней поверхности полости была бы $\sim 20 \gamma$ и если бы она простиралась до Земли, то поле около задней поверхности было бы определенно меньше 1γ . Вряд ли можно было обнаружить какой-либо эффект, даже если бы полость простиралась вплоть до Земли¹⁾. Изменение давления, оказываемого на магнитосферу Земли, будет слишком мало по сравнению с давлением солнечного ветра.

Дэвис. Однако полость могла бы создать своего рода вакуум в солнечном ветре.

Голд. Наблюдалось бы изменение потока солнечного ветра, достаточное, чтобы можно было определить, что полость регулярно проносится над магнитосферой Земли. Возможно, такой эффект следует искать лишь в периоды солнечного затмения.

Данжи. Тауэр (Чехословакия) обнаружил существование эффекта в микропульсациях в период солнечного затмения. Я полагаю, что на Земле легче обнаружить именно этот эффект, а не медленно изменяющийся возмущения.

Дэвис. Должна существовать некоторая абберация. Совсем не обязательно, чтобы имело место оптическое затмение.

Голд. Луна должна находиться в определенной плоскости, чтобы имело место оптическое затмение, но в период оптического затмения полость не будет сталкиваться с Землей.

Лиз. Согласно «обычной» гидродинамике, турбулентный след, создаваемый телом необтекаемой формы, движущимся со сверхзвуковой скоростью, простирается за телом на расстояние нескольких тысяч его диаметров. Например, на расстоянии 1000 диаметров тела ширина следа составит примерно 10 диаметров, а температура на оси примерно в 7 раз будет превышать окружающую температуру при скорости движения тела, в 20 раз превышающей скорость звука в окружающей среде. Флуктуации температуры внутри турбулентного следа соответственно велики. Поэтому можно ожидать, что заметные возмущения будут обнаружены на спутнике Земли при прохождении через след Луны в солнечной плазме.

Голд. Размеры полости сильно зависят от скорости аннигиляции противоположно направленных магнитных силовых линий

Лиз. Петчек получил довольно высокую скорость пересоединения²⁾.

Петчек. Турбулентный след, наблюдающийся в аэродинамическом случае, регистрируется на больших расстояниях вследствие использования приборов высокой чувствительности. Я не думаю, что удастся обнаружить очень длинный след, содержащий магнитные флуктуации того же порядка величины, что и само магнитное поле.

Голд. В периоды, когда магнитное поле Луны снова пополняется, возникает мгновенная конфигурация, в которой ионы ударяются о поверхность. Однако электроны не проделывают этого, поскольку их импульс гораздо меньше. Таким образом, в такие моменты потенциал Луны возрастает до значительной части потенциала протона ($\sim 5 k\phi$) и будет воздействовать на электроны. Поскольку солнечный ветер иногда достигает поверхности Луны, Луна будет часто иметь значительный электростатический потенциал. Это предположение неверно лишь в том случае, если проводимость достаточна

¹⁾ См. гл. 28 и примечание переводчика к ней. — *Прим. ред.*

²⁾ H. E. Petschek, AAS—NASA Symposium on the Physics of Solar Flares, SP-50, ed. W. M. Hess, NASA, Washington, D. C., 1964. (См. также гл. 15 и 18. — *Прим. ред.*)

для того, чтобы разрядить потенциал вдоль нейтральной плоскости в направлении, перпендикулярном как магнитному полю, так и солнечному ветру.

Дэвис. На рис. 3 гл. 27 видно, что имеется довольно существенный магнитный поток между поверхностью Луны и ударной волной. Теперь предположим, что суммарный импульс солнечного ветра утраивается. Тогда переходный слой сжался бы до одной трети своей первоначальной толщины, напряженность магнитного поля увеличилась бы в три раза, а его давление в девять раз. Не прекратится ли этот процесс, прежде чем газ достигнет Луны?

