

## АСТРОНОМИЯ

УДК 537.591.5

## НАБЛЮДЕНИЕ ПЕТЛЕВОЙ ЛОВУШКИ СКЛ 20 августа 1991 г.

С. И. Ермаков, Н. Н. Контор, Г. П. Любимов, Н. Н. Павлов, В. И. Тулузов,  
Е. А. Чучков, Б. Я. Щербовский

(НИИЯФ)

Рассмотрено кратковременное возрастание потоков солнечных космических лучей (СКЛ) 20 августа 1991 г., направленных к Солнцу. Показано, что это связано с прохождением через окрестность Земли петлевой структуры межпланетного магнитного поля (ММП), заполненной двигающимися к Солнцу частицами СКЛ. Построена крупномасштабная структура ММП, существовавшая в окрестности Земли 18–20 августа 1991 г.

В период 17–22 августа 1991 г. аппаратурой КС-18, установленной на ИСЗ «Гранат» [1], который в основном находился вне магнитосферы Земли (его апогей составлял  $\sim 200$  тыс. км), были зарегистрированы увеличения потоков СКЛ, в частности возрастания потоков протонов в энергетических диапазонах 1–20 МэВ и 5–20 МэВ (рис. 1). Из рис. 1 видно, что в этот период было два возрастания СКЛ: первое — с максимумом в конце суток 18-го и второе — с максимумом в начале суток 20 августа. Потоки протонов первого возрастания имеют очень мягкий спектр, так как в нем нет протонов с энергиями больше 5 МэВ. Вспышек, которые могли бы генерировать ударные волны и потоки частиц в течение нескольких дней перед этим возрастанием, не наблюдалось (по данным Solar Date, N 570, II), но на Земле зарегистрировано внезапное начало (SC) магнитной бури в середине суток 18.08.1991 г. (Solar Date, N 566, I).

Максимум первого возрастания потоков протонов наступил только через 6 ч после SC, и он (по данным нейтронных мониторов в Туле — см. рис. 1, а также в Киле и Токио) совпадает с началом форбуш-понижения потоков галактических космических лучей (ГКЛ).

Следовательно, межпланетная ударная волна, вызвавшая SC и связанное с ней по времени возрастание СКЛ, является квазистационарной, вращающейся в межпланетной среде вместе с Солнцем (так называемой рекуррентной). Ударная волна вызвала достаточно большое ( $\sim 8\%$ ) форбуш-понижение потоков ГКЛ, восстановление которых происходит медленно (в течение примерно 9 дней). За это время не наблюдалось других форбуш-понижений ГКЛ и SC по данным сети наземных станций.

Данные аппаратуры КС-18 (см. рис. 1, а, б) показывают, что в конце суток 19.08.1991 г. наблюдалось начало второго возрастания потоков протонов малых энергий. Потоки протонов более высоких энергий резко увеличились только в начале суток 20.08.1991 г., а через несколько часов также резко уменьшились, причем возрастание их длилось более короткое время.

Кроме того, из данных аппаратуры КС-18 известно, что потоки протонов при втором их возрастании шли в основном к Солнцу. Так, для потока протонов с энергиями 3,3–5,4 МэВ анизотропия составляла примерно 95%. Это свидетельствует о том, что потоки энергичных частиц двигались вдоль какой-то магнитной структуры к Солнцу.

Можно предположить, что это была петлевая магнитная структура [2], которая несколько ранее была заполнена частицами СКЛ от вспышки на Солнце балла 1 N с координатами N04, W58 (с началом

