

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

523.14

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА
МЕЖДУ СОЛНЕЧНЫМИ СЕКТОРАМИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ
ПЛАЗМЫ**

Измерения магнитных полей в космосе обнаружили секториальную структуру межпланетного магнитного поля — в одних секторах оно направлено от Солнца, в других — к Солнцу^{1,2}. Встает естественный вопрос о структуре переходной области между секторами. Очевидно, в такой граничной области плазма горячая ($nkT > H^2/8\pi$), поскольку магнитное поле при переходе через нуль мало. Следовательно, оно не в состоянии удерживать плазму, движение которой сильно возмущено турбулентностью. Однако совсем не очевидно, что такая турбулентная граница пропускает космические лучи значительно хуже, чем регулярное поле паркеровской спирали. И вот такое замечательное свойство турбулентных областей недавно удалось обнаружить на опыте — по измерениям космических лучей на ракете «Пионер-6», запущенной к Солнцу³. Турбулентная граница служит как бы «метлой», выметающей при своем вращении космические лучи, приходящие извне в солнечную систему.

К такому выводу авторы работы³ пришли в результате следующего анализа своих и чужих экспериментальных данных.

Один из наиболее резко выраженных эффектов в распространении космических лучей — это так называемый эффект Форбуша («форбуш-эффект»): интенсивность космических лучей уменьшается за время от 6 до 24 часов до своего минимума, а затем в последующие несколько дней медленно возвращается к прежнему невозмущенному значению.

Форбуш-эффект был открыт при наземных наблюдениях. Одним из первых результатов измерений на спутниках было выяснение глобального характера форбуш-эффекта — он наблюдается одновременно на Земле и в космосе и тем самым обусловлен не околоземными, а межпланетными магнитными полями, экранирующими Землю от космических лучей. Часто эти внезапно возникающие поля можно связать с ударной волной от солнечных вспышек. Однако наряду с форбуш-эффектом от солнечных вспышек наблюдается также форбуш-эффект, которому не предшествуют никакие солнечные вспышки. Он связан с M -областями — участками солнечной поверхности, при прохождении которых через линию Земля — Солнце наблюдаются рекуррентные (повторяющиеся через 27-дневный оборот Солнца вокруг своей оси) магнитные бури.

В реферируемой работе³ на спутнике «Пионер-6» на расстоянии в миллионы километров от Земли наблюдался такой рекуррентный форбуш-эффект для протонов с энергиями $\sim 7,5$ Мэв. Подчеркнем, что на поверхности Земли измерения галактических космических лучей в этом диапазоне осуществить затруднительно — первичные протоны столь малых энергий задерживаются и отклоняются геомагнитным полем, и к тому же такие частицы могут образовываться в нейтральной атмосфере как вторичные — при столкновениях быстрых частиц с атомами нейтрального газа. И только измерения вне магнитосферы позволили обнаружить эффекты, о которых идет речь.

На рис. 1 показана кривая зависимости темпа счета от времени. Моменты, разделенные интервалом солнечного вращения (27 суток), соединены пунктиром. Ясно видна 27-дневная повторяемость форбуш-эффекта (поворот соответствующей M -области на 360°).

На рис. 2 кривые форбуш-эффекта сопоставлены с показаниями магнитометра на том же спутнике. Отметим, что эксперимент этот очень тонкий — он на грани возможной точности (см. масштаб по оси ординат рис. 2, точность 10^{-3}).

Авторы³ делают два вывода:

1) Наблюдаемые ими форбуш-эффекты обусловлены определенными «горячими» участками вращающейся поверхности Солнца. Отсюда и их 27-дневная повторяемость.

