

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

523.038

**СЕКТОРИАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МЕЖПЛАНЕТНОГО
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Год назад путем сопоставления магнитных измерений на спутнике «IMP-1» с оптическими методами регистрации магнитных полей на Солнце Нессу и Уилкоксу удалось доказать¹, что магнитное поле в межпланетной среде — это локальное поле отдельных областей поверхности Солнца, приносимое плазмой солнечного ветра.

Спутник «IMP-1» был запущен 27.11.63 г., его орбита — сильно вытянутый эллипс с апогеем на расстоянии 31,7 земного радиуса (R_z). В соответствии со 2-м законом Кеплера (постоянство секториальной скорости) спутник большую часть времени проводил вблизи апогея, в межпланетной среде. На нем были установлены два магнетометра: — один абсолютный (рубидиевый магнетометр) и другой — прибор, измерявший относительную величину поля; последний имел три взаимно перпендикулярных датчика, измерявших величину трех компонент поля с точностью 0,25 γ ($1 \gamma = 10^{-5}$ э). Подробное описание этого эксперимента см. в^{2,3}.

В работе⁴ Несс и Уилкоккс сделали следующий, весьма естественный шаг. Известно, что в разных участках поверхности Солнца поле имеет разные направления. Установив, что межпланетное поле — это локальное поле отдельных областей солнечной поверхности, они должны были ожидать и в межпланетной среде некую секториальную структуру с разным направлением поля в различных секторах. И проанализировав данные своего эксперимента^{4,5}, они действительно обнаружили такую структуру.

На рис. 1 показаны усредненные результаты измерений «IMP-1». Стрелкой изображено направление измеренного магнитного поля.

Как видно из рис. 1, реальное межпланетное поле синтезирует в себе особенности обеих моделей межпланетного поля — модели Паркера и модели Голда (см. обзор Кахилла, УФН, т. 87, вып. 3, ноябрь 1965 г.). С одной стороны, оно закручивается вращением Солнца в паркеровскую архимедову спираль. Эта спираль есть прямое следствие вмороженности поля в плазму. В системе координат, связанной с вращающимся Солнцем, траектории частиц солнечного ветра спирали, соответственно и поле, вмороженное в плазму, вытягивается в спираль, следуя за частицами плазмы. С другой стороны, это — не «общее», дипольное поле Солнца (такого, оказывается, в межпланетной среде нет вовсе), а поле отдельных областей на поверхности Солнца, уносимое солнечным ветром (модель Голда).

Кратко опишем метод усреднения экспериментальных данных, что позволит судить о специфических особенностях эксперимента и об его ограничениях.

Каждые 20 сек (сеансами по 4,8 сек) измерялись одновременно все три компоненты поля, т. е. определялась как величина, так и направление вектора поля. Полученные результаты усреднялись затем за 5,46 мин. На рис. 2 показано изменение поля при переходе через фронт предполагаемой ударной волны. Эта магнитограмма является уникальной по своей физической значимости — это первая и единственная магнитограмма структуры фронта бесстолкновительной ударной волны (X , Y , Z — три взаимно перпендикулярные составляющие поля). Но здесь нас интересует методическая сторона: на этом графике все 12 точек за 5,46 мин показаны еще до усреднения. На рис. 3 показана характерная магнитограмма межпланетного поля с усреднением за 5,46 мин (в эклиптической системе координат; φ — долгота, θ — широта, δX_{GE} , δY_{SF} , δZ_{Se} — средние квадратичные отклонения от среднего за 5,46 мин, так же как и в²). Таким образом, межпланетное поле постоянно флуктуирует, притом в разных масштабах по-разному.