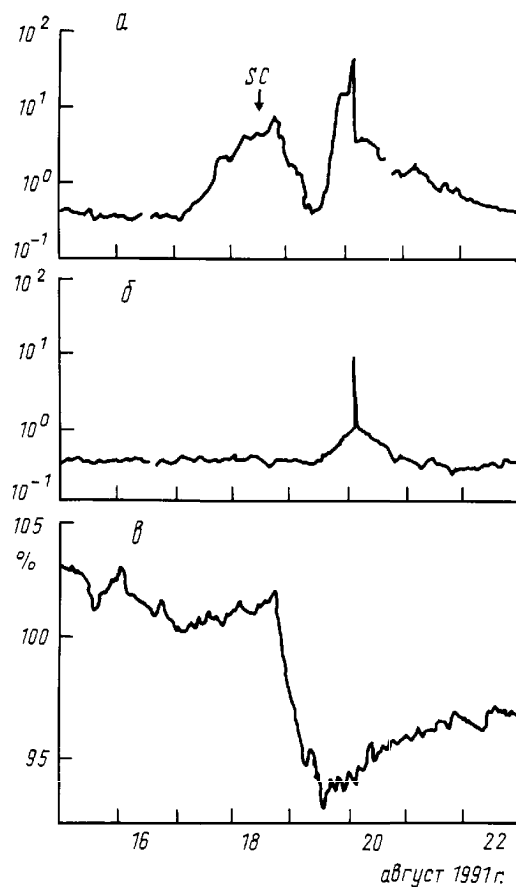


Рис. 1. Потоки протонов ( $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ) в энергетических интервалах 1–20 МэВ (а) и 5–20 МэВ (б) с антисолнечной стороны; показания нейтронного монитора в Туле (в)

в 05 ч 32 мин UT 19.08.1991 г.), которая произошла в активной области N6774. Она сопровождалась рентгеновским излучением балла C8,4 и была наиболее мощной в рассматриваемый период. Но, по данным о радиоизлучении, эта вспышка не образовала межпланетную ударную волну. От нее не наблюдалось вспышечного выброса горячей плазмы в межпланетное пространство. Следовательно, она не нарушила структуру межпланетного магнитного поля, существовавшую ранее.

Из данных по магнитному полю за это время (Solar Data N565, I) следует, что эта вспышка произошла во время прохождения через окрестность Земли границы сектора межпланетного магнитного поля. Видимо, ранее прошла более удаленная часть магнитной петли, которая затем и была заполнена частицами СКЛ от вспышки балла 1 N.

На основании всего сказанного выше, зная зависимость от времени скорости солнечного ветра (по данным Solar Data N573, II), можно построить крупномасштабную структуру межпланетного магнитного поля, видимо, существовавшую в окрестности Земли в рассматриваемый период.

На рис. 2 показано приблизительное положение прямой и обратной рекуррентных (т. е. вращающихся вместе с Солнцем) ударных волн, которые образуются из-за взаимодействия высокоскоростного солнечного ветра с низкоскоростным.

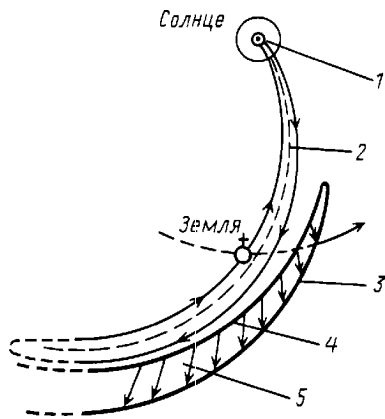


Рис. 2. Положение крупномасштабных магнитных структур на 20 августа 1991 г. (~ в 2 ч 30 мин UT): 1 — положение области № 6774, 2 — граница сектора ММП, 3 и 4 — соответственно прямая и обратная рекуррентные ударные волны, 5 — область взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра

Положение рекуррентных ударных волн рассчитано при помощи метода, изложенного в работе [3], в которой была подробно рассмотрена эволюция профиля скорости солнечного ветра, наблюдаемого на разных космических аппаратах (КА) при увеличении гелиоцентрического расстояния, с использованием модели динамических процессов в солнечном ветре В. П. Шабанского и А. Р. Шистера [4]. Обоснование применимости этой модели дальше точки образования прямой и обратной рекуррентных ударных волн было проверено путем сравнения с большим числом имеющихся экспериментальных данных. В работе [3] для расчета трансформации профиля скоростей солнечного ветра с расстоянием были взяты данные с

