

Новый взгляд на происхождение геомагнитных пульсаций

А. В. Гутьельми



Анатолий Владимирович Гутьельми, доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта АН СССР. Основные научные интересы относятся к исследованию возбуждения и распространения электромагнитных волн в околоземной плазме. Автор монографий: Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы (совместно с В. А. Троицкой). М., 1973; МГД-волны в околоземной плазме. М., 1979.

На поверхность Земли из космического пространства падают электромагнитные волны очень низкой частоты. Они наблюдаются как колебания геомагнитного поля с периодами от долей секунды до нескольких минут. Их называют геомагнитными пульсациями, а иногда — микропульсациями, подчеркивая тем самым, что амплитуда колебаний составляет лишь малую часть величины невозмущенного магнитного поля.

Известно около двух десятков различных видов геомагнитных пульсаций. Они отличаются друг от друга спектральным составом, длительностью, локализацией, характером амплитудной и частотной модуляции. На дневной стороне Земли наблюдаются продолжительные квазимонохроматические колебания, на ночной — спорадически возникают короткие импульсы, спектр которых характеризуется широкой полосой частот. Одни виды пульсаций локализованы только в узкой полосе зоны полярных сияний, другие — наблюдаются на огромных площадях земной поверхности. Существуют пульсации, обнаруживающие замечательную корреляцию в магнитосопреженных точках (местах пересечения силовых линий геомагнитного поля с поверхностью Земли). После солнечных вспышек возника-

ют пульсации с резко нестационарным спектром.

Геомагнитные пульсации обнаружил около ста лет назад шотландский физик Б. Стюарт на обсерватории Кью близ Лондона при попытке повысить чувствительность магнитометра. Сейчас мы знаем, что геомагнитные пульсации были первыми электромагнитными волнами, зарегистрированными человеком. Вряд ли, однако, сам Стюарт мог об этом догадываться. В то время теории Максвелла еще предстояло окончательно сформироваться и завоевать признание. Потребовалось еще несколько десятилетий, прежде чем Х. Альфвен создал магнитную гидродинамику, необходимую для понимания природы пульсаций. Наконец, в результате развития физики плазмы в последние годы появилась реальная возможность построить их теорию.

Общее представление о геомагнитных пульсациях сводится к тому, что это МГД-волны, приходящие на Землю из космоса¹. Такая точка зрения обоснована многочисленными экспериментами

¹ Магнитогидродинамическими (МГД) называют низкочастотные электромагнитные волны в плазме или проводящей жидкости, находящейся в магнитном поле.

и не вызывает сомнений. Значительно менее ясно, в какой части околоземного пространства расположен источник того или иного вида пульсаций. Однако, прежде чем приступить к обсуждению этого вопроса, попытаемся кратко ответить на другой.

ДЛЯ ЧЕГО ИЗУЧАЮТ ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ?

Пульсации, как установлено, возбуждаются в результате неустойчивости околоземной плазмы. Именно этим в первую очередь определяется общезначимое значение их исследования. В самом деле, неустойчивость и связанная с ней нелинейность — наиболее существенные свойства плазмы. Наблюдение МГД-волн естественного происхождения дает возможность в космических масштабах детально изучать эти свойства.

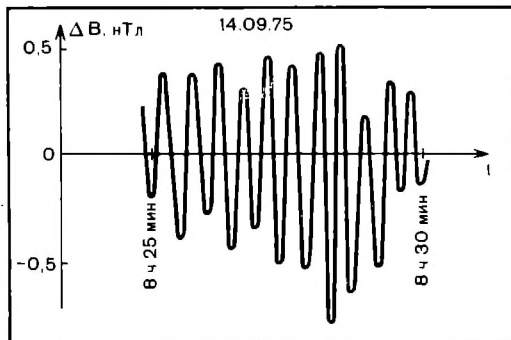
Геомагнитные пульсации содержат информацию о параметрах среды в области генерации волн и на пути их распространения к земной поверхности. Это позволяет сравнительно простыми и дешевыми средствами осуществлять диагностику околоземной среды. Отсюда вполне понятно значение для геофизики вопроса о локализации источников пульсаций.

Важное практическое применение пульсации нашли в геологии, где они используются для индукционного зондирования земной коры при поиске полезных ископаемых.