Несс и Уилкоккс искали крупномасштабные закономерности межпланетного поля соответственно, они усредняли поле за 3 часа. На рис. 4 показано статистическое распределение направлений поля при таком усреднении (слева — в плоскости эклиптики,

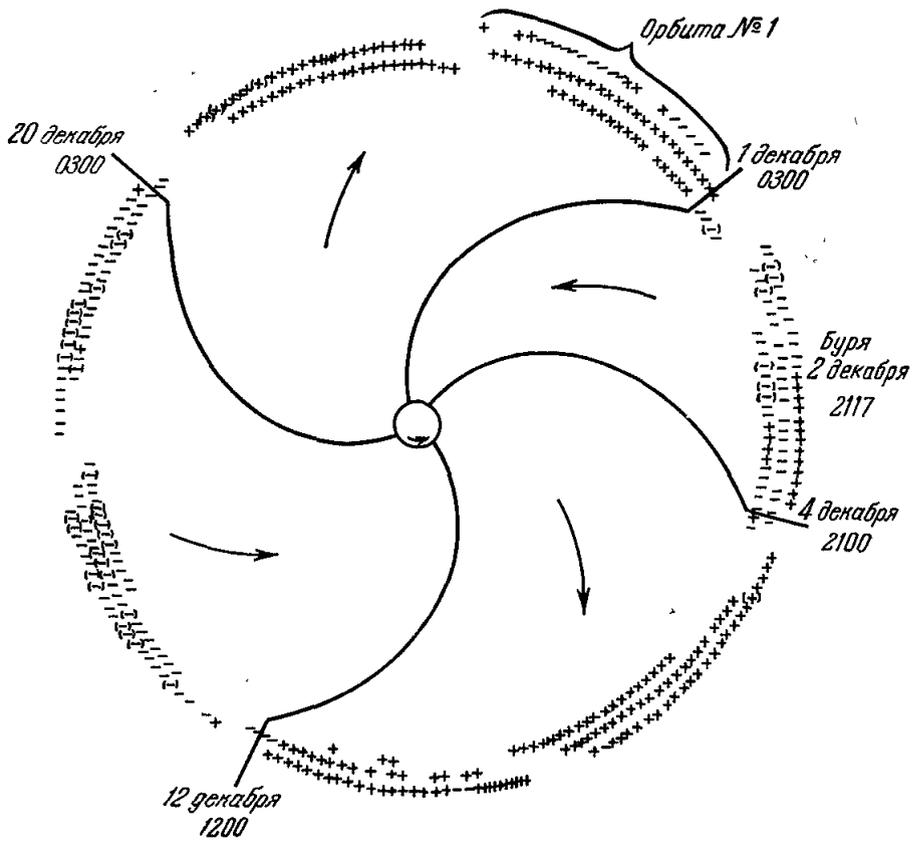


Рис. 1.

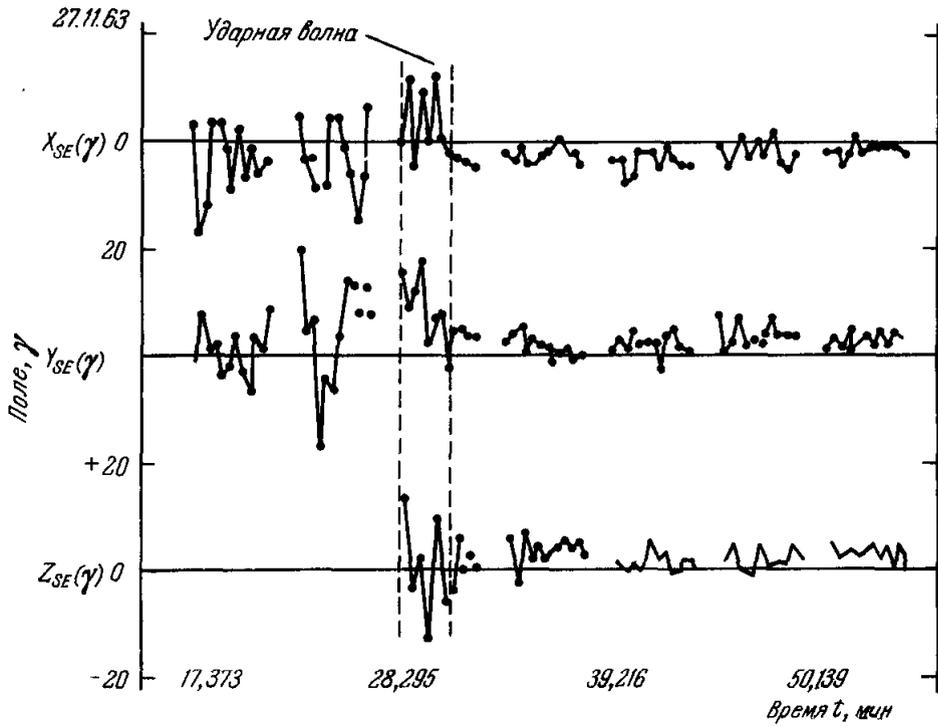


Рис. 2.

