

УДК 533.951.2

*К. И. Грингауз, В. В. Безруких, М. И. Веригин,  
Г. А. Котова*

**НАБЛЮДЕНИЯ РЕКУРРЕНТНЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ  
ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ФАЗЕ СПАДА 21-ГО ЦИКЛА  
СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ ШИРОКОУГОЛЬНОГО  
ЭНЕРГОСПЕКТРОМЕТРА ИОНОВ НА СПУТНИКЕ  
«ПРОГНОЗ-9»**

Измерения солнечного ветра на спутнике «Прогноз-9» с помощью широкоугольного энергоспектрометра ионов Д-137А были проведены с июля 1983 г. по февраль 1984 г. на фазе спада 21-го цикла солнечной активности. В этот период времени в солнечном ветре наблюдались устойчивые на протяжении 5–6 оборотов Солнца высокоскоростные потоки. Величина скорости в некоторых из них достигала  $700 \div 800$  км/с. Сравнение данных «Прогноза-9» с данными аналогичных измерений, полученными в предыдущем солнечном цикле, позволяет сделать вывод о том, что наличие рекуррентных высокоскоростных потоков на фазах спада 11-летних циклов солнечной активности закономерно и является одним из проявлений этих циклов.

Со времени начала систематических прямых измерений солнечного ветра в 1964 г. долгопериодические изменения его параметров на протяжении большей части 20-го 11-летнего цикла солнечной активности были на удивление малыми вплоть до 1972 г., несмотря на то, что в 1968–1970 гг. наблюдался максимум этого цикла. Только с появлением крупных устойчивых высокоскоростных потоков солнечного ветра в 1973–1976 гг. стало ясно, что свойства солнечного ветра подвержены и долгопериодическим изменениям [1–3].

Однако предыдущий 20-й цикл солнечной активности был во многих отношениях уникальным. Например, в отличие от других солнечных циклов на протяжении последнего столетия геомагнитная активность во время этого цикла продолжала возрастать на большей части фазы спада солнечной активности (~6 лет), тогда как обычно через 2–3 года после максимума числа пятен на Солнце геомагнитная активность спадает [4, 5].

Эта особенность 20-го цикла, а также известные отличия четных циклов солнечной активности от нечетных (22-летний цикл), вызывают особый интерес к проведению систематических измерений солнечного ветра в 21-м цикле солнечной активности. В частности, представляет интерес проверить прогноз, сделанный в работе [6], о возобновлении стабильных высокоскоростных потоков в солнечном ветре не позднее конца 1983 г. Разумеется также, что и выводы о существовании 11-летней периодичности свойств солнечного ветра, сделанные ранее по измерениям его параметров на протяжении только одного 20-го цикла не могут быть вполне убедительными без их подтверждения или опровержения на основе измерений в последующих циклах.

Измерения солнечного ветра на спутнике «Прогноз-9», проведенные в период с июля 1983 г. по февраль 1984 г. на фазе спада 21-го цикла сол-

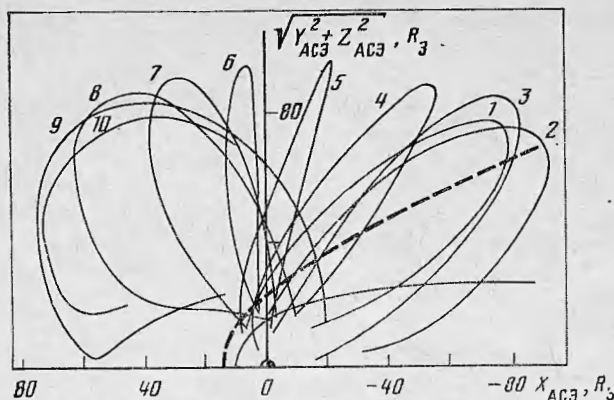


Рис. 1. Траектория спутника «Прогноз-9». Цифрами указаны порядковые номера витков

нечной активности, предоставляет одну из возможностей для проверки надежности выводов о долгопериодических вариациях свойств солнечного ветра, сделанных на основе предшествующих экспериментов.

**1. Описание эксперимента.** Основной задачей комплекса экспериментов, проводившихся на спутнике «Прогноз-9», было исследование реликтового излучения. Кроме основного эксперимента на этом же спутнике размещался ограниченный набор приборов, предназначенных для продолжения систематических измерений солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и солнечных космических лучей.