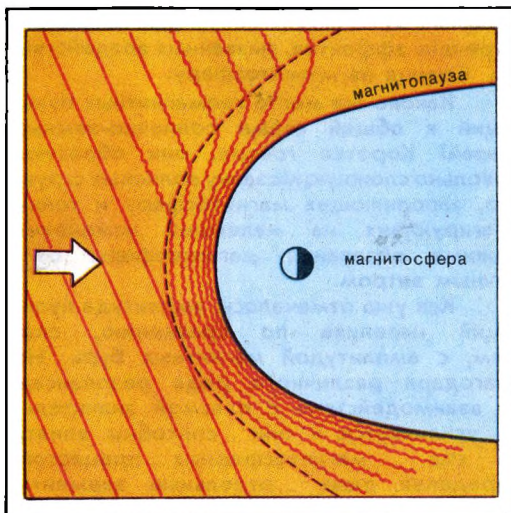
ОКОЛОЗЕМНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО

Земля окружена магнитосферой — областью, занятой геомагнитным полем, источник которого расположен в земном ядре. Если бы Земля находилась в пустоте, то в целом это поле имело бы дипольный характер и, стало быть, магнитосфера простиралась бы до бесконечности. Но межпланетное пространство не пусто. Оно заполнено потоком горячей плазмы, текущим от Солнца, — солнечным ветром. Вместе с плазмой в межпланетную среду выносятся солнечное магнитное поле, силовые линии которого за счет вращения Солнца принимают форму спиралей Архимеда.

Солнечный ветер служит основным фактором, определяющим структуру и динамику магнитосферы. Прежде всего, он ограничивает ее размеры. В направле-



Типичный пример осциллограммы наиболее часто встречающегося вида геомагнитных пульсаций — так называемых Рс 3. По оси абсцисс отложено мировое (гринвичское) время t , по оси ординат — возмущение горизонтальной компоненты геомагнитного поля ΔB , зарегистрированное 14 сентября 1975 г. в обсерватории Борок [Ярославская обл.].



Схематическое изображение околоземного пространства в экваториальной плоскости. Направление солнечного ветра показано стрелкой. Силовые линии межпланетного магнитного поля (выделены цветом), «замороженные» в плазму солнечного ветра, переносятся вместе с нею, обволакивая магнитосферу. От фронта ударной волны (пунктирная кривая) вдоль силовых линий в обратном направлении движется поток отраженных частиц. Неустойчивость этого потока приводит к возбуждению МГД-волн (волнистые линии).

нии на Солнце она простирается примерно на 100 тыс. км, а в противоположном направлении вытянута значительно дальше, образуя длинный геомагнитный хвост. Поверхность, отделяющая магнитосферу от солнечного ветра, полу-

чила название магнитопаузы. Перед магнитопаузой (с «наветренной» стороны) расположен фронт ударной волны, возникающей вследствие обтекания магнитосферы сверхзвуковым потоком солнечного ветра.

Магнитосфера содержит более холодную, чем солнечный ветер, плазму, а также энергичные протоны и электроны радиационных поясов. Ближе к Земле, на высотах от 100 до 1000 км, находится ионосфера — слой частично ионизированного воздуха.

Чтобы охарактеризовать общую картину околоземного пространства, необходимо упомянуть еще о сильной изменчивости солнечного ветра и магнитосферы. Эта изменчивость обусловлена непостоянством солнечной активности. Мощные магнитные бури, изумительной красоты полярные сияния, вариации космических лучей, усиление радиационных поясов — вот далеко не полный перечень эффектов, вызванных воздействием Солнца на магнитосферу.

Каково же место геомагнитных пульсаций в общей схеме солнечно-земных связей? Коротко говоря, они образуют довольно сложную мозаику волновых структур, заполняющих магнитосферу и тонко реагирующих на малейшие изменения режима обтекания магнитосферы солнечным ветром.

Как уже отмечалось, амплитуда пульсаций невелика по сравнению, скажем, с амплитудой магнитных бурь. Но благодаря различного рода резонансам их взаимодействие с плазмой значительно усиливается, и они способны влиять на ход магнитосферных процессов, определяя даже отдельные элементы крупномасштабной структуры магнитосферы. Так, например, геомагнитные пульсации служат причиной модуляции потока заряженных частиц, вторгающихся в ионосферу в зоне полярных сияний, от них зависит положение внешней границы радиационного пояса и т. д.