справа — в плоскости, перпендикулярной к ней). Мы видим, что в плоскости эклиптики поле составляет с направлением от Солнца угол порядка 50° (экспериментальное обнаружение архимедовой спирали Паркера), а в перпендикулярной плоскости поле направлено на $15-20^\circ$ вниз, под плоскость эклиптики.

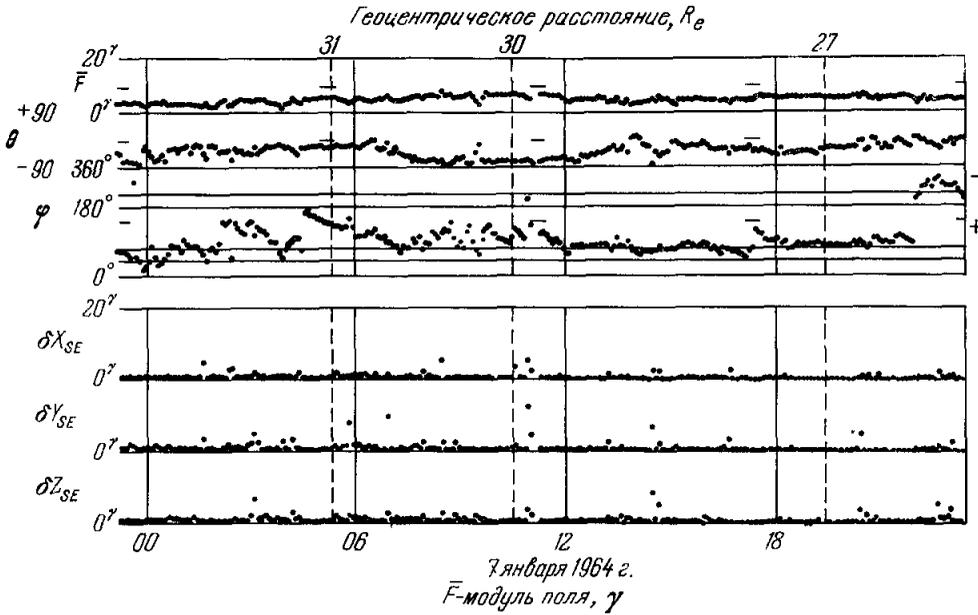


Рис. 3.

Далее, каждому трехчасовому интервалу приписывался знак «+» или «-», судя по преимущественному направлению в нем вектора магнитного поля («+» — от Солнца, «-» — к Солнцу), и этот знак наносился по периферии спирали на рис. 4

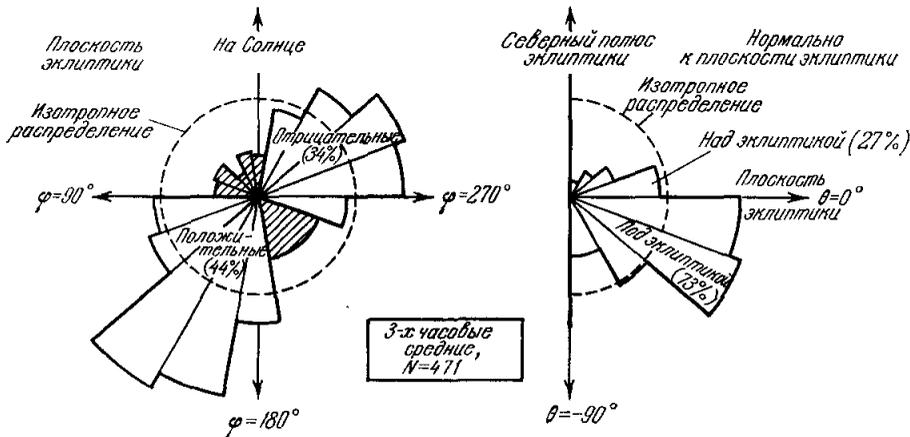


Рис. 4.

