523 038

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ*)

Л. Кахилл

В течение последнего десятилетия все большее количество фактов убеждало нас, что межпланетное пространство вокруг Солнца содержит слабое магнитное поле, выметаемое непрерывно испускаемыми Солнцем облаками ионизованного газа. Это поле по величине очень мало́, составляя не более 5—10 гамм (1 гамма = 10^{-5} *гс*). Поле по своей конфигурации похоже на спираль, в центре которой расположено Солнце, а силовые линии этого поля простираются, возможно, на расстояние 100 астрономических единиц (1 а. е. = $1{,}495 \cdot 10^8$ *км*) от Солнца. Сначала имелись только косвенные доказательства существования такого поля. Некоторые свойства магнитных полей в пространстве вокруг Земли можно было получить, изучая их влияние на заряженные частицы. Так, из изучения вариаций космического излучения (высокоэнергичных протонов) следовало наличие крупномасштабной структуры у межпланетного поля. Теоретические исследования позволили связать происхождение этого поля с распространением ионизованного газа (плазмы) от Солнца и с переносом солнечного магнитного поля этим газом. Уже первые измерения на искусственных спутниках подтвердили существование межпланетного поля, хотя и не дали определенного ответа относительно направления и величины этого поля. Только в последнее время были проведены достаточно надежные определения вектора (направления и величины) межпланетного поля.

Хотя поле очень слабое и плотность энергии его (*эрг/см*^{3}) значительно меньше плотности энергии несущей это поле солнечной плазмы, влияние поля на некоторые межпланетные и планетные процессы очень велико. Кроме того, поле влияет на поведение самой солнечной плазмы. Оно заставляет отдельные протоны и электроны плазмы двигаться коллективно, вследствие чего поведение солнечной плазмы больше напоминает жидкость, чем собрание независимо движущихся частиц. Эта жидкость обтекает Землю, и вид ее магнитного поля и характер возникающих воздействий обсуждались Хайнсом [1]. Представляется, что эти взаимодействия были бы совершенно другими, если бы межпланетное поле отсутствовало.

Можно ожидать, что это очень слабое магнитное поле будет заметно влиять на высокоэнергичные солнечные заряженные частицы (солнечные космические лучи) и даже на частицы более высоких энергий, приходящие извне в солнечную систему (галактические космические лучи), если учесть, что воздействие слабого поля на частицы происходит на расстояниях около 1 а. е. и больше. Сила, действующая на частицу в поле, всегда перпендикулярна к направлению скорости частицы и направлению поля. Поэтому траектории частиц являются дугами окружностей; отклонение частиц тем больше, чем меньше их энергия. Предполагается, что возрастание межпланетного поля после больших извержений плазмы во время солнечных хромосферных вспышек является причиной резкого понижения интенсивности космического излучения (форбуш-понижений). Постепенное усиление межпланетного поля в периоды возросшей активности Солнца в течение 11-летнего цикла, по-видимому, обусловливает такое же постепенное уменьшение интенсивности космического излучения.

---

*) L. J Cahill, Magnetic Fields in Interplanetary Space, Science 147 (No. 3661), 991 (1965). Перевод Л. И. Дормана и Н. С. Каминера.

В оригинале — резюме: «Слабое магнитное поле, удаляющееся от Солнца, оказывает существенное влияние на процессы в межпланетном пространстве».

В этой статье обсуждается развитие представлений о межпланетном магнитном поле, приводятся доказательства, свидетельствующие о его существовании, и описываются эффекты, создаваемые этим полем.

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕЖПЛАНЕТНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Еще недавно предполагалось, что межпланетное пространство не содержит вещества и магнитных полей. Магнитное поле Земли, напряженность которого на поверхности Земли около 1 *гс*, уменьшается обратно пропорционально кубу радиального расстояния от центра Земли, так что величина его становится меньше 1 гаммы на расстоянии в несколько сотен тысяч километров от Земли. Некоторые другие планеты также имеют магнитные поля, напряженность которых должна уменьшаться до 1 гаммы на расстоянии нескольких сотен тысяч километров. Наблюдавшееся смещение частот некоторых линий солнечного спектра связывалось с наличием магнитных полей вблизи Солнца [2]. Из спектральных измерений и из конфигурации солнечной короны, наблюдавшейся во время солнечных затмений, заключалось, что существует общее поле Солнца типа магнитного диполя. Представлялось, что наблюдавшиеся потоки коронального газа следуют вдоль силовых линий диполя, исходящих из полярных областей Солнца. Величина этого поля составляет приблизительно 1 *гс* на поверхности Солнца. Одновременно отмечались локальные поля, связанные с активными солнечными областями, величина которых на один-два порядка превосходила величину дипольного поля. Напряженность такого дипольного поля должна уменьшаться пропорционально кубу расстояния от центра Солнца и составлять менее 1 гаммы на расстоянии 100 солнечных радиусов (один солнечный радиус равен $7{,}0 \cdot 10^5$ *км*). Более сильные локальные поля уменьшаются с расстоянием быстро, и поэтому вблизи земной орбиты (1 а. е.) напряженность солнечного поля должна быть меньше 1 гаммы. Высказывалось предположение, что существует крупномасштабное поле (порядка 1 гаммы), принадлежащее спиральной ветви нашей Галактики, которое может заполнять все пустое межпланетное пространство.

В начале 30-х гг. Чепмэн и Ферраро [3] предположили, что возрастание магнитного поля Земли в период начальной фазы магнитной бури можно объяснить сжатием геомагнитного поля солнечной плазмой. Из наблюдений следовало, что магнитные бури на Земле происходят через 1—2 суток после извержений на Солнце, и из этого запаздывания следовало, что скорость плазмы составляет около 1000 *км/сек*. Чепмэн и Ферраро считали, что эта солнечная плазма испускается в виде изолированных облаков из активных областей на солнечной поверхности во время хромосферных вспышек; они не обсуждали вопроса о непрерывном истечении плазмы из Солнца. Магнитное поле Солнца в их теории не играло никакой роли; предполагалось, что плазма, сжимающая магнитное поле Земли, не содержит магнитного поля.

Альвен [4] высказал предположение, что движущийся ионизованный газ может нести с собой магнитное поле; он первый четко сформулировал представление о «вмороженном» в плазму магнитном поле. Это представление основано на том факте, что сильно ионизованная плазма обладает также высокой электрической проводимостью. Согласно Альвену, магнитное поле, каким-то образом возникшее в высокопроводящей плазме, препятствует движению плазмы перпендикулярно к силовым линиям магнитного поля. При таком движении поле будет отклонять протоны в одном направлении и электроны — в противоположном. Сильные электриче-

ские токи, возникающие при отклонении протонов и электронов, будут поддерживать магнитное поле, препятствуя его изменению. Это можно рассматривать как пример обобщенного закона Ленца: в случае изменений в магнитной системе происходят явления, которые стремятся воспрепятствовать этим изменениям. В описываемом случае движение прекращается, когда поле достаточно сильно, или поле увлекается плазмой, если достаточно велика энергия плазмы. Если мы представим, что трубки магнитного потока первоначально пронизывали плазму, то, согласно представлению о вмороженном поле, каждый элементарный объем плазмы должен оставаться в той же трубке магнитного потока. И наоборот, данный объем плазмы несет в себе магнитное поле таким образом, что силовые линии поля всегда будут связаны с одной и той же группой частиц.

Следующий шаг в наших представлениях о межпланетном поле сделал Бирман [5], исследовавший отклонения кометных хвостов от Солнца. Бирман пришел к выводу, что эти отклонения не могут быть обусловлены только давлением солнечного света; они связаны также с корпускулами, движущимися радиально от Солнца. Чепмэн [6] развил идею, что солнечная атмосфера не ограничена объемом в несколько солнечных радиусов от поверхности Солнца, а простирается до орбиты Земли. Однако он представлял себе атмосферу статичной, температура которой достигает 10^5°K.