четырех КА («Пионер-6, -7, -8, -9»), которые находились на расстоянии  $\sim 1$  а. е. от Солнца, но на разных гелиодолготах. Результаты расчетов сравнивались с профилями скоростей солнечного ветра, полученными на еще двух КА («Пионер-10, -11»), находившихся от Солнца на расстояниях соответственно 4,7 а. е. и 2,1 а. е. В той же работе было показано, что при отсутствии временных изменений скорости солнечного ветра, связанных со вспышками на Солнце, профиль скорости солнечного ветра далее точки образования рекуррентных ударных волн меняется также по модели В. П. Шабанского и А. Р. Шистера. Это доказывалось тем, что расчетные профили скоростей солнечного ветра для гелиоцентрических расстояний 2,1 а. е. и 4,7 а. е. хорошо совпадали с измеренными на КА «Пионер-11, -10». Такое хорошее согласие с линейной моделью, видимо, связано со слабым взаимодействием струй солнечного ветра при их взаимопроникновении.

Для рассматриваемого же в данной работе периода времени имелись только отрывочные данные о скорости солнечного ветра, дополненные данными о знаке межпланетного магнитного поля и об интенсивностях потоков протонов в разных энергетических интервалах в диапазоне  $1 \div 20$  МэВ. Мы считаем, что этих данных достаточно для построения в первом приближении крупномасштабной структуры межпланетного магнитного поля (в данном случае его петли) и определения положения рекуррентных межпланетных ударных волн в солнечном ветре вблизи Земли в рассматриваемый период времени.

На рис. 2 представлена также предполагаемая петлевая магнитная структура, построенная для скорости солнечного ветра  $\sim 600$  км  $\cdot$  с $^{-1}$ .

В результате вспышки на Солнце 19.08.1991 г. произошло заполнение прошедшей ранее Землю западной (правой) части магнитной петли частицами СКЛ (см. рис. 2). Эти частицы двигались по петле от Солнца до точки перегиба, а затем к Солнцу по восточной (левой) части петли.

Если считать, что инжекция частиц от вспышки была импульсной, то потоки протонов с энергиями 5–20 МэВ успели в основном пройти к Солнцу до того, как восточная (левая) часть петли пересекла окрестность Земли (но отразиться от ее основания и пойти снова от Солнца еще не успели). И если считать, что поток протонов с энергиями  $\sim 2$  МэВ в момент прохождения окрестности Земли был максимальным, то можно оценить полную длину магнитной петли.

Поскольку поток от относительно слабой вспышки (балла 1 N) небольшой и магнитное поле слабо-возмущенное, то можно считать, что протоны почти не рассеивались при движении вдоль магнитных силовых линий петли — это подтверждает большая ( $\sim 95\%$ ) анизотропия потока. Такое распространение хорошо описывается моделью когерентной диффузии [5], из которой следует, что диффузионный максимум интенсивности потока протонов распространяется вдоль магнитного поля со скоростью  $V/2$ , где

$V$  — скорость протонов. Если считать, что средняя энергия протонов 2 МэВ и что диффузионный максимум достиг орбиты Земли в момент прохождения левой части петли окрестности Земли (см. рис. 2), то, учитывая время распространения этого максимума (21 ч), мы получим, что протоны прошли путь  $\sim 4,9$  а. е. Полная длина всей магнитной петли (на момент наблюдения максимума протонов) при скорости солнечного ветра 600 км/с составит  $\sim 6$  а. е., а гелиоцентрическое расстояние до ее наиболее удаленной от Солнца части (точка соединения двух ее ветвей) составит  $\sim 2,5$  а. е. на начало суток 20.08.1991 г.