Как видно, угловой разворот каждого из трех больших секторов составляет $2/7$ оборота Солнца (т. е. $7^8/4$ суток), а четвертого — $1/7$ оборота. Всего прослежено таким путем 3 оборота Солнца, т. е. 7 больших секторов.

Вращение всей структуры вместе с Солнцем следует как из ранее доказанного¹ солнечного происхождения межпланетного поля, так и из 27-дневной повторяемости направления поля и его величины.

Период обращения спутника случайно совпал с длительностью малого сектора (4 дня), и когда у Земли проходила граница сектора, спутник оказывался в перигее,

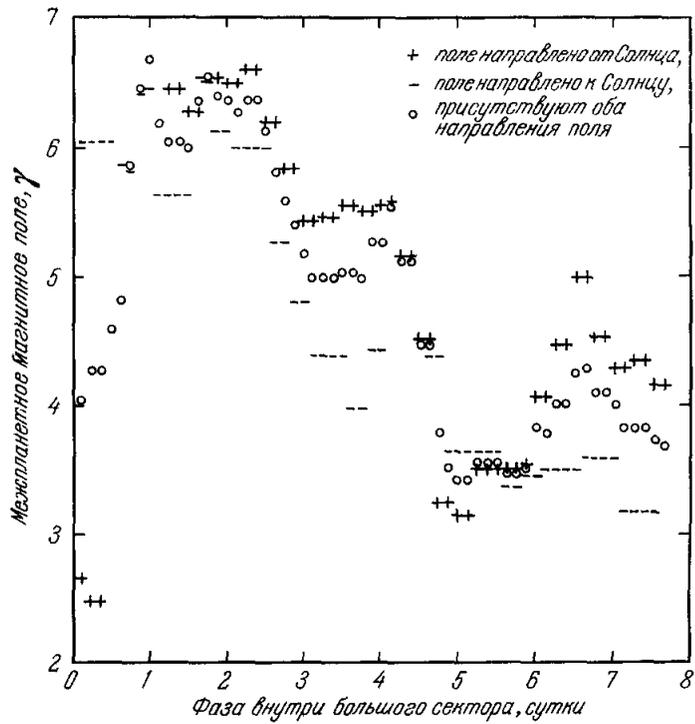


Рис. 5.

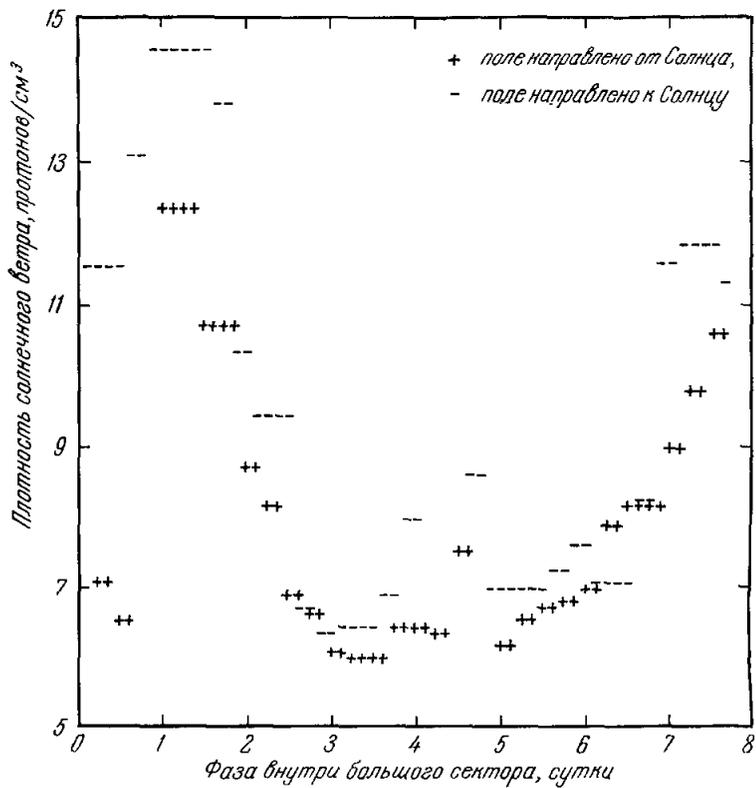


Рис. 6.