Паркер [7] объединил эти гипотезы и развил в общих чертах представление о непрерывно расширяющейся плазме (солнечном ветре), текущей радиально от Солнца и уносящей с собой к Земле и дальше солнечное магнитное поле. Согласно Паркеру и в соответствии с наблюдениями солнечной короны, область на расстоянии нескольких солнечных радиусов содержит горячую (10^6°K), относительно плотную ($3\cdot10^7$ *частиц/см*^{3}) плазму, состоящую из протонов и электронов. Паркер показал, что атмосфера Солнца не может существовать в статическом равновесии с оцененным давлением галактического газа, даже на очень больших расстояниях от Солнца. Таким образом, гипотеза о статической солнечной атмосфере, простирающейся до орбиты Земли, как предположил Чепмэн, потеряла свою привлекательность. Исследования Бирмана указывали на существование потоков плазмы от Солнца, и Паркер стремился создать модель непрерывно расширяющейся солнечной атмосферы. Поток энергии солнечной плазмы на больших расстояниях от Солнца можно оценить из работы Бирмана; оценка дает скорости порядка 1000 *км/сек* и концентрации частиц порядка 100 *см*$^{-3}$ на орбите Земли. Однако корональная температура недостаточно высока, чтобы обеспечить необходимую скорость ускользания отдельных ионов водорода. Скорость ускользания для Солнца порядка 500 *км/сек*, тогда как тепловая скорость, соответствующая предполагаемой температуре короны, составляет только 160 *км/сек*. Исходя из уравнения движения коронального газа (включая гравитационное притяжение Солнца и эффекты коронального нагрева) и уравнения непрерывности (одинаковое количество газа должно протекать через последовательность концентричных относительно Солнца сферических оболочек), Паркер показал, что скорость газа непрерывно возрастает до нескольких сотен километров в секунду при его удалении от Солнца. Достигаемая скорость зависит от предполагаемой корональной температуры. После того как тепловые эффекты короны перестают оказывать влияние, скорость газа остается постоянной с увеличением расстояния от Солнца. Таким образом, расширение и увеличение скорости газа являются прямым следствием сохранения постоянной температуры короны. Предполагая корональную температуру порядка 10^6°K, Паркер показал, что скорость истечения газа 500 *км/сек* достигается на расстоянии $3\cdot10^7$ *км* и что затем эта скорость остается постоянной. Так как нагревание

солнечной короны электромагнитным излучением или акустическими волнами, распространяющимися с солнечной поверхности, по-видимому, недостаточно, он предложил в качестве такого механизма гидромагнитные волны, распространяющиеся с солнечной поверхности.

Затем Паркер обратил внимание на влияние солнечного магнитного поля на потоки солнечной плазмы. Он предположил, что среднее поле в области короны должно быть по природе дипольным и что истекающий солнечный газ, начиная расширяться, несет с собой силовые линии солнечного магнитного поля, жестко связанного с газом. Он заключает, что, согласно представлению о вмороженном поле, поле Солнца будет уноситься радиально движущейся плазмой. Хотя плазма будет продолжать двигаться радиально от Солнца, силовые линии поля, жестко скрепленные с движущейся плазмой и поверхностью вращающегося Солнца, будут искривляться, образуя спирали, как это видно на рис. 1. Угол θ, образуемый линиями спирального поля и радиальной линией от Солнца в точке пространства вблизи плоскости эклиптики, составляет

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\omega R}{V},$$

где ω — угловая скорость Солнца, R — радиальное расстояние до силовой линии поля и V — скорость плазмы. Из этого соотношения Паркер получил, что на расстоянии приблизительно 2,5 а. е. при скорости плазмы 1000 *км/сек* линии поля образуют угол 45° с радиусом-вектором. Говоря словами Паркера, «радиальная конфигурация так же универсальна, как и бирмановское истечение газа, которое ответственно за это». Он отметил, что 11-летняя модуляция галактического космического излучения может быть обусловлена магнитными полями, уносимыми солнечным ветром. Он рассмотрел протяженную, турбулизованную оболочку межпланетного магнитного поля на расстоянии многих а. е. Интенсивность этой оболочки будет возрастать в максимуме 11-летнего цикла солнечной активности, и оболочка будет более эффективно отражать галактические космические лучи.

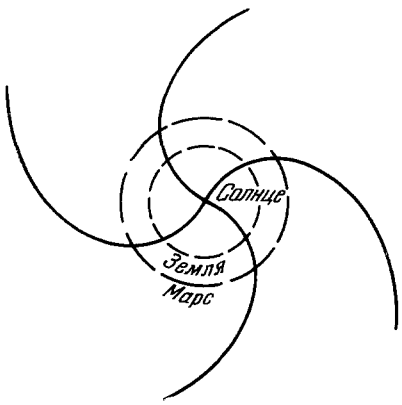

Рис. 1. Спиральное межпланетное магнитное поле.

Вид с Северного полюса на плоскость эклиптики. Вращение Солнца против часовой стрелки приводит к тому, что плазма, радиально выбрасываемая из определенной точки на солнечной поверхности, образует в пространстве спираль, аналогичную струе воды, выбрасываемой вращающимся садовым насосом. Магнитное поле, связанное с той же точкой на солнечной поверхности, выносится движущейся плазмой, также образуя спиральную структуру (E. N. Parker, J. Geophys. Res. 64, 1675 (1959)).

Модель Паркера устойчивого солнечного ветра соответствует спокойному Солнцу. Однако известно, что солнечная поверхность всегда активна. Активные области — группы солнечных пятен — движутся поперек солнечного диска вследствие вращения Солнца; иногда одна и та же группа солнечных пятен появляется в течение нескольких солнечных оборотов. Иногда с солнечной поверхности происходят извержения больших масс газа; это особенно ясно видно, когда выброс происходит на краю Солнца, где он может быть сфотографирован на фоне темного неба. Конечно, активность Солнца и образование локальных облаков ионизованного газа были известны задолго до появления предположения об устойчивой эмиссии солнечного ветра. Паркер понимал, что непрерывное расширение газа и регулярные, спиральные магнитные поля являются идеализированной схемой действительной картины.

Другая модель, которая основывается на рассмотрении солнечных активных областей и в некоторых отношениях дополняет модель Паркера, была предложена Голдом [8]. Согласно модели Голда, плазма выбрасывается из активной области на поверхности Солнца во время хромосферной вспышки. Из наблюдений известно, что с активными областями связаны сильные магнитные поля. Быстро расширяющееся газовое облако выталкивает магнитное поле активной области с солнечной поверхности, но концы силовых линий остаются прикрепленными к Солнцу. Эта модель, показанная на рис. 2, отличается от модели Паркера тем, что в ней поле связано с локальной активной областью Солнца. Расширяющееся газовое облако вытягивает поле в петли, что в целом похоже на бутыль. Если бутыль расширяется в направлении к Земле, то, как впервые отметили Чепмэн и Ферраро, через 1—2 суток она обусловливает начало магнитной бури на земной поверхности. Голд считал, что в межпланетном пространстве до начала вспышки имеется газ и поэтому движущееся газовое облако должно иметь очень резко очерченный передний фронт. Это следовало из внезапного роста (в пределах 1—2 минут) геомагнитного поля в начальный период магнитных бурь. Если бы газ распространялся в вакуум, то вследствие тепловой диффузии передний фронт газового облака расплывался бы, так что сжатие магнитного поля Земли происходило бы в течение нескольких часов.

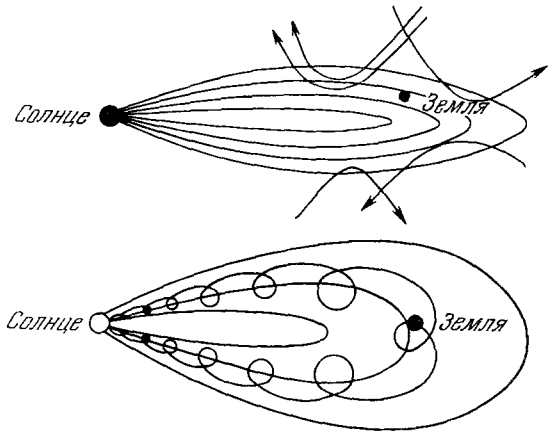

Рис. 2. Магнитная бутыль.