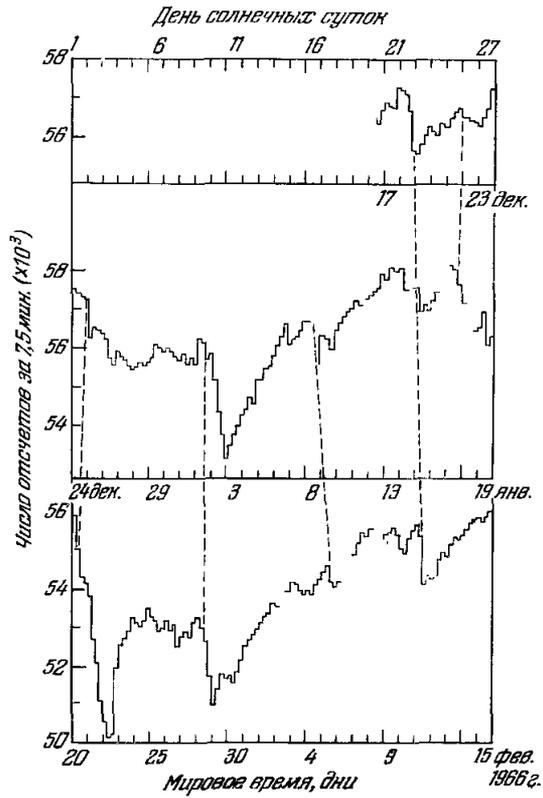


Рис. 1.

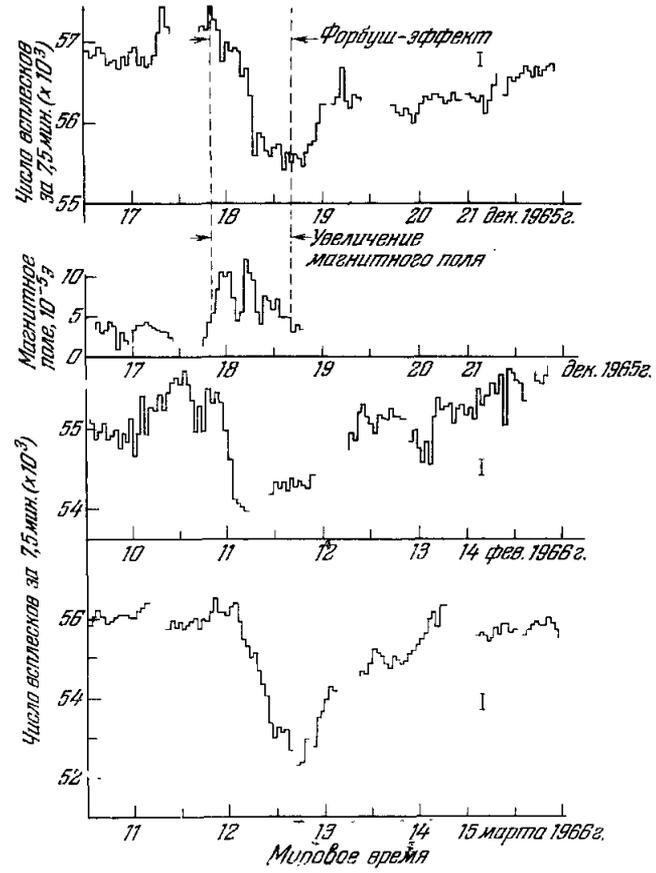


Рис. 2.

2) Из сопоставления данных «Пионера-6» с данными по межпланетному магнитному полю, полученными на «ИМП-1» и «Маринере-2», следует, что *M*-области часто совпадают с границами между секторами. Соответственно эффект понижения интенсивности галактических космических лучей связан с прохождением турбулентной границы между секторами, в толще которой нарастают переменные магнитные поля, служащие экраном от космических лучей (рис. 3).

Поднятый этой работой круг вопросов далек от окончательного решения. Встает, в частности, задача исследования структуры такой границы в зависимости от параметров плазмы по обеим ее сторонам (направленной скорости потока u_0 , альвеновской скорости v_A , вектора магнитного поля H , температур электронов и ионов).