ГДЕ РАСПОЛОЖЕНЫ ИСТОЧНИКИ ПУЛЬСАЦИЙ?

Донедавнего времени господствовало мнение о том, что геомагнитные пульсации зарождаются в магнитосфере и на ее границе — магнитопаузе. Эта точка зрения нашла свое отражение во всех обзорах и монографиях, опубликованных до 1970 г.² Между тем она не столь очевидна, как может показаться на пер-

вый взгляд. Скажем, почему бы не отождествить по крайней мере некоторые виды пульсаций с МГД-волнами, проникающими в магнитосферу извне, т. е. из солнечного ветра?

Против этой идеи выдвигалось следующее возражение. На пути из солнечного ветра в магнитосферу волна должна преодолеть сложную систему препятствий: фронт околоземной ударной волны, слой турбулентной плазмы, отделяющий этот фронт от магнитопаузы, и, наконец, саму магнитопаузу, при переходе через которую возникают резкие скачки давления, плотности и скорости плазмы, а также напряженности магнитного поля. Считалось, что если даже МГД-волна не затухнет в турбулентном слое, то уж во всяком случае полностью отразится от магнитопаузы и в магнитосферу не проникнет.

Однако эти соображения никогда не были подкреплены расчетами. На самом деле строгий расчет подобной задачи вообще трудно выполнить, учитывая значительную сложность среды, в которой распространяются волны. Поэтому, как всегда в таких случаях, следует обратиться к эксперименту.

Ниже мы рассмотрим экспериментальное доказательство внемагнитосферного происхождения основного вида геомагнитных пульсаций, наблюдаемых повсеместно на дневной стороне Земли, и приведем аргументы в пользу аналогичного происхождения некоторых других видов пульсаций, наблюдаемых в полярных шапках.

ОСНОВНОЙ ВИД ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

Каждый день многочисленные обсерватории, разбросанные по поверхности земного шара, регистрируют почти синусоидальные колебания магнитного поля Земли с периодами от 10 до 45 с. По номенклатуре названий, утвержденной на XIII Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики, их обозначают символом Pc 3. с 46

Цифра отвечает номеру поддиапазона общего частотного диапазона геомагнитных пульсаций, а буквы происходят от сокращения английских слов «pulsation continuous» — непрерывные пульсации.

² См., напр.: Троицкая В. А., Гульельми А. В. — Усп. физ. наук, 1969, т. 97, вып. 3, с. 453; Jacobs J. A. Geomagnetic micropulsations. W. B., 1970.

В начале 70-х годов автором была выдвинута гипотеза о том, что Рс 3, которые до того времени считались колебаниями, сосредоточенными внутри магнитосферы, возбуждаются в солнечном ветре, перед фронтом околоземной ударной волны. Идея приобрела популярность, породила обширную литературу и вызвала дискуссии, не утихающие до сих пор³.

Повышенное внимание исследователей к вопросу о природе Рс 3 можно объяснить рядом причин. Прежде всего, это самый распространенный вид пульсаций: колебания наблюдаются практически непрерывно на обращенной к Солнцу стороне земной поверхности. В определенном смысле они представляют собой основной вид геомагнитных пульсаций. Далее, этот вид пульсаций уже давно используется при исследовании земной коры методом индукционного зондирования и для диагностики состояния магнитосферы. Иными словами, вопрос о происхождении этих пульсаций относится к кругу проблем физики магнитосферы, вызывающих в настоящее время живой интерес.

В конце 60-х годов на искусственных спутниках Земли «Vella-2» и «Explorer-34» были обнаружены необычайные физические явления в солнечном ветре, возле фронта околоземной ударной волны. Одним из наиболее интересных среди них представлялась регистрация сравнительно интенсивного потока протонов, отраженных от фронта и движущихся по спиральям вдоль силовых линий межпланетного магнитного поля в общем направлении к Солнцу. (Напомним, что основной поток солнечной плазмы движется в обратном направлении.) Кроме того, удалось установить наличие МГД-волн в этой области.