на высоте 200 км, и ничего не мерил. Авторы тщательно исследовали, не является ли секторальная структура поля экспериментальной ошибкой, связанной с таким фазовым соотношением. Но уже постоянство знака поля внутри каждого из больших секторов, заключающих в себе по две орбиты спутника, показывает, что такая ошибка не имела места.

Описанные особенности опыта — необходимость усреднения и возможность ложных эффектов, связанных с фазой и ориентацией спутника на орбите, характерны

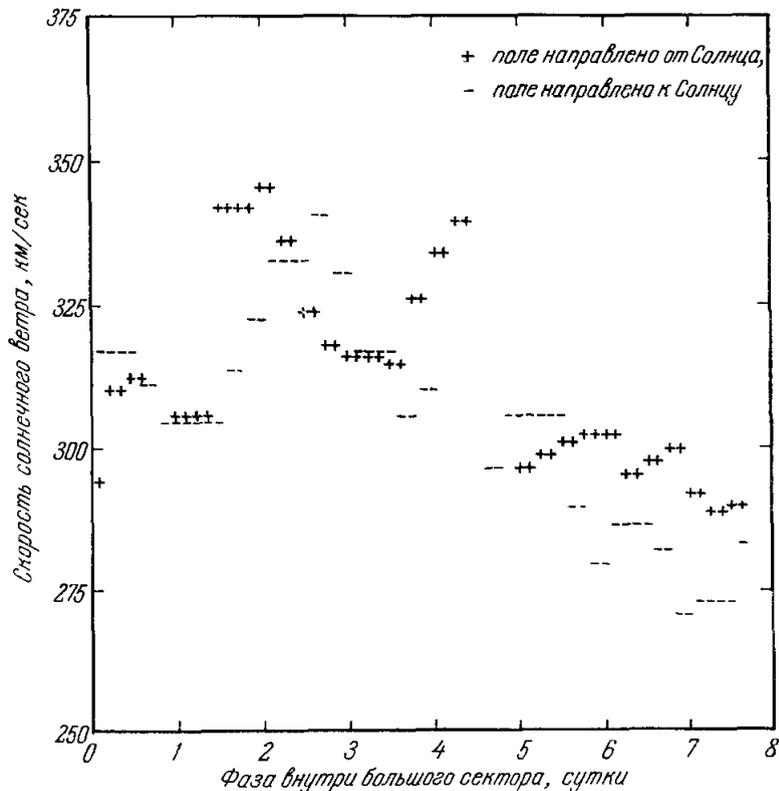


Рис. 7.

именно для измерений в космосе. Перейдем к анализу физической картины в н у т р и секторов. Здесь ясно будет видна третья особенность измерений в космосе: одновременное измерение (пока на одном и том же спутнике) нескольких параметров космической плазмы и сопоставление их между собой.

На рис. 5 показаны результаты измерения межпланетного поля внутри больших секторов. По оси абсцисс отложен интервал времени от прохождения Земли границей сектора (в сутках), по оси ординат — поле в γ . Заметна определенная закономерность: в начале и в конце сектора поле достигает максимума, в середине сектора (на пятые сутки) оно минимально ($H_{\min} = 3-3,5\gamma$, $H_{\max} = 6\gamma$). Поскольку такой ход поля наблюдается как в «+», так и в «-»-секторах, он связан не с исходными полями на поверхности Солнца, а с какими-то не вполне ясными процессами распространения солнечного ветра от Солнца до Земли. По вполне определенному закону (рис. 6) меняется внутри сектора и плотность плазмы солнечного ветра — она также максимальна на краях и минимальна в середине. Так же как и для поля, передний максимум выше заднего. Скорость плазмы (рис. 7) почти монотонно (кроме первых двух дней) убывает от начала сектора к его концу. Данные рис. 5—7 получены ионными ловушками, установленными на том же спутнике. Следует иметь в виду, что во многих случаях данные ловушек и электростатических анализаторов получаются разными. Причина этого пока не ясна. Во всяком случае, измерения магнитного поля являются в настоящее время наиболее надежными среди всех измерений параметров космической плазмы. Большой геофизический интерес представляют и данные о связи фазы в секторе с геомагнитной активностью (резко выраженный максимум на второй день) ⁴.