Петлеобразные линии магнитного поля, оба конца которых связаны с активной областью на Солнце, вытягиваются расширяющейся плазмой солнечной вспышки. Вид на плоскость эклиптики со стороны Северного полюса. Спиральная конфигурация существует и в этой модели, но здесь она не видна. *а*) Заряженные частицы малых энергий, приходящие из окружающего пространства к бутыли, отражаются магнитным полем. б) Заряженные частицы внутри бутыли захвачены магнитным полем и движутся вдоль силовых линий, навиваясь на них (Т. Голд [8]).

Модель магнитной бутыли была использована для объяснения двух явлений: форбуш-понижений галактического космического излучения и большого различия времен запаздывания прихода высокоэнергичных заряженных частиц солнечных вспышек. Согласно Голду, форбуш-понижение (понижение интенсивности космического излучения на несколько процентов, измеряемое на поверхности Земли) можно объяснить экранирующим влиянием магнитной бутыли. Магнитные поля бутыли будут отклонять приходящие извне заряженные частицы, вследствие чего часть галактических космических лучей не попадет внутрь бутыли. Начало форбуш-понижения является, таким образом, сигналом того, что Земля погрузилась в магнитную бутыль. Так как, согласно наблюдениям, начальная фаза форбуш-понижения длится 1—2 часа, то Голд смог оценить и величину магнитных полей, образующих бутыль, которая составляет 1—10 гамм.

Иногда через несколько часов после начала солнечной вспышки наблюдаются возрастания интенсивности космических лучей. Предполагается, что за эти возрастания ответственны солнечные протоны с энергиями порядка 10^9 *эв* [9]. Эти частицы должны достигать Земли значительно быстрее, чем низкоэнергичные (10^3 *эв*) частицы солнечной плазмы. Однако

траектории частиц определяются магнитными полями между Солнцем и Землей, и большой разброс времени прихода солнечных космических лучей после хромосферной вспышки, в которой они генерируются, указывает на изменчивость межпланетного магнитного поля. Магнитная бутыль не только препятствует проникновению галактических космических лучей, но одновременно и ограничивает возможности распространения частиц, генерируемых в пределах бутыли. Иногда частицы с энергиями космических лучей приходят к Земле через несколько часов после вспышки, причем сначала приходят частицы более высоких энергий, а частицы меньших энергий приходят позже и из всех направлений. Если бутыль, образованная предшествовавшей вспышкой, достигает Земли, то генерированные последующей вспышкой и инжектированные в бутыль частицы

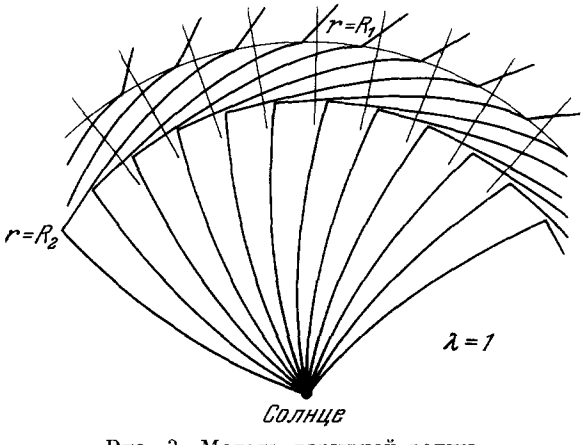

Рис. 3. Модель взрывной волны.

Вид со стороны Северного полюса. На расстояниях больше $r = R_1$ — область спокойного солнечного ветра и спирального поля. На расстоянии меньше R_2 располагается плазма, покинувшая Солнце после вспышки. Она движется с более высокой скоростью, поэтому силовые линии поля более близки к радиальным. Между этими двумя областями плазма и линии поля сжаты, вследствие чего угол между линиями поля и радиальным направлением больше (E. N. Parker, Nat. Bureau Std. U. S. J. Res. 65D, 537 (1961)).

легко достигнут Земли, двигаясь по спиральным траекториям вдоль магнитных силовых линий. Если частицы инжектированы в бутыль, которая удалена от Земли, то низкоэнергичные частицы не смогут достичь Земли; в последующем, когда бутыль расширится до такой степени, что Земля окажется внутри нее, эти частицы смогут достичь Земли. Однако высокоэнергичные частицы могут просачиваться из бутыли и достигать Земли. Голд отметил также, что частицы очень малых энергий, которые не могут попасть на поверхность Земли на низких широтах, иногда приходят в полярные области и увеличивают ионизацию в ионосфере на высотах около 50 *км* через несколько дней после вспышки [10]. Эти наблюдения подтверждают точку зрения, что частицы, испускаемые солнечной вспышкой, особенно частицы малых энергий (100 *Мэв*), захватываются магнитным полем, исходящим из области вспышки.

Как магнитная бутыль Голда, так и спиральное поле спокойного периода Паркера действительно могут существовать. Голд предположил, что любое межпланетное поле, существовавшее до вспышки, будет выметено расширяющейся бутылью. Паркер [11] предложил модификацию спирального поля, возникающего во время вспышки. Эта модель, показанная

на рис. 3, предполагает, что после вспышки из короны происходит выброс плазмы со скоростью, большей, чем скорость спокойного солнечного ветра. Между двумя областями образуется «взрывная волна», в которой плазма движется медленнее, а силовые линии поля сжаты. Между этими моделями сохраняются существенные различия: взрывная волна генерируется в короне вследствие усиления нагревания короны, обусловленного вспышкой; бутыль возникает на поверхности Солнца и выталкивается локальными магнитными полями, связанными с активной областью.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СУЩЕСТВОВАНИЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Возможно, наиболее убедительным доказательством существования межпланетного магнитного поля, исходящего от Солнца в виде спирали, являются результаты работы Мак-Кракена [12, 13]. Это доказательство получено из анализа данных о нейтронной компоненте, регистрировавшейся нейтронными мониторами на поверхности Земли. Нейтронный детектор, окруженный соответствующим экраном, чувствителен в основном к нейтронам, генерируемым протонами первичного космического излучения. Во время Международного Геофизического Года стандартные нейтронные мониторы были установлены в ряде пунктов на поверхности Земли и осуществляли надежные точные измерения долговременных вариаций интенсивности космического излучения. Хотя галактическое космическое излучение обнаруживает небольшие флуктуации, чувствительность детекторов была достаточно высокой и позволяла наблюдать изменения интенсивности порядка нескольких процентов. Некоторые особенности вариаций космических лучей были объяснены на основании модели магнитной бутыли. Еще раньше было замечено, что солнечные космические лучи наблюдаются чаще в тех случаях, когда вспышка возникает на западной стороне Солнца; вспышки, происходящие на восточной стороне Солнца, реже сопровождаются появлением космических лучей. Мак-Кракен сделал попытку использовать данные нейтронных мониторов для определения характера межпланетного магнитного поля.

Протоны, приходящие на границу земной атмосферы, отклоняются от своих первоначальных траекторий магнитным полем Земли. Чем меньше энергия этих частиц, тем сильнее они отклоняются. Мак-Кракен показал, что данный нейтронный монитор регистрирует только те протоны (в определенном интервале энергий), которые за пределами геомагнитного поля движутся в относительно узком конусе направлений. Он назвал этот конус асимптотическим направлением прихода частиц. Затем он вычислил асимптотические направления прихода для каждого монитора, проследив траекторию заряженной частицы в обратном направлении, т. е. от нейтронного монитора, через магнитное поле Земли, в межпланетное пространство. Асимптотическое направление прихода для каждого монитора можно представить географической широтой и долготой. Таким образом, вследствие наличия геомагнитного поля нейтронный монитор становится направленным детектором протонов солнечных космических лучей, регистрирующим их из определенного (известного) направления небесной сферы. Конус направлений вследствие вращения Земли ежедневно совершает полный оборот по небесной сфере. Асимптотические направления нескольких нейтронных мониторов могут быть близкими по широте, но различными по долготе, и тогда, если заряженные частицы приходят из определенного направления в пространстве, один монитор зарегистрирует их в определенное время суток, а другой монитор, расположенный западнее, отметит их позже, но в эти же сутки.