Голд. Сжатие может прекратиться до того, как ударная волна достигнет Луны, но часть газа, расположенного за ударной волной, проникнет в Луну. В конце концов этот газ все-таки будет течь.

Дэвис. Но теперь он будет течь довольно медленно. После прохождения через ударную волну он будет замедляться.

Голд. Да. Но часть газа должна достигать лунной поверхности, чтобы новые магнитные силовые линии вошли в Луну.

Дэвис. Газ подталкивает старые магнитные силовые линии.

Голд. Они пронизывают газ и не будут двигаться внутрь поверхности Луны. Исключение составляют лишь те, которые проходят вместе с газом. Если газ не будет проникать в поверхность Луны, то магнитное поле исчезнет полностью. Существование навешанных магнитных силовых линий всегда зависит от того факта, что часть газа врзается в Луну, хотя не обязательно с первоначальной скоростью.

Бирман. Были ли попытки измерить рентгеновское излучение Луны?

Голд. Даже при довольно благоприятных предположениях, которые я сделал, не так уж легко зарегистрировать рентгеновское излучение Луны с Земли. Поставленные эксперименты не обладали достаточной чувствительностью. Таким образом, нет доказательств против лунного рентгеновского излучения.

Снайдер. Это рентгеновское излучение должно регистрироваться в виде вспышек длительностью несколько секунд?

Голд. Да.

Г л а в а 28

ВЕРОЯТНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО СЛЕДА ЛУНЫ

Н. Ф. Несс

Введение

Наиболее очевидное взаимодействие Луны и Земли — гравитационное взаимодействие, в котором сила притяжения Луны приводит к суточным изменениям силы тяжести на Земле. Это изменение по величине составляет несколько десятков микрогал, где 1 гал равен ускорению 1 см/сек². Этот тип взаимодействия достаточно хорошо изучен. Предполагается, что вариации тяготения также оказывают влияние на атмосферу и что существуют лунные приливы в атмосфере, так же как и лунные приливы жидкой оболочки и твердой части земного шара. Суточные геомагнитные вариации связывались с действием притяжения Луны на атмосферу Земли.

Любое геомагнитное явление с периодом 29,5 суток можно связать с лунным магнитным полем или со следом магнитосферы Луны, поскольку в настоящее время известно, что солнечный ветер должен сильно возмущать лунное магнитное поле независимо от его происхождения (см. гл. 27). Имеется много работ о геомагнитных вариациях с периодом 29,5 суток. В зависимости от того, какую именно статью вы прочтете, вы сможете либо доказать, либо опровергнуть существование такого эффекта [1—3]¹⁾.

Данные «ИМП-1», по-видимому, дают первое убедительное доказательство существования лунного следа²⁾. Данные первых четырех витков показывают, что магнитное поле межпланетной среды было очень устойчивым, а его напряженность была довольно низкой (см. гл. 6), хорошо были видны магнитопауза и ударная волна. Однако 14 декабря 1963 г. на пятом витке вариации и напряженность магнитного поля превысили значения, которые обычно измерялись далеко за пределами ударной волны

¹⁾ См. также примечание переводчика на стр. 427. — *Прим. ред.*

²⁾ В работах [4*, 5*] дается другая интерпретация этих данных, тем не менее Несс настаивает на своей точке зрения [6*, 7*]. — *Прим. перев.*

Земли. Такое состояние длилось в течение некоторого времени, а затем поле и его вариации вернулись к своему обычному уровню. Затем спутник снова прошел через ударную волну на нисходящей части витка.

Я рассмотрю относительное положение Луны, спутника и Земли. В будущем мы исследуем данные более тщательно, чтобы лучше понять наблюдавшееся явление ¹⁾.

Положение спутника и Луны в период обнаружения лунного следа

На рис. 1 показана проекция на плоскость эклиптики относительного положения Луны и спутника в период 5-го витка «ИМП-1». Приведены также положения ударной волны и магнитопаузы. Числа от 12 до 16 означают даты декабря 1963 г.