Сам факт отражения заметной доли протонов солнечного ветра от фронта ударной волны вызывает удивление. Детали обуславливающего его физического механизма остаются непонятными до сих пор. Что же касается МГД-волн, обнаруженных перед ударным фронтом, то картина их возникновения представляется более ясной: волны возбуждаются потоком отраженных протонов в результате циклотронной неустойчивости. Остановимся на этом интересном явлении подробнее.

ФИЗИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ Рс 3

В системе отсчета, связанной с солнечным ветром, характерный период обнаруженных волн составляет около 300 с. При переходе в лабораторную систему (связанную с Землей) возникает сильный доплеровский сдвиг и период становится равным примерно 30 с, т. е. попадает в диапазон Рс 3. Однако само по себе это, конечно, не может служить доказательством внемагнитосферного происхо-

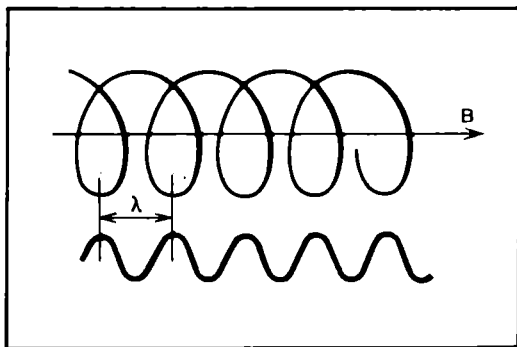


Иллюстрация циклотронного резонанса. Траектория заряженной частицы в магнитном поле B имеет форму спирали. В резонансе длина волны λ совпадает с шагом этой спирали, если скорость движения частицы вдоль поля намного превышает фазовую скорость волны.

дения Рс 3. Гипотеза нуждается в экспериментальной проверке с помощью надежного и физически прозрачного критерия.

Исходным пунктом для формирования такого критерия стало условие циклотронного резонанса

$$\lambda \approx v / f_B,$$

где λ — длина волны, v — средняя скорость отраженных протонов, $f_B = eB/2\pi mc$ — частота вращения частицы с зарядом e и массой m в магнитном поле B (циклотронная частота), c — скорость света. Вполне очевиден геометрический смысл этого условия: за период оборота частицы вокруг магнитной силовой линии она должна сдвигаться вдоль силовой линии на расстояние, равное длине волны. Физический же смысл состоит в том, что волны, попадающие в резонанс, отбирают энергию у частиц, в результате чего их амплитуда нарастает.

³ Подробную библиографию см.: Russell C. T. et al. — Geophys. Res. Lett., 1983, v. 10, № 8, p. 663; Гульельми и А. В. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. М.: ВИНТИ, сер. «Итоги науки и техники», 1984, т. 7, с. 114.

Солнечный ветер «сносит» эти волны. В лабораторной системе отсчета их частота определяется формулой Доплера:

$$f \approx u/\lambda,$$

где u — скорость солнечного ветра. (Приведенные в статье приближенные соотношения получены в предположении, что фазовая скорость МГД-волн много меньше как v , так и u .)

Комбинируя условие резонанса с формулой Доплера, получим оценку частоты МГД-волн перед фронтом магнитосферы

$$f \approx gB,$$

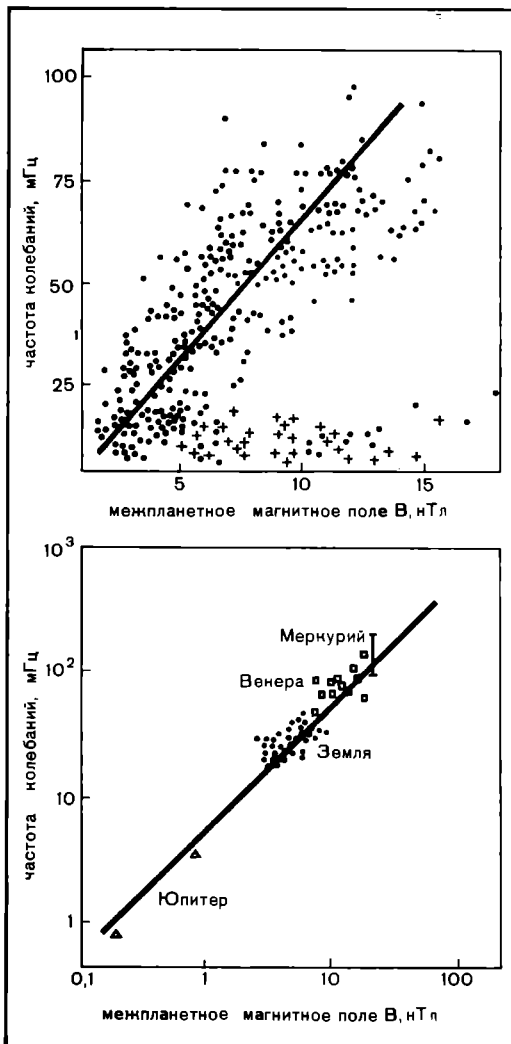
где $g = eu/2\pi m v c$. При типичных значениях $u = 400$ км/с, $v \approx 1000$ км/с имеем $g = 6$ мГц/нТл. По нашей гипотезе, такую же зависимость от B должна иметь и частота пульсаций Pc 3.