Мак-Кракен предложил использовать данные нейтронных мониторов для определения направления прихода солнечных космических лучей. При анализе трех случаев, зарегистрированных в 1960 г., он обнаружил, что солнечные протоны, которые достигли Земли вскоре после солнечной вспышки, пришли в направлениях, расположенных западнее Солнца. На рис. 4 приведена карта, на которой в географических координатах изображены асимптотические направления прихода для нескольких нейтронных мониторов и относительные интенсивности, зарегистрированные

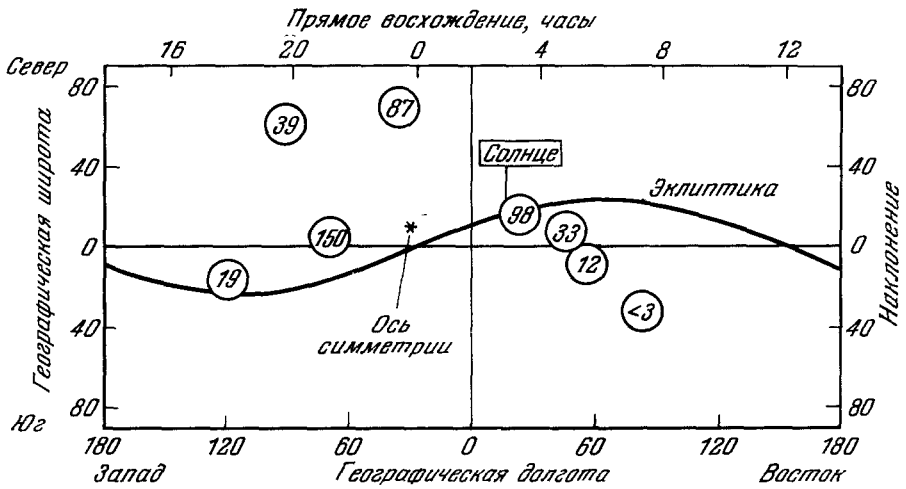

Рис. 4. Асимптотические направления прихода.

Показаны направления прихода (в географических координатах) протонов солнечных космических лучей 4 мая 1960 г., зарегистрированных несколькими нейтронными мониторами. Числа внутри кружков, указывающих направление прихода, дают величину возрастания (в процентах) нейтронного потока относительно нормального уровня для каждого из мониторов. Показаны также направление на Солнце и среднее направление прихода (ось симметрии) солнечных космических лучей. Направления прихода в звездных координатах можно определить по правой (наклонение) и верхней (прямое восхождение) шкалам (К. Мак-Кракен 13).

этими мониторами в интервале времени с 10 часов 45 минут до 11 часов 00 минут всемирного времени во время солнечной вспышки 4 мая 1960 г. Показано также положение Солнца и среднее направление прихода космических лучей, полученное из рассмотрения зарегистрированных интенсивностей. Среднее направление прихода 4 мая составляло приблизительно угол 55° к западу от Солнца.

Из анализа вспышек космических лучей 1960 г. и других случаев Мак-Кракен пришел к следующим выводам. Активная область на Солнце создает межпланетное магнитное поле спиральной структуры, силовые линии которого простираются от активной области до орбиты Земли. Когда активная область находится вблизи западного края Солнца, силовые линии спирального поля связывают Солнце с Землей; когда область расположена в восточной части Солнца или вблизи центрального меридиана, силовые линии уже не связывают Солнце с Землей. На орбите Земли силовые линии образуют угол около 50° с линией Солнце — Земля и располагаются приблизительно в плоскости эклиптики. Силовые линии поля содержат небольшие нерегулярности, которые являются причиной небольшого нарушения анизотропии прихода солнечных частиц; поэтому даже в начальный момент времени после вспышки некоторые частицы приходят в направлениях, далеких от среднего направления прихода частиц. Позднее, по мере развития явления, частицы регистрируются уже всеми нейтронными мониторами, что указывает на полную изотропию потока ча-

стиц. Если бы силовые линии, связывающие Землю с Солнцем, были совершенно гладкими, частицы приходили бы резко коллимированным пучком.

Очевидно, магнитные поля, исходящие из активной области, захватывают солнечные космические лучи и удерживают их в течение нескольких суток, так как в некоторых случаях такова продолжительность возрастаний космических лучей. Если силовые линии поля не связаны непосредственно с Землей, солнечные протоны могут достичь Земли, только медленно диффундируя из области магнитной ловушки. Это объясняет медленные возрастания интенсивности космических лучей, наблюдавшиеся после вспышек, возникших на восточной стороне Солнца. Область магнитного поля, которая может захватывать солнечные космические лучи, может также не пропускать галактические космические лучи, в результате чего возникает форбуш-понижение.

Мак-Кракен отметил, что область магнитного поля, движущаяся к Земле, но еще не достигшая ее, может экранировать Землю от галактических космических лучей, приходящих в направлении от Солнца или к западу от него. Таким образом, небольшое форбуш-понижение может возникнуть несколько раньше магнитной бури, указывающей на приход плазмы от вспышки. Одно из форбуш-понижений такого типа наблюдалось перед явлением, зарегистрированным 22 октября 1957 г. Явление захвата солнечных частиц магнитной областью заключается в том, что частицы отражаются магнитным полем переднего фронта этой области, а также сходящимися силовыми линиями вблизи Солнца. Во время одной из вспышек в 1960 г. было замечено, что частицы приходили довольно узким пучком по направлению, противоположному Солнцу. Отсюда следует, что частицы распространяются по относительно прямолинейным траекториям, отражаясь от довольно регулярных магнитных образований за пределами орбиты Земли. Рассеяние частиц на нерегулярных магнитных полях приводило бы к появлению частиц в различных направлениях.

Межпланетное магнитное поле, согласующееся с наблюдениями солнечных протонов, нельзя непосредственно сравнивать с моделью спирального поля спокойного времени Паркера. Такое поле лучше соответствует конфигурации, характерной для периодов высокой солнечной активности, и ему соответствуют модель магнитной бутыли Голда и модель «взрывной волны» Паркера. Мак-Кракен заключает, что обе эти модели согласуются с наблюдениями солнечных протонов. Захват в магнитной бутыли обеспечивается тем, что частица движется от Солнца по спирали вдоль силовой линии, а затем вдоль этой же линии, образующей петлю, возвращается обратно к Солнцу. Изгиб магнитных силовых линий, обусловленный распространением взрывной волны в модели Паркера, также может привести к отражению частицы. Однако на этот изгиб накладываются определенные ограничения. Согласно Мак-Кракену направление силовой линии в месте изгиба должно меняться на большой угол порядка 70°, чтобы обеспечить отражение солнечных протонов *).