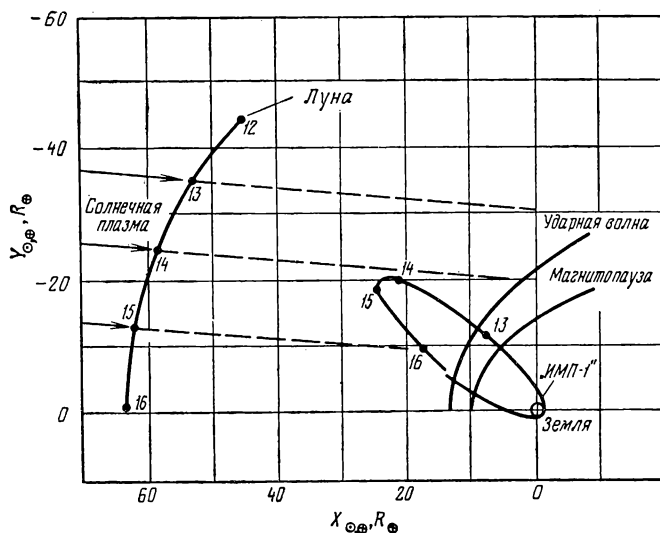


Рис. 1. Проекция положений Луны и «ИМП-1» на плоскость эклиптики, декабрь 1963 г. (5-й виток).

13 декабря 1963 г. «ИМП-1» находился в переходной области. Если допустить 5-градусную аберрацию солнечного ветра и если Луна действительно имеет след, который тянется позади нее в направлении солнечного ветра, то след будет находиться далеко от спутника. Однако 14 декабря относительное положение спут-

¹⁾ Результаты этого исследования изложены в [8*]. — Прим. перев.

ника и Луны было благоприятным для обнаружения лунного следа. 15 декабря Луна прошла мимо спутника, а 16 декабря он вошел в область ударной волны. На рис. 2 представлена проекция положения Луны и спутника на плоскость, перпендикулярную линии Земля — Солнце.

Введем ряд характерных параметров. $D_{с,л}$ — расстояние между спутником и Луной, D_{YZ} — проекция $D_{с,л}$ на плоскость YZ . λ_{YZ} (рис. 2) — зенитный угол вектора D_{YZ} в плоскости YZ . Глядя сверху на плоскость эклиптики, мы определяем азимутальный

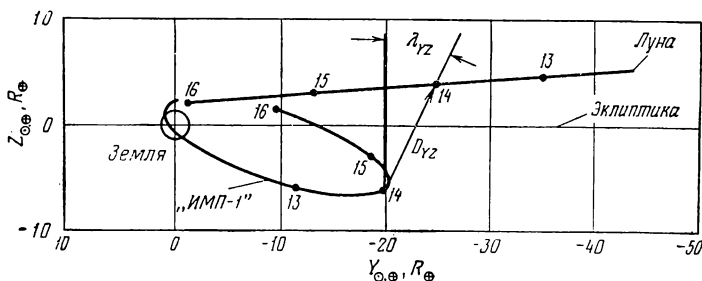


Рис. 2. Проекция положений Луны и «ИМП-1» на плоскость, перпендикулярную линии Земля — Солнце, декабрь 1963 г. (5-й виток).

угол $\lambda_{ху}$. На рис. 3 приведены эти параметры для критического периода в декабре 1963 г.

В точке, где кривые λ_{YZ} и $\lambda_{ху}$ пересекаются, Луна почти закрывала Солнце. Спутник в это время находился на расстоянии $\sim 9 R_{\oplus}$, или 33 лунных радиуса (R_L), ниже линии Солнце — Луна, тогда как расстояние между спутником и Луной составляло $\sim 38 R_{\oplus}$, или 140 R_L .