Для экспериментальной проверки предполагаемой зависимости была построена так называемая $f - B$ диаграмма по результатам наблюдения пульсаций на обсерватории Борок и данным о межпланетном магнитном поле, полученным со спутников. Оказалось, что частота Pc 3 действительно пропорциональна B , причем экспериментальное значение $g = 5,8 \pm 0,3$ мГц/нТл. Эта зависимость подтверждена в настоящее время многими исследовательскими группами и убедительно свидетельствует о внемагнитосферном происхождении пульсаций Pc 3.

Из многочисленных свойств Pc 3, объясняемых гипотезой об их «внешнем» происхождении, упомянем лишь одно. Известно, что временами эти пульсации внезапно исчезают. Выяснилось, что происходит это тогда, когда межпланетное магнитное поле ориентировано под прямым углом к скорости солнечного ветра. С точки зрения внемагнитосферного происхождения интерпретация этого факта очевидна: при подобной ориентации перед фронтом магнитосферы нет отраженных частиц и МГД-волны не возбуждаются.

ГИДРОМАГНИТНЫЕ ОРЕОЛЫ ПЛАНЕТ

Итак, магнитосферу Земли окаймляет некая волновая структура, а лучше сказать — гидромагнитный «ореол», в чем-то похожий на бледноглубое свечение над пламенем рудничной лампы. Он возникает, когда в убегающем на магнитосферу потоке солнечной плазмы появляются отраженные протоны. А это, в свою очередь, происходит во всех случаях,



Зависимость частоты МГД-волн f от межпланетного магнитного поля B ($f - B$ диаграмма). Результат наблюдений геомагнитных пульсаций на обсерватории Борок (вверху). На диаграмме видны две группы точек, изображенных различными символами. Пульсациям внемагнитосферного происхождения соответствует верхняя группа (по результатам работы: Gul'elmi A. V. — Space Sci. Rev., 1974, v. 16, № 3, p. 331).

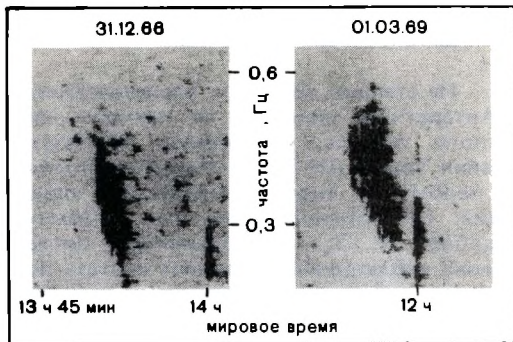
Внизу — аналогичная зависимость для МГД-волн перед фронтами магнитосфер различных планет по наблюдениям на космических аппаратах [данные из работы: Russell C. T., Horne M. M. — Space Sci. Rev., 1983, v. 34, p. 155]. Прямыми показана зависимость $f = 5,8B$, наилучшим образом аппроксимирующая экспериментальные данные.

Когда силовые линии межпланетного магнитного поля направлены под косым углом к направлению потока протонов. Основной вид геомагнитных пульсаций есть одно из наземных проявлений гидромагнитного ореола.