ИЗМЕРЕНИЕ МЕЖПЛАНЕТНОГО ПОЛЯ НА КОСМИЧЕСКИХ РАКЕТАХ

Советская космическая ракета «Лунник-2», по-видимому, первая наблюдала солнечный ветер, зарегистрировав низкоэнергичные электроны на больших расстояниях от Земли; магнетометры, установленные на этой

*) Аналогичные исследования межпланетного магнитного поля по данным о вариациях космических лучей были проведены советскими исследователями (см. сб. серии «Результаты МГГ. Космические лучи», № 1—7, М., Изд-во АН СССР, 1959—1965; обзор см. в книгах Л. И. Дормана «Вариации космических лучей», М., Гостехиздат, 1957, и «Вариации космических лучей и исследование космоса», М., Изд-во АН СССР, 1963). (*Прим. перев.*)

ракете, имели низкую чувствительность и поэтому позволили оценить только верхний предел (от 50 до 100 гамм) межпланетного поля [14]. Американская космическая ракета «Пионер-1» осуществила первые измерения межпланетного магнитного поля. Магнетометр, установленный на «Пионере-1», представлял собой проволочное кольцо, вращавшееся в пространстве вследствие вращения ракеты. При вращении кольца в окружающем магнитном поле генерировалось синусоидальное напряжение, амплитуда которого была пропорциональна составляющей магнитного поля, перпендикулярной к оси вращения ракеты. Следовательно,

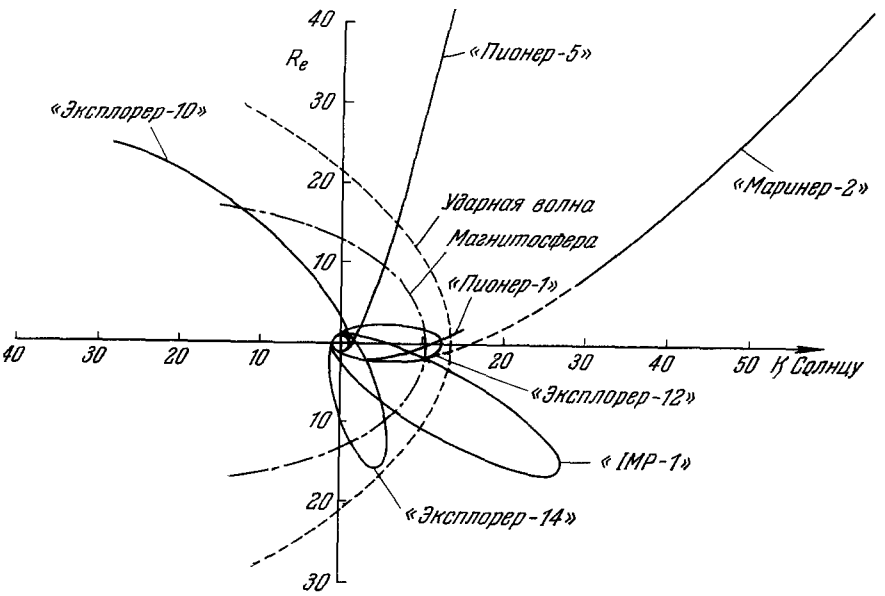

Рис 5. Орбиты космических кораблей, производивших магнитные измерения.

Вид с Северного полюса Земли проекций орбит спутников на экваториальную плоскость. Для спутников с большим периодом существования показаны начальные положения эллиптических орбит. Эти орбиты прецессируют в направлении часовой стрелки приблизительно на 1° в сутки относительно линии Солнце — Земля вследствие вращения Земли вокруг Солнца. Показано также приблизительное положение границы магнитосферы и фронта ударной волны. Шкала расстояний дана в единицах земных радиусов.

из этих измерений нельзя было определить полную величину поля и его направление. «Пионер-1» был запущен почти вдоль линии Солнце — Земля (рис. 5), на нем измерялось поле до расстояния 14 R_e (R_e — радиус Земли) [15]. При сравнении составляющей магнитного поля, измеренной на «Пионере-1», со значением, полученным экстраполяцией поля на поверхности Земли, обнаружено достаточно удовлетворительное совпадение их для расстояний от 4 до 7 R_e. На расстоянии между 10 и 13,5 R_e поле было значительно больше рассчитанного и наблюдались большие по величине флуктуации. Вблизи 13,5 R_e отмечено резкое уменьшение величины измеряемой компоненты, и на более далеких расстояниях величина поля оставалась близкой к 5 гаммам. Резкое уменьшение поля сначала интерпретировалось экспериментаторами как указание границы магнитного поля Земли, сжатого солнечным ветром. Предполагалось, что флуктуирующие показания между 10 и 13,5 R_e являются гидромагнитными возмущениями, распространяющимися внутрь поля от его границы. Величина поля на расстояниях больше 13,5 R_e согласовалась с ожидаемой для межпланетного поля.

Космическая ракета «Пионер-5», запущенная в 1960 г., провела серию измерений на расстоянии нескольких миллионов километров от Земли [16]. Магнетометр, установленный на этой ракете, был аналогичен магнетометру на «Пионере-1». Получены данные за 55 суток, причем в каждые сутки измерения велись в течение нескольких 20-минутных интервалов. Ориентация космического корабля была такова, что измерялась компонента поля, приблизительно перпендикулярная к линии

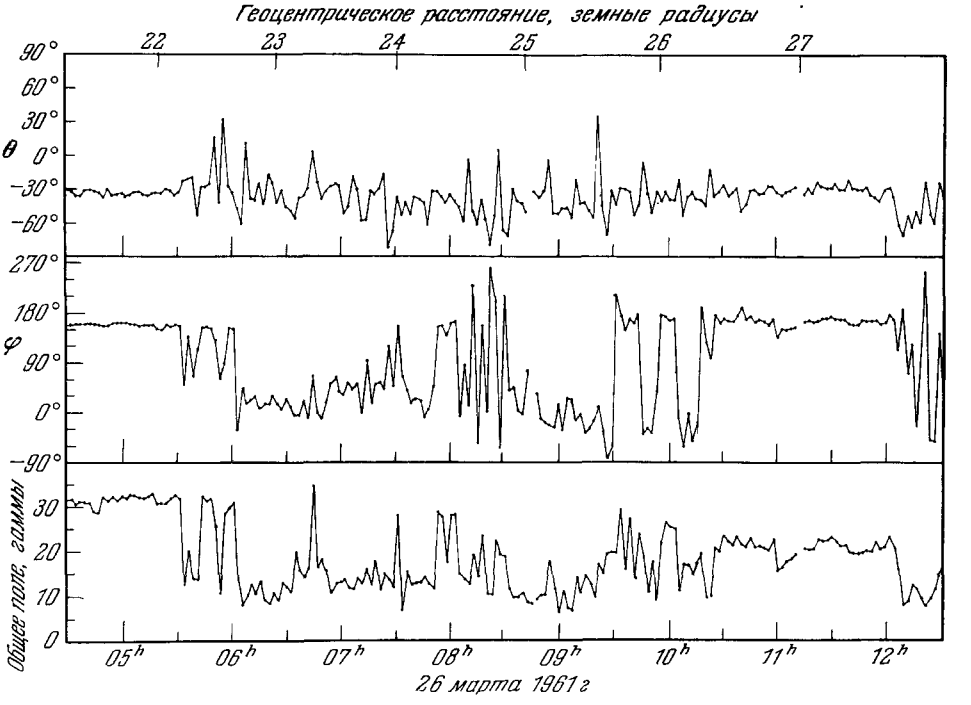

Рис. 6. Часть данных регистрации магнитного поля на «Эксплорере-10».

Приведены полная величина поля (в гаммах) и направление поля, выраженное через солнечные эклиптические углы θ и φ (см. рис. 7). Приведенная часть данных охватывает семь часов полета, когда спутник прошел более 5 R_e (от 22 до 27 R_e). Когда спутник находился на расстоянии менее 22 R_e от Земли, направление и величина поля были относительно регулярными (аналогичны той части данных, которые относятся к расстоянию меньше 22 R_e), величина поля уменьшалась пропорционально кубу геоцентрического расстояния. Для расстояний от 27 R_e и до конца измерений (около 40 R_e) характер данных был подобен изображенному на рисунке. Первое прохождение через геомагнитную границу наблюдалось немного дальше 22 R_e. Вблизи 23 R_e ($\varphi = 0°$, $\theta = -30°$) направление поля изменилось: вектор поля направлен к Солнцу и южнее плоскости эклиптики. Отметим, что между 26,5 и 27,5 R_e величина и направление поля становятся относительно стабильными и значения углов θ и φ близки к наблюдавшимся на расстояниях меньше 22 R_e. Отсюда следует, что спутник в это время опять находился в пределах магнитосферы; отсутствие плазмы на этом участке траектории подтверждает такое заключение (Дж. Геннер, Н. Несс, К. Сирс, Т. Скиллман [17]).