Аберрация солнечного ветра изменяет $\lambda_{ху}$ на величину, равную углу аберрации, т. е. $\sim 5^\circ$. $D_{Y'Z}$ является проекцией $D_{с,л}$ на плоскость $Y'Z$, которую можно получить поворотом плоскости YZ на угол 5° относительно нормали к линии Земля — Солнце. Существует различие между D_{YZ} и $D_{Y'Z}$, особенно в периоды максимального приближения к линии «видимое Солнце» — Луна.

В начале 13 декабря «ИМП-1» прошел через ударную волну в межпланетное пространство, где данные были аналогичны полученным на витках 1—4 и 6—9. Примерно с полудня 13 декабря и до полудня 15 декабря характеристики данных магнитного поля сильно изменились. Поле стало турбулентным; максимум турбулентности наступил в середине 14 декабря, прежде чем спутник достиг апогея. Максимальная напряженность магнит-

ного поля, наблюдавшаяся примерно в течение 3 час 14 декабря, составляла 14,6γ.

Когда стали поступать эти данные, мы подумали, что прибор отказал, но на последующих витках мы убедились в нормальном функционировании прибора. После этого мы вынуждены были пересмотреть объяснение вариаций магнитного поля.

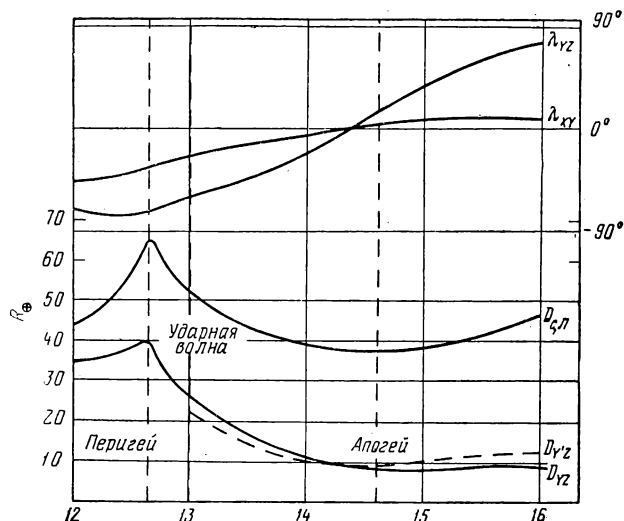


Рис 3. Графики углов λ_{YZ} и λ_{XY} и расстояний $D_{с, л}$, D_{YZ} и $D_{YZ'}$ для периода с 12 по 16 декабря 1963 г. (5-й виток).

Исследование условий на Солнце, геомагнитного индекса K_p и магнитограмм для полярной области не показало каких-либо аномалий по сравнению со спокойными условиями, поэтому мы считаем, что эти данные являются доказательством существования магнитогидродинамического следа Луны, взаимодействующей с солнечным ветром.

Пересечения следа Луны в январе и феврале

На рис. 4 представлено положение спутника в плоскости эклиптики в январе 1964 г. 11 января (13-й виток) «ИМП-1» находился вблизи апогея, двигаясь к перигею. 13 января, когда мимо проходила Луна, спутник находился внутри магнитосферы. Таким образом, в это время нельзя было непосредственно обна-

ружить след Луны, хотя на нисходящей части 13-го витка выявилось довольно аномальное поведение ударной волны (см. гл. 21). Проекция положений спутника и Луны на плоскость YZ приведены на рис. 5. Соответствующие расстояния и углы представлены