Результаты измерений на «IMP-I» позволили сделать существенный шаг вперед также и в сложной проблеме рекуррентных магнитных бурь. Дело в том, что существует определенный класс магнитных бурь, которые «ни с чем» на Солнце не связаны — ни со вспышками, ни с ударными волнами на поверхности Солнца. И эти бури повторяются через 27 дней, т. е. они вызываются какой-то определенной областью солнечной поверхности. На «IMP-I» была зафиксирована одна такая буря; проследив по

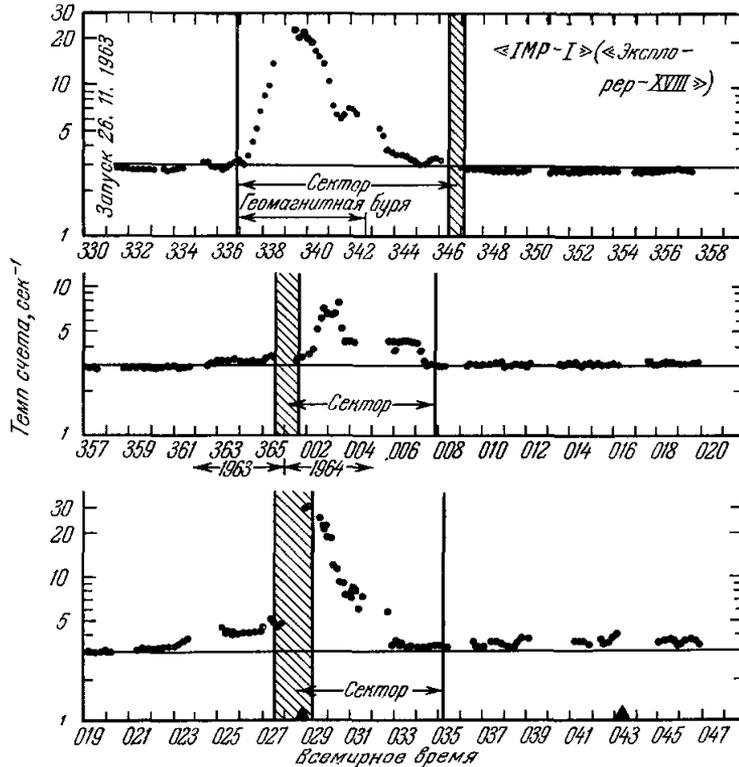


Рис. 8

паркеровской спирали соответствующую область на Солнце, Несс и Уилкокс нашли по картам солнечных магнитных полей, что буря «исходит» из униполярной области со слабым полем ($H = 2-4\text{э}$), направленным от Солнца наружу.

Наконец, важным результатом эксперимента на «IMP-I» оказался также обнаруженный в одном из больших секторов поток протонов с энергией в несколько $M\text{эв}$. На рис. 8 показаны кривые темпа счета детектора таких протонов (заштрихованы участки, когда спутник находился в перигее и ничего не мерил). Существенно, во-первых, что этот поток протонов связан с определенным сектором. Когда через 27 дней этот сектор снова проходит у Земли, появляются вновь и протоны. Так что их испускает определенная область на Солнце. Во-вторых, важно, что в других секторах эти протоны не появляются. Этот экспериментальный факт доказывает, что магнитные силовые линии положительного сектора не соединяются с возвращающимися к Солнцу силовыми линиями отрицательного сектора.

М. Г.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. N. F. Ness, J. M. Wilcox, Phys. Rev. Letts. 13, 461 (1964).
2. N. F. Ness, C. S. Scearce, J. B. Seek, J. Geophys. Res. 69, 3531 (1964).
3. N. F. Ness, C. S. Scearce, J. B. Seek, J. M. Wilcox, A Summary of Results from the IMP-I, Space Research. VI, Amsterdam, 1966.
4. N. F. Ness, J. M. Wilcox, Preprint (1965).
5. J. M. Wilcox, N. F. Ness, J. Geophys. Res. 70, 5793 (1965).