Солнце — Земля. Опять оказалось, что компонента поля, измеренная на расстояниях меньше 8 R_e, согласовалась с расчетным полем, а компонента, измеренная между 12 и 20 R_e, была выше расчетной и сильно флуктуировала. За пределами 25 R_e поле в среднем было слабым, порядка 2—3 гамм.

Сначала предполагалось, что направление компоненты поля в среднем приблизительно перпендикулярно к плоскости эклиптики. Так как модели межпланетного поля и результаты анализа данных о солнечных протонах, приведенные Мак-Кракеном, указывают, что межпланетное поле лежит в плоскости эклиптики, результат о перпендикулярности компоненты поля к плоскости эклиптики вызывал сомнение. Магнитная

буря, зарегистрированная во время полета «Пионера-5», явилась первым удобным случаем измерить в космическом пространстве магнитное поле облака солнечной плазмы, создающего бурю на Земле. Во время бури величина поля на спутнике возросла до 40 гамм, а форбуш-понижение наблюдалось как на спутнике, так и на Земле.

«Эксплорер-10» был запущен в 1961 г. вдоль меридиана с местным временем 21 час, т. е. приблизительно под углом 135° относительно линии Солнце — Земля [17]. Данные, полученные на этом спутнике, убедительно показывают, что спутник несколько раз пересекал геомагнитную границу (дальше 22 R_e) при своем движении до расстояния 40 R_e (рис. 6 и 7).

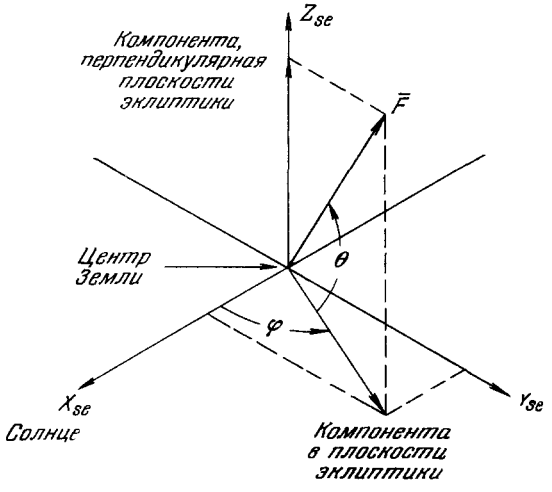

Рис. 7. Солнечные эклиптические координаты

Ось x направлена от Земли к Солнцу, ось z направлена к Северному полюсу эклиптики, ось y лежит в плоскости эклиптики. Угол φ измеряется от линии Солнце—Земля до проекции вектора магнитного поля на плоскость эклиптики. Он может меняться от 0 до 360°. Угол θ измеряется между вектором магнитного поля и его проекцией на плоскость эклиптики. Он меняется от 0 до 90°, когда вектор поля находится выше плоскости эклиптики, и от 0 до —90°, когда вектор поля находится ниже плоскости эклиптики.

Когда спутник находился внутри магнитосферы (область вокруг Земли, в которой доминирует геомагнитное поле), измеряемое поле было относительно регулярным, хотя направление его существенно менялось, а величина поля была больше рассчитанной. Когда спутник выходил за пределы границы (магнитопауза), наблюдалось резкое изменение величины и направления измеряемого поля, сопровождавшееся появлением плазмы. Величина поля за пределами магнитосферы была относительно высокой, между 10 и 20 гаммами, и, кроме того, наблюдались большие флуктуации величины и направления поля. Во время нахождения спутника за пределами магнитосферы наблюдалось несколько различных средних направлений поля, но, по-видимому, ни одно из них нельзя отождествить со спиральным межпланетным полем. Частые переходы из магнитосферы в межпланетное пространство и обратно позволяют заключить, что спутник двигался вдоль границы геомагнитного поля и что пересечения этой границы были обусловлены ее перемещениями. «Эксплорер-12», запущенный в 1961 г., первоначально пересекал магнитопаузу вблизи линии Солнце — Земля [18]. Граница наблюдалась на расстояниях от 8 до 13 R_e. Пересечение границы обычно характеризовалось быстрым уменьшением величины поля и изменением его направления. Часто наблюдалось, что поле непосредственно за границей магнитосферы было противоположным по направлению геомагнитному полю. Значимость этого факта в связи с вопросом о структуре магнитосферы обсуждалась Хайнсом [1]. Данжи предположил [19], что если межпланетное поле антипараллельно геомагнитному полю вблизи границы магнитосферы, эти две области магнитных полей будут связаны между собой, вследствие чего граница магнитосферы окажется открытой для проникновения межпланетной среды. Через год на «Эксплорере-14» наблюдалась аналогичная картина на утренней стороне магнитосферы. Таким образом, наблюдения на этих спутниках за пределами границы магнитосферы не согласовались с предсказанным суще-

ствованием спирального поля напряженностью от 1 до 10 гамм. Становилось очевидным, что магнитное поле непосредственно за магнитопаузой не является истинным межпланетным магнитным полем и что поток плазмы и увлекаемое этой плазмой магнитное поле существенно искажаются вследствие наличия геомагнитной границы.

Ряд исследователей высказал предположение, что вокруг магнитосферы в потоке плазмы образуется фронт ударной волны, как это наблюдается при сверхзвуковом обтекании препятствия обычным газом [20]. Было отмечено, что скорости распространения гидромагнитных волн в плазме (по аналогии со скоростью звука в газе) меньше скорости плазмы, так что поток является в некотором смысле «сверхзвуковым». Существенным в образовании обычного фронта ударной волны в текущей жидкости является то, что длина свободного пробега — среднее расстояние между столкновениями молекул газа — меньше диаметра препятствия. Если это условие не выполняется, то молекулы действуют как индивидуальные частицы, а не коллективно, как жидкость. Так как газ солнечного ветра очень разрежен, средний свободный пробег для столкновения очень велик, достигая приблизительно 1 а. е., т. е. на несколько порядков больше диаметра магнитосферы. «Бесстолкновительный» фронт ударной волны был предложен еще раньше Голдом для случая, когда быстрое облако солнечной плазмы догоняет медленное облако. Голд предположил, что межпланетное магнитное поле вынуждает частицы двигаться коллективно. При таком предположении радиус окружности, описываемой протоном в межпланетном магнитном поле (ларморовский радиус), заменяет средний свободный пробег для столкновения в потоке газа. Поток плазмы, обтекающей магнитосферу, можно рассматривать как течение жидкости, так как ларморовский радиус протонов много меньше размеров магнитосферы. Однако аргументы в пользу формирования такого фронта ударной волны были основаны главным образом на аналогии, так как не имелось достаточных теоретических исследований условий формирования «бесстолкновительного» фронта ударной волны.

Наблюдения на спутниках серии «Эксплорер» и на ракетах серии «Пионер» на расстояниях от 10 до 20 R_e позволили обнаружить переходную область, расположенную за магнитосферой, в которой межпланетное поле как по величине, так и по направлению отличается от рассчитанного. На расстоянии нескольких земных радиусов от магнитопаузы можно было ожидать встретить вторую граничную поверхность (возможно, обнаруженную на «Пионере-1» на расстоянии 13,5 R_e), за которой должно быть невозмущенное межпланетное поле. Только «Пионер-1» и «Пионер-5» удалились настолько далеко от Земли, что могли встретиться с истинным межпланетным полем. К сожалению, в этом вопросе оставалась неопределенность, обусловленная тем фактом, что измерялась только одна компонента поля; поэтому невозможно было провести удовлетворительное сравнение экспериментальных данных с моделями межпланетного поля. Измерения на «Пионере-5», указывающие на существование поля напряженностью 3 гаммы под углом 60—90° к плоскости эклиптики, по-видимому, не согласуются с моделями Паркера и Голда для спиральных полей, расположенных в плоскости эклиптики.