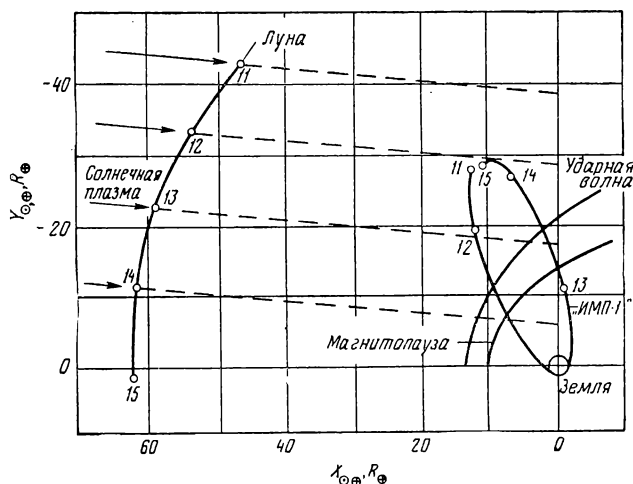


Рис. 4. Проекция положений Луны и «ИМП-1» на плоскость эклиптики, январь 1964 г. (13-й виток).

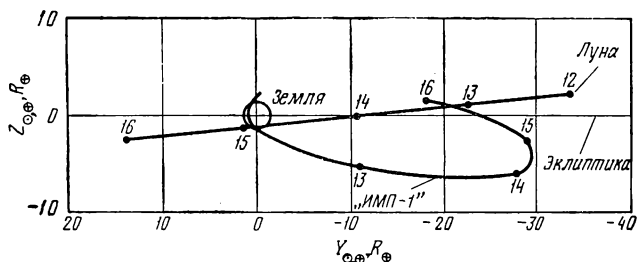


Рис. 5. Проекция положений Луны и «ИМП-1» на плоскость, перпендикулярную линии Земля—Солнце, январь 1964 г. (13-й виток).

на рис. 6. Они показывают, что угловое положение было благоприятным для регистрации лунного следа, когда спутник находился между перигеем и ударной волной.

На рис. 7 приведены участки 20-го и 21-го витков (февраль). Когда мимо прошла Луна, спутник находился около апогея. Если бы след простирался на расстояние $58 R_{\oplus}$ (или $194 R_{\text{л}}$), то его можно было бы обнаружить. Однако при первом анализе

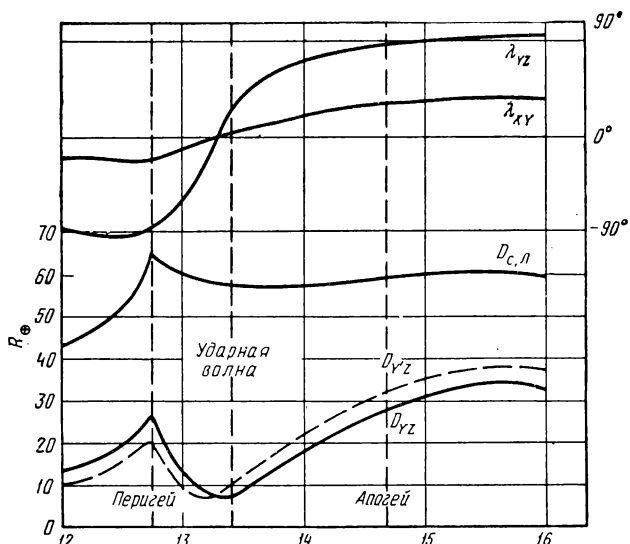


Рис. 6. Зависимость углов λ_{YZ} и λ_{XY} и расстояний $D_{с,л}$, D_{YZ} и $D_{Y \cdot Z}$ от времени для периода с 12 по 16 января 1964 г. (13-й виток).

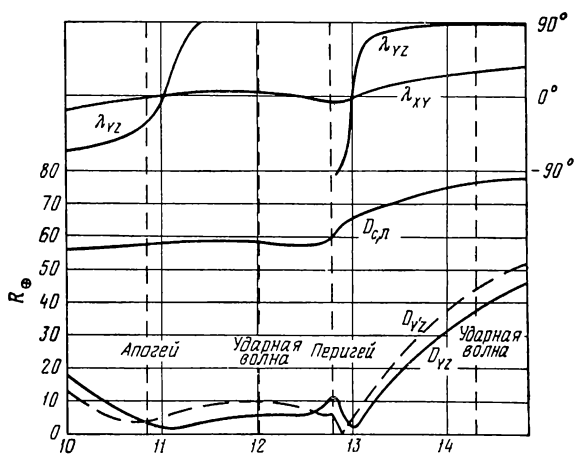


Рис. 7. Графики углов λ_{YZ} и λ_{XY} и расстояний $D_{с,л}$, D_{YZ} и $D_{Y \cdot Z}$ для периода с 10 по 14 февраля 1964 г. (20-й и 21-й витки).