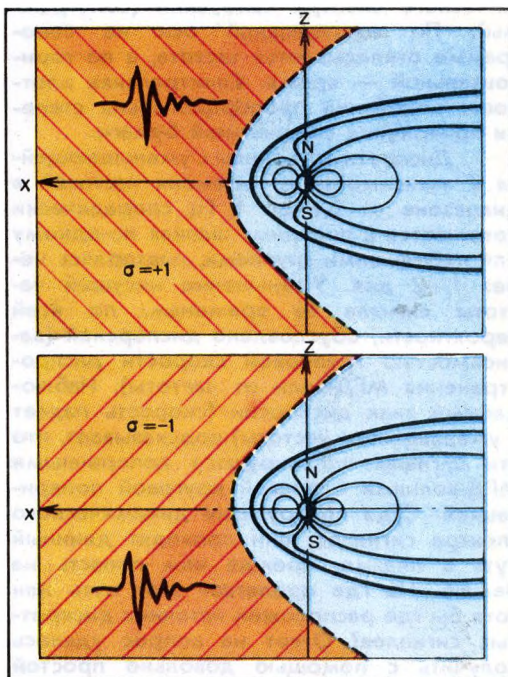
Не только Земля, но и некоторые другие тела Солнечной системы обладают достаточно мощными магнитными оболочками. Неудивительно, что и у них существуют аналогичные волновые структуры. С помощью космических аппаратов гидромагнитные ореолы обнаружены у Меркурия, Венеры и Юпитера. Эти наблюдения имеют большое значение для астрофизики и физики планет. Для геомагнетизма анализ волновых явлений перед магнитосферами различных планет представляет специальный интерес в связи с возможностью независимо проверить теорию возбуждения основного вида геомагнитных пульсаций.

Такой анализ проводился с использованием уже упомянутой f — B диаграммы, составленной по результатам измерений частоты МГД-волн и модуля напряженности магнитного поля B перед магнитосферами Меркурия, Венеры, Земли и Юпитера. Оказалось, что с точностью до ошибок измерений для всех планет данные ложатся на одну прямую $f=gB$, причем $g \approx 5,8$ МГц/нТл. Другими словами, получена та же зависимость, которая была установлена ранее по наземным наблюдениям $Pc\ 3$.

Условия обтекания планет солнечным ветром, естественно, сильно различаются. Так, радиус кривизны фронта ударной волны у Меркурия примерно 0,5, а у Юпитера — 500 (в радиусах Земли). Угол между направлением потока солнечной плазмы и силовыми линиями межпланетного магнитного поля увеличивается от 20° у Меркурия до 80° у Юпитера. Существенно меняются от планеты к планете также концентрация частиц солнечного ветра и величина межпланетного магнитного поля. Тем не менее коэффициент пропорциональности g между f и B по наблюдениям в окрестности планет с хорошей степенью точности совпадает с результатами измерений $Pc\ 3$, проведенных на Земле. Постоянство g означает, скорее всего, что мы имеем дело с общей физической закономерностью. Механизм циклотронного возбуждения МГД-волн потоком отраженных протонов в определенном смысле инвариантен относительно изменения условий обтекания в весьма широких пределах.



Сонаграммы дискретных сигналов, полученные в разное время на северном (слева) и южном (справа) геомагнитных полюсах.



Сечение околоземного пространства плоскостью полуденного меридиана. Ось X системы координат направлена на Солнце, ось Z — на север от плоскости эллиптики. Тонкие линии внутри магнитосферы — силовые линии геомагнитного поля. Разомкнутые линии выходят из северной и южной полярных шапок. Область, где есть отраженные частицы и откуда поступают на Землю дискретные сигналы, выделена цветом. Силовые линии межпланетного магнитного поля (цветные прямые) с течением времени меняют свою ориентацию. Показаны благоприятная ($\sigma=+1$) и неблагоприятная ($\sigma=-1$) ориентации для проникновения дискретных сигналов из-за фронта ударной волны (пунктирная линия) в северную полярную шапку. В южной полярной шапке благоприятной ориентации соответствует значение $\sigma=-1$, а неблагоприятной $\sigma=+1$.

ОТКУДА ПОСТУПАЮТ НА ЗЕМЛЮ ДИСКРЕТНЫЕ СИГНАЛЫ?

На станции «Восток», расположенной в Антарктиде, недалеко от южного магнитного полюса, сотрудники Института физики Земли АН СССР обнаружили много необычных видов геомагнитных пульсаций. Не проникают ли они к Земле, подобно Рс 3, из солнечного ветра? Анализ наблюдений позволяет считать положительный ответ на этот вопрос в отношении некоторых видов пульсаций довольно правдоподобным.