Космический корабль «Маринер-2», совершавший полет от Земли к Венере в течение августа — декабря 1962 г., был оборудован детектором плазмы и магнетометром, измерявшим все три компоненты вектора магнитного поля. Выполненные на «Маринере-2» измерения плазмы убедительно подтвердили существование солнечного ветра [21]. Этот период характеризовался умеренной солнечной активностью, и в течение всего периода существовал измеримый поток плазмы, текущей радиально

от Солнца. Скорость плазмы менялась от 300 до 800 *км/сек*, а концентрация ее менялась от 0,2 до 70 *частиц/см*^{3}. Внезапные увеличения скорости сопровождались увеличением флуктуаций магнитного поля на поверхности Земли. Максимальные значения скорости обнаруживали тенденцию к повторению через 27 суток, что является периодом вращения Солнца. Отсюда следует, что потоки плазмы, связанные с активными областями, существуют длительное время, искривляясь в межпланетной среде вследствие вращения Солнца. В начальный момент увеличения скорости плазмы плотность ее возрастает до максимального значения, а затем плотность уменьшается, хотя скорость плазмы остается высокой.

К сожалению, магнитные материалы, находившиеся внутри космического корабля, создавали вблизи магнетометра поле порядка 100 гамм [22]. Это поле существенно изменилось за период времени между калибровкой перед полетом и началом эксперимента в космическом пространстве. Космический корабль вращался в течение первых нескольких дней после запуска. Так как собственное поле корабля вращалось вместе с ним, а межпланетное поле можно считать постоянным в течение одного оборота корабля, исследователи могли определить величину магнитного поля, создаваемого космическим кораблем, в направлении, перпендикулярном к оси его вращения. Компоненту поля вдоль оси вращения нельзя было измерить этим методом. После того как вращение прекратилось, эта ось космического корабля оставалась все время направленной на Солнце. Поэтому можно было измерять изменения поля в этом направлении (радиальное направление от Солнца), но среднее значение поля оставалось неизвестным. Радиальная компонента могла быть направлена или к Солнцу, или в противоположном направлении. Таким образом, вследствие экспериментальных трудностей не была использована возможность измерить направление межпланетного магнитного поля. Однако исследователи смогли показать, что среднее за несколько суток значение компоненты поля, перпендикулярной к плоскости эклиптики, было близким к нулю. Это показывает, что межпланетное магнитное поле действительно располагается в плоскости эклиптики, что согласуется с моделями Паркера и Голда и с косвенными аргументами Мак-Кракена.

Доказательство существования «бесстолкновительного» фронта ударной волны в космическом пространстве было недавно получено в экспериментах на «Маринере-2» [23]. Отождествление основывается на скачкообразном изменении характеристик плазмы и межпланетного поля. Расстояние в движущейся плазме, на котором происходят эти изменения, значительно меньше среднего свободного пробега для столкновений протонов плазмы, но больше, чем гирорадиус протонов в межпланетном поле.

НЕДАВНИЕ ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Искусственный спутник «IMP-1», запущенный в конце 1963 г., осуществлял несколько экспериментов с плазмой, а также проводил обширные магнитные измерения [24,25]. Эти измерения выполнялись с помощью рубидиевого магнетометра, который обеспечивал точные определения величины поля, и двух магнитонасыщенных датчиков, укрепленных под углом к оси вращения спутника, каждый из которых измерял одну компоненту магнитного поля. Так как спутник вращался, оба магнитонасыщенных датчика давали в течение каждого оборота сведения о величине и направлении поля. Использование двух независимых магнитометрических систем значительно повышало надежность измерений. Магнитное поле, создаваемое самим космическим кораблем, согласно измерениям, выполненным перед запуском, было очень слабым, менее 1 гаммы. Ана-

лиз полетных данных показал, что и в дальнейшем поле корабля оставалось таким же. Меры предосторожности, принимавшиеся исследователями и инженерами при подготовке и монтаже аппаратуры, являются примером для последующих экспериментов. Спутник был запущен в период низкой солнечной активности, вследствие чего результаты наблюдений следует сравнивать в основном с моделью Паркера для спокойного периода.

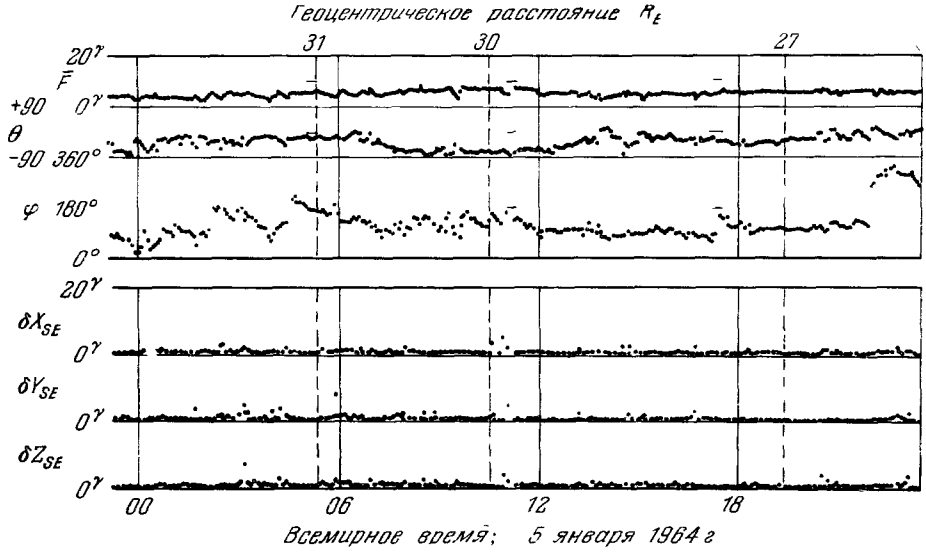

Рис. 8. Часть регистрации данных на спутнике «IMP-1».

В течение этого 24-часового интервала (5 января 1964 г.) спутник находился вблизи точки апогея (31 R_e). Временна́я шкала внизу дана в часах всемирного времени; шкала расстояний наверху — в земных радиусах. Верхняя кривая дает полную величину поля $\bar{F}$ в гаммах. Ниже последовательно располагаются кривые, показывающие изменение солнечного эклиптического угла θ (от —90° до 0° и до + 90°), угла φ (от 0 до 360°), и дисперсия магнитного поля по каждой компоненте X, Y, Z [дисперсия — мера флуктуации измерений поля для каждого среднего из двенадцати измерений — определяется по Нессу [25] как

$$\delta X_{se} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (X^i_{se} - \bar{X}_{se})^2\right]^{1/2},$$

где $N = 12$, X^i_{se} — отдельные измерения компонент X_{se}, а $\bar{X}_{se}$ — среднее из двенадцати измерений]. Отметим, что изменчивость за пределами 20 R_e мала — всего несколько гамм, что указывает на постоянство поля. На расстояниях больше 20 R_e в невозмущенной межпланетной среде величина поля меняется между 2 и 8 гаммами, угол θ меняется между +10 и —90° и угол φ — между 0 и 210°. Наблюдались внезапные большие изменения значения φ. Около 15 часов поле стабильно около часа, величина его — около 5 гамм, θ = — 45° и φ = 180°, т. е. поле направлено от Солнца. В 18 часов величина поля и значение θ остаются неизменными, а угол φ уже равен 90°, т. е. поле перпендикулярно к линии Солнце — Земля. Граница магнитосферы обнаруживается на расстоянии 13 R_e, где величина поля падает и направление его резко меняется; фронт ударной волны расположен вблизи 20 R_e — поле здесь уменьшается и величина и направление его становятся менее стабильными (Н. Несс, К. Спрс, Т. Сик [25]).