Искусственный спутник Земли «Прогноз-9» был выведен 1.VII 1983 г. на необычно высокую для спутников этой серии орбиту. В начальный период работы высота перигея составляла  $1,93R_z$ , высота апогея —  $111,9R_z$  ( $R_z$  — радиус Земли), наклонение  $65^\circ,3$  и период обращения 25,64 сут. На рис. 1 показана траектория «Прогноза-9» за весь период активной работы спутника в солнечно-эклиптической системе координат (АСЭ), повернутой вокруг оси  $Z_{ACZ}$  на угол  $4^\circ$  для учета абберации солнечного ветра из-за орбитального движения Земли. Положения магнитопаузы и околоземной ударной волны согласно эмпирической модели, предложенной в работе [7], показаны на этом рисунке соответственно сплошной и штриховой линиями. Как можно видеть из рис. 1, начиная с 4-го витка, «Прогноз-9» практически непрерывно мог находиться в солнечном ветре. Следует отметить, что и на первых трех витках сведения о крупномасштабных структурах в солнечном ветре можно получить для значительной части орбиты, поскольку при больших удалениях от Земли ( $X_{ACZ} < -40R_z$ ) околоземная ударная волна слабая и параметры плазмы в переходной области близки к соответствующим параметрам в солнечном ветре.

Измерения ионного компонента плазмы на спутнике «Прогноз-9» проводились модуляционным методом при помощи энергоспектрометра Д-137А. Как и предыдущие спутники этой серии, «Прогноз-9» стабилизировался вращением с угловой скоростью  $\sim 3$  град/с относительно оси, совпадающей с точностью  $\sim 5^\circ$  с направлением на Солнце. Чувствительным элементом энергоспектрометра являлся широкоугольный модуляционный датчик (цилиндр Фарадея) ПЛ-51. Ось датчика ПЛ-51 была ориентирована параллельно оси вращения спутника.

Отличием модуляционного датчика ПЛ-51 от аналогичных датчиков ПЛ-18, неоднократно применявшихся ранее для измерений ионного компонента солнечного ветра на спутниках Марса, Венеры и Земли [8–10], является использование в нем управляющих сеток сферической формы. Такие сетки уменьшают неоднозначность определения скорости солнечного ветра, вызванную отличием направления его прихода от нормали к апертуре, и практически устраняют паразитную модуляцию переменным

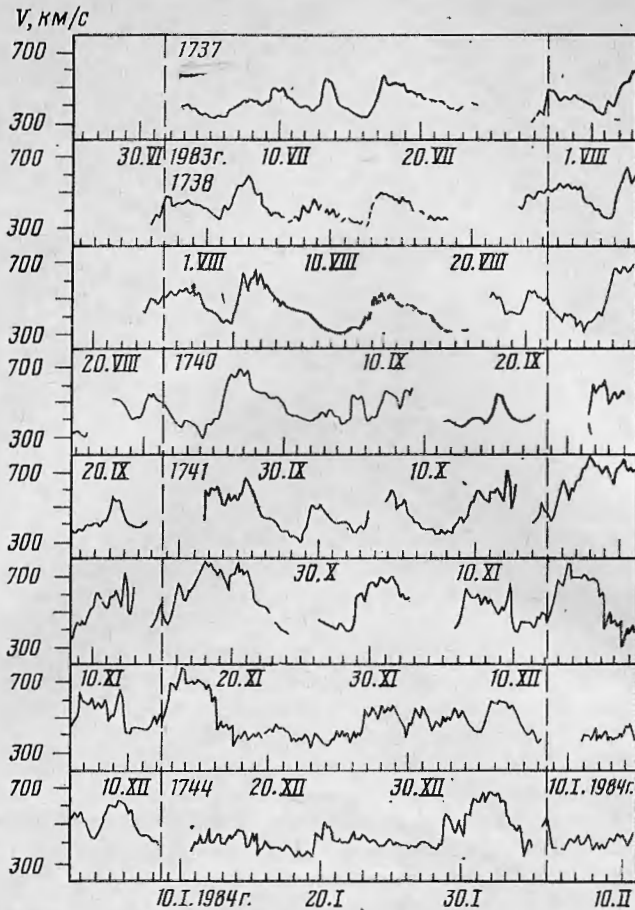


Рис. 2. Скорость солнечного ветра, полученная по данным спутника «Прогноз-9» в июле 1983 г. – феврале 1984 г. Измерения, проведенные в удаленных от Земли частях переходной области показаны прерывистой линией

электрическим полем потока энергичных ионов, проходящих через управляющие сетки. Эффективная площадь датчика ПЛ-51 составляла  $7,2 \text{ см}^2$ , ширина угловой диаграммы направленности  $\pm 40^\circ$ .

Измерения дифференциальных энергетических спектров ионного компонента солнечного ветра при помощи энергоспектрометра Д-137А осуществлялись в 16 энергетических интервалах в диапазоне напряжений на анализирующих сетках  $0 \div 4400 \text{ В}$ .