данных 20-го витка нам не удалось найти каких-либо указаний на существование лунного следа, аналогичных наблюдавшимся в декабре. Это свидетельствует о том, что спутник находился за пределами лунного следа.

Рассмотрение структуры потока

На рис. 8 схематически изображен лунный след, как мы его себе представляем, причем длина следа согласуется с нашими данными. В докладе Несса (гл. 22) был сделан вывод, что

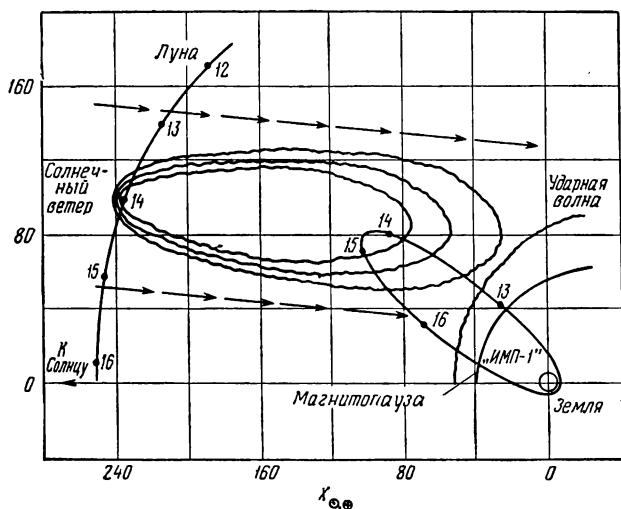


Рис. 8. Схема лунного следа в плоскости эклиптики, нанесенная на рис. 1. Расстояние дается в единицах 1000 миль (1 миля $\approx 1,6$ км).

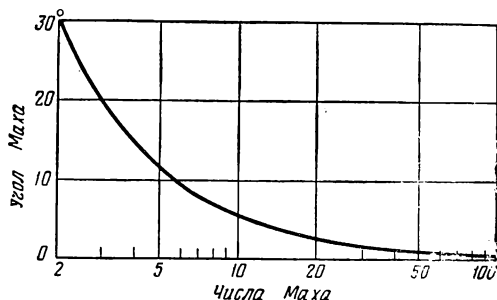


Рис. 9. Угол Маха в зависимости от числа Маха для сверхзвукового обтекания тела.

поток солнечного ветра вокруг магнитосферы имел число Маха 7—10. Из рис. 9 следует, что этот диапазон числа Маха соответствует углам Маха 5,5—8°. В период декабрьского пересечения след был обнаружен, когда спутник находился на расстоянии $\sim 8 R_{\oplus}$ от линии Солнце — Луна и $40 R_{\oplus}$ от Луны. Таким образом, наблюдаемый угол, не превышающий $11^{\circ},3$, согласуется с предположением, что нам удалось отождествить лунный след.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bigg E. K., J. Geophys. Res., **69**, 4099 (1964).
2. Michel F. C., Dessler A. J., Walters G. K., J. Geophys. Res., **69**, 4177 (1964).
3. Stolov H. L., Cameron A. G. W., J. Geophys. Res., **69**, 4975 (1964).
- 4*. Иванов К. Г., Геомагнетизм и аэрономия, **5**, № 4, 751 (1965).
- 5*. Hirsberg J., J. Geophys. Res., **71**, № 17, 4202 (1966).
- 6*. Несс Н. Ф., Геомагнетизм и аэрономия, **6**, № 2, 380 (1966).
- 7*. Ness N. F., J. Geophys. Res., **71**, № 17, 4205 (1966).
- 8*. Ness N. F., J. Geophys. Res., **70**, № 3, 517 (1965).

ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДА НЕССА

Берд. Не встречалось ли что-либо подобное в данных «Маринера-2» при полете мимо Венеры?

Снайдер. Нет. «Маринер-2» прошел мимо Венеры с дневной ее стороны. Он никогда не находился вблизи хвоста.

Дейч. В связи с явлениями, имеющими отношение к Луне, упоминалась также погода. Боуэн и др.¹⁾ указывали на связь между количеством осадков и долготой Луны.

Несс. По-видимому, существует много связанных с Луной явлений. Однако некоторые исследователи неправильно интерпретировали статистические корреляции явлений, не связанных физически.

Эксфорд. Недавно Мичел, Десслер и Вальтерс²⁾ исследовали корреляцию между индексом K_p геомагнитной активности и Луной. Им не удалось найти корреляцию между фазой Луны и индексом K_p .

Несс. Не следует придавать слишком много значения корреляции с индексом K_p , так как он не подчиняется обычным алгебраическим действиям, например сложению и вычитанию, столь необходимым при вычислении коэффициентов корреляции.

¹⁾ E. E. Adderley, E. G. Bowen, Science, **137**, 749 (1962). E. K. Bigg, Nature, **197**, 172 (1963). D. A. Bradley, M. A. Woodbury, G. W. Bier, Science, **137**, 748 (1962).

²⁾ F. C. Michel, A. J. Dessler, G. K. Walters, J. Geophys. Res., **69**, 4177 (1964).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию	5
Предисловие редакторов	9
Предисловие С. Чепмена	11

Часть I. Явления, наблюдаемые в межпланетном пространстве

Глава 1. Измерение солнечного ветра на «Маринере-2» (<i>М. Нейгебауэр и К. У. Снайдер</i>)	31
Обсуждение доклада Нейгебауэр	48
Глава 2. Связь данных «Маринера-2» о плазме с явлениями на Солнце (<i>К. У. Снайдер и М. Нейгебауэр</i>)	51
Обсуждение доклада Снайдера	59
Глава 3. Магнитные измерения в межпланетном пространстве (<i>Л. Дэвис, Э. Дж. Смит, П. Дж. Колеман, К. П. Сонетт</i>)	62
Обсуждение доклада Смита	78
Глава 4. Взаимосвязь между высокоэнергичными частицами в космическом пространстве и солнечной плазмой (<i>Х. Р. Андерсон</i>)	81
Обсуждение доклада Андерсона	95
Глава 5. Наблюдения на спутниках частиц с энергиями несколько мегаэлектронвольт в солнечном ветре	98
Наблюдения на «Эксплорере-12» (<i>Д. А. Брайант, Т. Л. Клайн, У. Д. Дизей, Ф. Б. Мак-Дональд</i>)	98
Наблюдения первичных электронов с энергией 3 Мэв на спутнике «ИМП-1» (<i>Т. Л. Клайн, Г. Х. Людвиг, Ф. Б. Мак-Дональд</i>)	102
Обсуждение доклада Клайна	110
Глава 6. Измерения межпланетного магнитного поля на спутнике «ИМП-1» (<i>Н. Ф. Несс</i>)	112
Обсуждение доклада Несса	132
Глава 7. Радиоастрономические наблюдения, связанные с проблемой солнечного ветра (<i>Дж. Д. Уиндхэм</i>)	137
Обсуждение доклада Уиндхэма	148
Глава 8. Что мы знаем и чего не знаем о солнечном ветре (<i>Г. С. Бридж</i>)	151
Обсуждение доклада Бриджа	171