Из наблюдений следует, что полная величина межпланетного поля остается очень стабильной. Отмечены изменения между 4 и 7 гаммами с отдельными понижениями до 1 гаммы и возрастаниями до 10 гамм. Среднее направление поля согласуется со спиральной структурой, предсказанной Паркером. Угол между полем и линией Солнце — Земля в среднем равен 45°, и поле направлено немного южнее плоскости эклиптики. Отмечены случаи обращения направления поля в течение нескольких часов, а в отдельных случаях в течение 5—20 минут направление поля менялось от 135 до 315° относительно линии Солнце — Земля (рис. 8). Частые обращения магнитного поля позволяют предположить, что спиральное

межпланетное поле имеет волокнистую структуру, причем поля прилегающих волокон имеют противоположные направления. Неоднократно наблюдались магнитопауза, переходная область и вторая граничная область. Измерения плазмы подтвердили результаты измерений в межпланетной среде на «Маринере-2»; при этом было обнаружено наличие плазмы в переходной области, приходившей туда со всех направлений (изотропно). Существенные изменения свойств плазмы и поля в области второй границы согласовались с существованием предсказанного фронта ударной волны. Таким образом, предполагаемый фронт «бесстолкновительной» ударной волны, по-видимому, в настоящее время имеет достаточно прочные экспериментальные доказательства. Относительно стабильное поле малой интенсивности в межпланетном пространстве может быть типичным для спокойных условий в эпоху минимума солнечной активности. В периоды больших бурь или во время максимума солнечной активности поле может усиливаться и становится более изменчивым. При последующих наблюдениях на спутниках интересно будет проследить, сохранится ли наклон поля относительно плоскости эклиптики в течение года и в течение цикла солнечной активности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткий период между развитием представлений о межпланетном магнитном поле и окончательным доказательством его существования был очень волнующим. Обилие теоретических исследований и их тщательная экспериментальная проверка обусловили быстрый прогресс. Из изложенных здесь экспериментальных данных ясно, что межпланетное магнитное поле существует постоянно вследствие выноса поля с Солнца солнечным ветром. Вследствие вращения Солнца поле приобретает спиральную структуру. Оно, по-видимому, состоит из относительно узких волокон, причем поля примыкающих друг к другу волокон имеют противоположные направления. На орбите Земли поле направлено немного южнее плоскости эклиптики. Величина поля остается постоянной и составляет около 5 гамм в спокойные периоды, но может заметно возрасти при увеличении солнечной активности. В плазме, обтекающей Землю, формируется фронт «бесстолкновительной» ударной волны. В переходной области между фронтом ударной волны и магнитопаузой величина поля немного выше, чем в межпланетной среде, и постоянно наблюдаются флуктуации величины и направления этого поля. Фронт ударной волны наблюдался также и в космическом пространстве между медленно движущимся облаком плазмы и более быстрым, перегонявшим его, потоком плазмы.

За пределами орбиты Земли солнечная плазма должна продолжать двигаться с той же скоростью, унося с собой межпланетное поле [26]. Угол между силовыми линиями спирального поля и радиальным направлением от Солнца будет возрастать до тех пор, пока на больших расстояниях направление поля не станет перпендикулярным к направлению потока плазмы. Плотность энергии плазмы уменьшается с уменьшением плотности плазмы обратно пропорционально квадрату радиального расстояния, и поэтому на расстояниях от 10 до 100 а. е. плотность энергии плазмы достигает плотности энергии галактической среды. Возникающие нестабильности приводят к образованию неупорядоченной внешней области плазмы и поля. Поэтому необходимы непосредственные экспериментальные исследования с помощью космических ракет, способных функционировать на расстоянии 100 а.е.

Слабое межпланетное поле оказывает значительное влияние на протоны космических лучей. Исследование этих частиц оказалось исключи-

тельно полезным для определения крупномасштабных свойств межпланетного поля. Точное определение величины и направления поля в определенной точке космического пространства и изучение его мелкомасштабных флуктуаций можно выполнить только при помощи магнетометра, помещенного на космическом корабле. Эти методы дополняют друг друга и оба будут использоваться при дальнейших исследованиях межпланетного поля в последующие пять лет, когда будет происходить рост солнечной активности.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. C. O. Hines, Science **141**, 130 (1963).
2. H. W. Babcock and H. D. Babcock, Astrophys. J. **121**, 349 (1955).
3. S. Chapman and V. C. A. Ferraro, Terr. Magnet. Atm. Electr. **36**, 77, 177 (1931); **37**, 147 (1932); **38**, 79 (1933).
4. H. Alfvén, Cosmical Electrodynamics, Clarendon, Oxford, 1950.
5. L. Biermann Observatory **77**, 109 (1957).
6. S. Chapman Smithsonian Contrib. Astrophys. **2**, 1 (1957).
7. E. N. Parker, Astrophys. J. **128**, 664 (1958).
8. T. Gold, J. Geophys. Res. **64**, 1665 (1959).
9. J. A. Simpson, Annals International Geophysical Year, vol. 4, Pergamon, New York, 1956, стр. 349; P. Meyer, E. N. Parker, J. A. Simpson, Phys. Rev. **104**, 768 (1956); D. A. Bryant, T. L. Cline, U. D. Desai, F. B. McDonald, J. Geophys. Res. **67**, 4983 (1962).
10. D. K. Bailey, J. Geophys. Res. **62**, 431 (1957).
11. E. N. Parker, Astrophys. J. **133**, 1014 (1961).
12. K. G. McCracken, J. Geophys. Res. **67**, 423, 447 (1962).
13. Ibid., стр. 435.
14. K. I. Gringauz, V. V. Bezrukikh, V. D. Ozerov, R. E. Rybchinskii, Dokl. Akad. Nauk SSSR **131**, 1301 (1960); S. Sh. Dolginov, E. G. Eroshenko, L. N. Zhuzov, N. V. Pushkov, L. O. Tyurmina, Proc. Intern. Space Sci. Symp., Ist., Nice, 1960, стр. 863.
15. C. P. Sonett, D. L. Judge, A. R. Sims, J. M. Kelso, J. Geophys. Res. **65**, 55 (1960).
16. P. J. Coleman, L. Davis, C. P. Sonett, Phys. Rev. Letts. **5**, 43 (1960).
17. J. P. Heppner, N. F. Ness, C. S. Scearce, T. L. Skillman, J. Geophys. Res. **68**, 1 (1963).
18. L. J. Cahill and P. G. Amazeen, ibid., стр. 1835.
19. J. W. Dungey, Planetary and Space Sci. **10**, 233 (1963).
20. T. Gold, Gas Dynamics of Cosmic Clouds (Van De Hulst, Ed.), North-Holland, Amsterdam, 1955, стр. 228; V. N. Zhigulev, Soviet Phys. «Doklady» (English Transl.) 4, 514 (1959); W. I. Axford, J. Geophys. Res. **67**, 3791 (1962); P. J. Kellogg, ibid., стр. 3805.
21. M. Neugebauer and C. W. Snyder, Science **138**, 1095 (1962); C. W. Snyder, M. Neugebauer, U. R. Rao, J. Geophys. Res. **68**, 6361 (1963).
22. P. J. Coleman, Jr., L. Davis, Jr., E. J. Smith, C. P. Sonett, Science **138**, 1099 (1962).
23. C. P. Sonett, D. S. Colburn, L. Davis, Jr., E. J. Smith, P. J. Coleman, Jr., Phys. Rev. Letts. **13**, 153 (1964).
24. J. H. Wolfe and R. W. Silva, работа, доложенная на 45th Annual Meeting of the American Geophysical Union, Washington, D. C., 1964; H. Bridge, A. Egidi, A. Lazarus, E. Lyon, L. Jacobson, работа, доложенная на 5th International Space Science Symposium, Florence, 1964.
25. N. F. Ness, C. S. Scearce, J. B. Seek, J. Geophys. Res. **69**, 3531 (1964).
26. L. Davis, J. Phys. Soc. Japan **17**, Suppl. 2, 543 (1962); W. I. Axford, A. J. Dessler, Gottlieb, Astrophys. J. **137**, 193, 1268 (1963).