Поскольку большая часть электромагнитных явлений в магнитосфере Земли связана с процессами в межпланетной среде («все идет от Солнца»), прохождение границы между секторами должно вызывать какие-то эффекты во всех многообразных проявлениях процесса взаимодействия Солнце — Земля. Так оно и оказалось. По измерениям на спутнике 1963 38 С⁴ прохождение границы вызывает значительные изменения в концентрации электронов с энергиями 280 кэв и 1,2 Мэв на расстояниях $\sim 4,5 \div 5$ земных радиусов. Грубо говоря, при изменении полярности от отрицательной (κ_1 Солнцу) на положительную (от Солнца) интенсивность потока электронов возрастает (рис. 4; геоцентрическое расстояние $L = 4,5R_z$, $E_e \approx 1,2$ Мэв, по оси абсцисс отложены дни — январь 1964 г., по оси ординат — темп счета). Отметим в этой работе три обстоятельства.

Во-первых, методика измерений. Спутник был запущен не в область $L = 4,5R_z$, а на высоту 1000 км. Но запустили его на полярную орбиту. Магнитные силовые линии с удаленных областей магнитосферы сходятся именно в приполярные области. Поэтому спутник с круговой полярной орбитой позволяет следить за процессами в удаленных областях магнитосферы.

Во-вторых, методика анализа результатов. Автор использует неопубликованные результаты измерений на спутнике «ИМП-1», летавшем в это же время, результаты Несса и Уилкокса (магнитное поле) и Лайона (плазма) и строит по ним зависимость числа Маха от фазы внутри сектора (рис. 5, M_a — число Маха, $\beta = M_a^2 - \frac{4\pi n u^2}{H^2}$, деления по оси абсцисс — дни). При перемене полярности от минуса к плюсу, вызывавшей возрастание потока быстрых электронов, число Маха, как видно из рис. 5, также возрастает (вдвое), т. е. автор привлекает измерения других параметров и плазмы и в другой области — не в магнитосфере, а в межпланетной среде.

В-третьих, морфология этого нарастания интенсивности быстрых электронов довольно сложная — оно зависит и от геоцентрического расстояния, и от энергии частиц. Все эти особенности пока еще не поняты. Остается неясным и основной вопрос — механизм появления быстрых частиц: где они ускоряются? Неясно также,

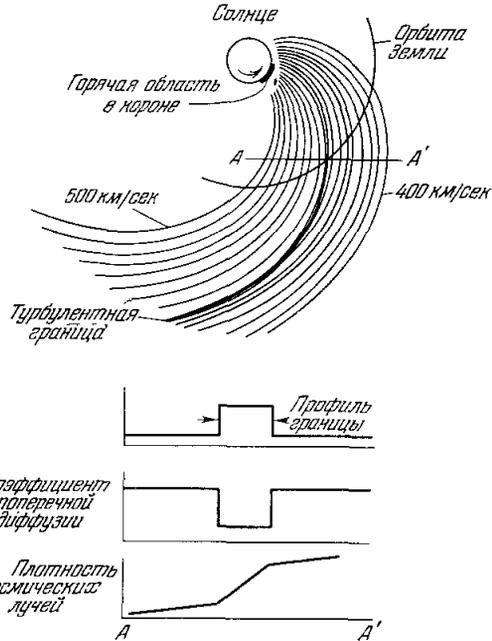


Рис. 3.

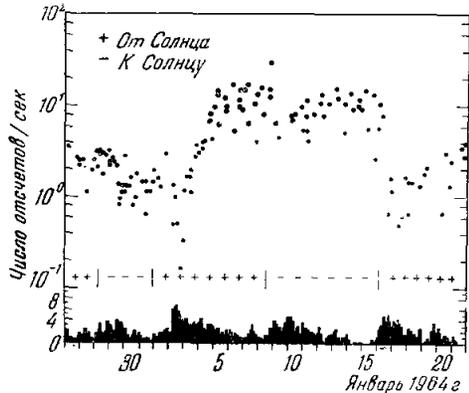


Рис. 4.

почему число Маха на границе $-/+$ возрастает, а на границе $+/-$ почти не меняется.