Сигналы, о которых пойдет речь ниже, представляют собой колебания, отличающиеся сильной частотной модуляцией. Их удобно анализировать с помощью сонографа — прибора для записи динамического спектра колебаний (сонограммы). По вертикальной оси на сонограмме откладывается частота, а по горизонтальной — время. Спектральная плотность колебаний пропорциональна степени почернения специальной бумаги.

Дискретные сигналы с уменьшающейся в зависимости от времени частотой в диапазоне от 0,1 до 1 Гц спорадически появляются в полярных шапках по-одному или небольшими группами, повторяясь через 1—2 дня. Уменьшение несущей частоты сигнала со временем, по всей вероятности, обусловлено дисперсией (зависимостью групповой скорости распространения МГД-волн от частоты). Наблюдаемый знак дисперсии (скорость падает с уменьшением частоты) подсказывает, что эти сигналы формируются поперечными МГД-волнами с правой круговой поляризацией. Судя по крутизне динамического спектра сигналов, они проходят длинный путь в плазме, прежде чем попасть на Землю. Но где пролегает этот путь или хотя бы где расположен источник дискретных сигналов? Ответ на вопрос удалось получить с помощью довольно простой вероятностной модели.

Допустим, что по крайней мере часть дискретных сигналов поступает в полярные шапки Земли из области перед фронтом магнитосферы, заполненной отраженными протонами. (Нечто похожее на дискретные сигналы регистрировалось в этой области аппаратурой, установленной на борту космических аппаратов.) Введем индекс $\sigma = \text{sign}(B_x \cdot B_z)$, принимающий значения 1 или -1 в зависимости от направления силовых линий межпланетного магнитного поля (B_x и B_z — компоненты этого поля в системе координат,

связанной с эклиптической, в которой ось X направлена на Солнце, а ось Z — на север от плоскости эклиптики). Далее, сделаем правдоподобное допущение о том, что дискретные сигналы не распространяются из одной полярной шапки в другую. Тогда наглядные геометрические соображения подсказывают, что в северной полярной шапке такие сигналы чаще возникают при $\sigma=1$, чем при $\sigma=-1$, а в южной — наоборот. Если же эти сигналы возбуждаются внутри магнитосферы, то они будут появляться одинаково часто при обоих значениях σ .

Эти рассуждения были оформлены в виде классической схемы Бернулли, описывающей независимые повторения опытов со случайными исходами. Проведенные испытания по вероятностной проверке гипотезы показали, что по меньшей мере половина всех дискретных сигналов проникает на Землю из-за границы магнитосферы.

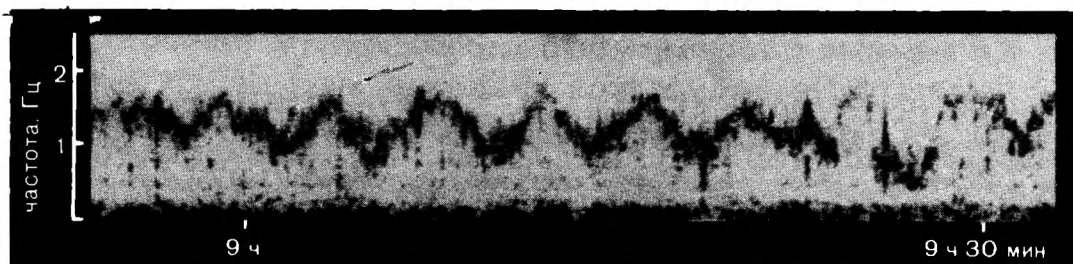
ЗАГАДКА СЕРПЕНТИННОЙ ЭМИССИИ

У читателя может возникнуть вопрос, а существуют ли вообще геомагнитные пульсации внутримангитосферного происхождения или пульсации, зарождающиеся вне магнитосферы, но не в области перед фронтом ударной волны, а в свободном солнечном ветре?

Ответить на первую часть вопроса нетрудно. Ближайшего «соседа» Рс 3 — пульсации Рс 4 — по совокупности признаков следует отнести к МГД-колебаниям, сосредоточенным внутри магнитосферы. Им, в частности, соответствует не наклонная, как у Рс 3, а горизонтальная ветвь на $f-B$ диаграмме. Иначе говоря, частота Рс 4 не зависит от межпланетного магнитного поля. Известны и другие виды пульсаций, образующиеся заведомо внутри магнитосферы, например в радиационном поясе Земли или в вытянутом в направлении от Солнца хвосте магнитосферы.