Еще необходимо учесть, что протонная вспышка произошла несколько западнее рассматриваемой петлевой структуры (но в области с той же магнитной полярностью, что и правая часть петли), возможно, частицам понадобилось какое-то время на корональную диффузию до начала левой части магнитной петли. Поэтому время движения протонов в межпланетном пространстве до КА может быть несколько меньше, чем 21 ч.

Следовательно, рассчитанные величины: путь протонов до Земли (4,9 а. е.), полная длина петли (6 а. е.) и ее максимальное удаление от Солнца на начало суток 20.08.1991 г. (2,5 а. е.) — являются их верхними пределами.

Итак, в работе показано, что, не имея подробных данных о параметрах межпланетной среды, измеренных на различных гелиоцентрических расстояниях, по результатам измерения интенсивности потоков протонов в различных энергетических диапазонах в пределах кинетических энергий  $1 \div 20$  МэВ и их анизотропии, которые пришли в окрестность КА от слабой вспышки, можно получить представление о крупномасштабной структуре межпланетной среды. Небольшие потоки протонов, идущие от Солнца через межпланетное пространство, как бы тестируют межпланетную среду, не изменяя ее структуры.

#### Литература

1. Чучков Е.А., Ермаков С.И., Кадобнов В.Б. и др. // Письма в Астрон. журн. 1991. 17, № 2. С. 135.
2. Любимов Г.П., Чучков Е.А. // Космич. исслед. 1991. 29, № 6. С. 910.
3. Алексеев Н.В., Вакулов П.В., Логачев Ю.И. и др. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1977. 41, № 9. С. 1827.
4. Шабанский В.П., Шустер А.Р. // Матер. 5-го Ленингр. междунар. семин. «Солнечные космические лучи и их проникновение в магнитосферу Земли». Л., 1973. С. 241.
5. Kunstmann J.E., Alpers W. // Astrophys. J. 1977. 211, No. 2, Pt. 1. P. 587.

Поступила в редакцию  
30.06.99

УДК 521.13

## ПРИМЕНЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО МЕТОДА ВЫЧИСЛЕНИЙ ВОЗМУЩАЮЩЕЙ ФУНКЦИИ В ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ МАЛЫХ ПЛАНЕТ

И. А. Герасимов, В. В. Чазов, Д. А. Тагасва

(ГАИШ)

Получено второе приближение для теории движения тел Солнечной системы, основанной на универсальном методе вычисления возмущенной функции. Представлены результаты обработки 30-летних рядов фотографических наблюдений избранных малых планет.

### Введение

В нашей работе [1] был предложен новый метод вычисления возмущающей функции в задаче о движении небесных тел Солнечной системы. Уравнения движения каждой из планет рассматривались в гелиоцентрической системе координат. В качестве малого параметра было выбрано отношение массы Юпитера к массе Солнца. Получено аналитическое решение первого порядка относительно этого параметра: для каждой большой планеты Солнечной системы вычислены функция преобразования и эволюционный гамильтониан, представляющие собой суммы элементарных тригонометрических выражений. Функция преобразования необходима для учета короткопериодических членов, а эволюционный гамильтониан используется при численном интегрировании системы осредненных уравнений движения.

В настоящей статье представлены алгоритм вто-

рого приближения и результаты обработки 30-летних рядов фотографических наблюдений избранных малых планет.

### 1. Алгоритм второго приближения

Во втором приближении для каждой из планет найдем функцию преобразования  $S_{12}$  и добавку к новому гамильтониану  $F_{12}^*$  ( $i = \overline{1, 9}$ ). Функции  $S_{12}$  и  $F_{12}^*$  в нашем решении имеют второй порядок малости относительно возмущающих масс.

Следуя методу канонических преобразований [2], выполним интегрирование:

$$S_{12} = \int (F_{12} - F_{12}^*) dt,$$

$$F_{12} = \frac{1}{2} \{F_{i1} + F_{i1}^*, S_{i1}\} + \sum_{j \neq i} \{F_{i1}, S_{j1}\}, \quad (1)$$