Часть II. Теории межпланетной плазмы, полей и энергичных частиц

Глава 9. Модели межпланетных полей и течения плазмы (<i>Л. Дэвис</i>)	175
Обсуждение доклада Дэвиса	187
Глава 10. Данные о бесстолкновительной гидромагнитной ударной волне в межпланетном пространстве (<i>К. П. Сонетт, Д. С. Колбон, Б. Р. Бриггс</i>)	195
Обсуждение доклада Колбона	203

Глава 11. Магнитные поля в солнечной фотосфере (<i>Р. Б. Лейтон</i>)	206
Обсуждение доклада Лейтона	212
Глава 12. Проникновение галактических космических лучей в солнечную систему (<i>Е. Н. Паркер</i>)	215
Обсуждение доклада Паркера	224

Часть III. Происхождение солнечного ветра и короны

Глава 13. Происхождение солнечного ветра (<i>Ф. Л. Скарф</i>)	231
Обсуждение доклада Скарфа	248
Глава 14. Влияние диффузии на состав солнечной короны и солнечного ветра (<i>Дж. Р. Джокипи</i>)	250
Обсуждение доклада Джокипи	253
Глава 15. Пересоединение и исчезновение магнитных полей (<i>Х. Е. Петчек</i>)	255

Часть IV. Солнечный ветер и магнитосфера

Глава 16. Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой. Гидродинамические аспекты (<i>У. И. Эксфорд</i>)	267
Глава 17. Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой. Частицы (<i>Дж. В. Данжи</i>)	280
Глава 18. Механизм пересоединения силовых линий геомагнитного и межпланетного полей (<i>Х. Е. Петчек</i>)	295
Обсуждение докладов Эксфорда, Данжи и Петчека	300
Глава 19. Топологические изменения магнитосферы (<i>Б. Ю. О. Соннеруп</i>)	312
Глава 20. Движение частиц, захваченных в магнитосферу (<i>Э. У. Хоунз</i>)	319
Обсуждение доклада Хоунза	332
Глава 21. Измерения плазмы на «Эксплорере-18» (<i>Е. Ф. Лайон</i>)	334
Глава 22. Наблюдения магнитного поля вблизи магнитопаузы и в переходной области на спутнике «ИМП-1» (<i>Н. Ф. Несс</i>)	355
Глава 23. Форма магнитосферы и возмущение геомагнитного поля (<i>Г. Д. Мид</i>)	376
Обсуждение докладов Лайона, Несса и Мида	384

Часть V. Взаимодействие солнечного ветра с кометами и Луной

Глава 24. Взаимодействие солнечного ветра с кометами (естественными и искусственными) (<i>Л. Бирман и Р. Люст</i>)	393
Глава 25. Магнитогидродинамические аспекты взаимодействия солнечного ветра с кометами (<i>Л. Бирман</i>)	404
Обсуждение докладов Люста и Бирмана	408
Глава 26. Теория кометных хвостов I типа (<i>Д. Б. Берд</i>)	411
Глава 27. Магнитосфера Луны (<i>Т. Голд</i>)	418
Обсуждение доклада Голда	427
Глава 28. Вероятное наблюдение турбулентного следа Луны (<i>Н. Ф. Несс</i>)	430
Обсуждение доклада Несса	437

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР

Сборник

Редактор *М. Рутковская*

Художник *К. Сиротов*

Художественный редактор *Н. Фильчагина*

Технический редактор *Ю. Экке*

Корректор *Л. Брычкова*

Сдано в производство 15/VII 1968 г.

Подписано к печати 18/XI 1968 г.

Бумага тип. № 1 60×90¹/₁₆ = 13,75 бум. л. 27,5 печ. л.

Уч.-изд. л. 25,92. Изд. № 27/4214

Цена 2 р. 05 к. Зак. № 1360

(Темплан 1968 г. изд-ва „Мир“, пор. № 134)

ИЗДАТЕЛЬСТВО „МИР“

Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ленинградская типография № 2

имени Евгении Соколовой Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.

Измайловский проспект, 29.