Вторая же часть вопроса остается пока без ответа. С ней связана довольно-таки загадочная история, которой мы и закончим статью.

Известно, что в ходе исследований по проблеме управляемого термоядерного синтеза детально разработана теория неустойчивостей горячей неравновесной плазмы. Одна из них, судя по всему, должна развиваться и в межпланетной плазме. Речь идет о неустойчивости плаз-



Сонограмма серпентинной эмиссии, наблюдавшейся на станции «Восток» в Антарктиде. Для пульсаций этого вида характерна глубокая модуляция частоты.

мы с анизотропным распределением скоростей частиц в магнитном поле¹.

Анизотропия межпланетной плазмы надежно установлена с помощью космических аппаратов. Теория приводит к выводу о том, что указанная неустойчивость должна вызывать коротковолновые колебания плазмы в диапазоне от десятых долей герца до нескольких герц с медленно флуктуирующей несущей частотой. (Эти изменения частоты обусловлены наличием в межпланетной среде длинноволновых возмущений магнитного поля, связанных с солнечной активностью.) Более того, на Земле колебания с такими свойствами обнаружены. Они зарегистрированы в приполюсной зоне и получили название серпентинной эмиссии (за характерный вид динамического спектра, который на сонограмме выглядит как извивающаяся змея). Однако непосредственно в межпланетной среде подобные плазменные колебания до сих пор не наблюдались.

Быть может, серпентинная эмиссия возникает внутри магнитосферы? В это трудно поверить, поскольку там нет подходящего параметра, сильная изменчивость которого обеспечивала бы столь глубокую модуляцию частоты колебаний. Думается, что эти колебания все же существуют в межпланетной среде, но чтобы обнаружить их там, требуются более тщательные поиски.

*

Подведем итоги. До недавнего времени считалось, что все геомагнитные пульсации имеют внутримagnetосферное происхождение или зарождаются на границе magnetосферы — в магнитопаузе. Ситуация изменилась после того, как исследователи обратили внимание на поиск

«земных» проявлений волновых процессов, протекающих в солнечном ветре перед фронтом magnetосферы. Экспериментальное доказательство внемагнитосферного происхождения наиболее распространенного вида пульсаций — Pс 3 — основной итог работ по этой проблеме.

Но возможности дальнейших поисков далеко не исчерпаны. Фактически сделаны лишь первые шаги в изучении этого богатого и загадочного мира внемагнитосферных пульсаций. На очереди вопрос о происхождении различных видов пульсаций, наблюдаемых в полярных шапках. Понять, откуда поступают на Землю дискретные и непрерывные сигналы с глубокой модуляцией частоты, — это значит не только удовлетворить естественное любопытство. Уже не раз в истории геомагнитных исследований оказывалось, что систематизация и обобщение опытных данных приводили к важным общепознавательным и практическим выводам. Широкая распространенность МГД-волн во Вселенной, с одной стороны, и трудность их прямого наблюдения всюду, кроме ближайшей окрестности Земли, с другой, делают весьма актуальной задачу экстраполяции (с некоторыми оговорками) отдельных результатов геомагнитных наблюдений на физику magnetосфер других планет, а также более удаленных космических объектов.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Альфвен Х., Фельтхаммар К. Г. КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА. М.: Мир, 1967.

Гульельми А. В. МГД-ВОЛНЫ В ОКОЛОЗЕМНОЙ ПЛАЗМЕ. М.: Наука, 1979.

СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА (иллюстрированный словарь терминов). Под ред. А. Бруцке и Ш. Дюрана. М.: Мир, 1980.

Нишида А. ГЕОМАГНИТНЫЙ ДИАГНОЗ МАГНИТОСФЕРЫ. М.: Мир, 1980.

ФИЗИКА КОСМОСА (маленькая энциклопедия). Гл. ред. С. Б. Пикельнер. М.: Советская энциклопедия, 1976.

¹ Сагдеев Р. З., Шафранов В. Д. — ЖЭТФ, 1960, т. 39, с. 181.