Выше шла речь об эффектах границы в космических лучах в межпланетной среде и в быстрых электронах внутри магнитосферы. Естественно искать также эффекты в радиоизлучении. И действительно, такой эффект обнаружен. Известен класс низкочастотных (период $T = 0,2 - 5$ сек) колебаний магнитосферы, принимаемых на поверхности Земли и состоящих из дугов колебаний, разделенных интервалами порядка

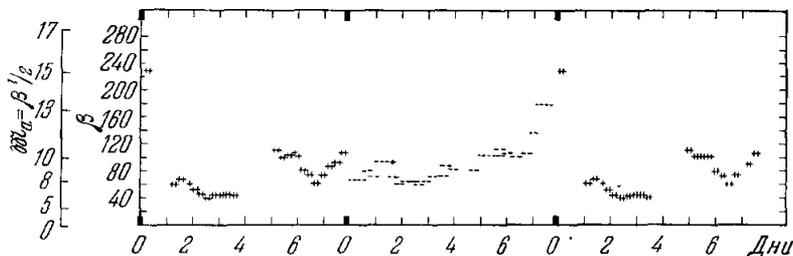


Рис. 5.

нескольких минут. Волновые пакеты этих колебаний подобны жемчужинам, нанизанным на нитку ожерелья, и их назвали «жемчужинами». Природа «жемчужин» окончательно не установлена, однако предложена гипотеза^{5,6}, что такие колебания возбуждаются при сверхсветовом доплер-эффекте быстрыми частицами, колеблющимися между полюсами силовой линии.

Когда произвели статистический анализ частоты появления «жемчужин» в разных фазах солнечного 27-дневного цикла, выяснилось⁷, что чаще всего «жемчужины»

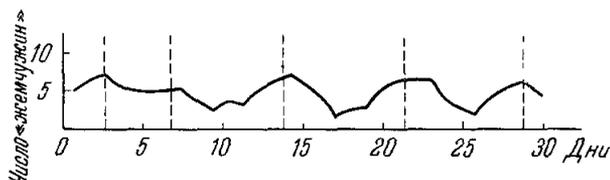


Рис. 6.

появляются на границах между солнечными секторами (рис. 6, по оси абсцисс отложена фаза внутри 27-дневного оборота Солнца в днях, по оси ординат — средняя частота появления «жемчужин»). Как видно, на границах секторов частота появления «жемчужин» максимальная. Причину этого эффекта авторы указать не смогли. Не ясно, что тут первичное — рост потока генерирующих частиц или повышение «эффективности» генерации ими волн. Заметим, что эта альтернатива «или — или» весьма характерна для морфологии земного радиоизлучения.

Следует помнить и о некоторой условности при усреднении. Дело в том, что частота появления «жемчужин» зависит в первую очередь от магнитной активности. Между тем в одни из оборотов Солнца в данный день оборота оно было спокойно, а в другие обороты, наоборот, в данный день оборота на Солнце была вспышка. Так что механическое усреднение без каких-то поправок на солнечную активность полной картины дать не может. Но и при такой оговорке рис. 6 все же обнаруживает некоторую закономерность, наглядно демонстрирующую возможности статистического анализа наземных данных в их сопоставлении с ракетными измерениями межпланетного поля.

Нет сомнения, что эффект смены полярности межпланетного поля на границах секторов обнаружится вскоре и на всех других явлениях электромагнитного комплекса Земля — Солнце.

М. Г.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. Wilcox, N. Ness, J. Geophys. Res. **70**, 5793 (1965).
2. М. Г., УФН **89**, 765 (1966).
3. K. McSpacken, V. Rao, R. Bucata, Phys. Rev. Letts **17**, 928 (1966).
4. D. Williams, J. Geophys. Res. **71**, 1815 (1966).
5. М. А. Гинцбург, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 11, 1679 (1961).
6. T. Obauchi, J. Geophys. Res. **70**, 1069 (1965).
7. R. McPherron, S. Ward, J. Geophys. Res. **72**, 393 (1967).