Таким образом, с учетом кривизны этих сеток было возможно определение переносных скоростей протонов до  $\sim 900 \text{ км/с}$ . На измерение каждого энергетического спектра требовалось  $\sim 164 \text{ с}$ .

По энергетическим спектрам протонов, измеренным в интервалы времени, когда «Прогноз-9» находился в солнечном ветре, определялась их переносная скорость, концентрация и температура путем сравнения каждого измеренного спектра с рассчитанными для максвелловского распределения при известных значениях этих параметров с учетом угловых и энергетических характеристик датчика ПЛ-51. С рассчитанными спектрами сравнивались измерения ионного потока только в трех энергетических интервалах в окрестности энергетического интервала, в котором был зарегистрирован наибольший поток ионов.

Более подробно энергоспектрометр Д-137А, модуляционный датчик ПЛ-51 и использовавшийся способ определения параметров солнечного ветра описаны в работе [11].

**2. Крупномасштабная структура солнечного ветра в период измерений.** На рис. 2 приведены значения переносной скорости протонов солнечного ветра  $V$ , усредненные по трехчасовым интервалам времени по данным широкоугольного энергоспектрометра Д-137А. На этом рисунке собраны результаты измерений  $v$  за весь период работы спутника «Прогноз-9» — с июля 1983 г. по февраль 1984 г. Для выявления рекуррентных событий непрерывный ряд экспериментальных данных разделен на 27, 28-дневные интервалы времени, соответствующие кэррингтоновским оборотам Солнца с 1737 по 1744, границы которых показаны на рисунке вертикальными пунктирными линиями.

Как можно видеть из рис. 2, в период работы спутника «Прогноз-9» в солнечном ветре существовало по крайней мере три группы высокоскоростных потоков, которые можно было наблюдать на протяжении  $\sim 6$  оборотов Солнца. В одной из этих групп, наблюдавшейся в 1–9 сутки от начала кэррингтоновских оборотов, скорость солнечного ветра достигала  $v_m \approx 700 \div 800$  км/с.

Для описания особенностей структуры высокоскоростных потоков в июле 1983 г. — феврале 1984 г. и для обеспечения сопоставимости наших данных с аналогичными измерениями на других космических аппаратах удобно воспользоваться предложенными в работе [1] формальными критериями для определения числа высокоскоростных потоков, а также их продолжительности и амплитуды. Вслед за авторами этой работы мы считали поток солнечного ветра высокоскоростным, если его скорость возрастает на 150 км/с в течение не более, чем 5 сут. Если при этом  $v_0$  — скорость в начале потока, с которой начинается возрастание,  $v_m$  — максимальная достигаемая скорость, то  $A = (v_m - v_0)$  — амплитуда потока, а продолжительностью потока  $T$  является время, в течение которого скорость остается выше  $(v_m + v_0)/2$ . В таблице приведены даты начала, а также параметры всех высокоскоростных потоков, наблюдавшихся на «Прогнозе-9». За период работы спутника в солнечном ветре наблюдалось 27 высокоскоростных потоков, из них 5 — с амплитудой  $\geq 350$  км/с, 3 — с  $v_m \geq 700$  км/с и 8 — с продолжительностью  $\geq 4$  сут. Приведенные к интервалу времени 1 год эти характеристики будут равны соответственно  $\sim 45$ ,  $\sim 8,5$  и  $\sim 13,5$ . Средняя максимальная скорость, амплитуда и продолжительность для высокоскоростных потоков, зарегистрированных на спутнике «Прогноз-9» были равны соответственно  $\sim 600$ ,  $\sim 255$  км/с и  $\sim 3$  сут.

На рис. 3 проведено сравнение вышеперечисленных характеристик высокоскоростных потоков, наблюдавшихся на «Прогнозе-9» (звездочки), с данными о высокоскоростных потоках в предыдущем цикле солнечной

**Характеристики высокоскоростных потоков, наблюдавшихся на спутнике «Прогноз-9»**

Дата начала потока	$v_0$ , км/с	$v_m$ , км/с	$A$ , км/с	$T$ , сут	Дата начала потока	$v_0$ , км/с	$v_m$ , км/с	$A$ , км/с	$T$ , сут
6.VII.1983 г.	325	500	175	4	(20.X)	(330)	690	(360)	4
12.VII	360	560	200	0,9	28.X	295	505	210	2,75
15.VII	320	570	250	3,75	1.XI	350	600	250	1,5
1.VIII	345	600	255	2	8.XI	335	725	390	(3)
12.VIII	320	520	200	2,9	13.XI	405	785	380	5,75
(22.VIII)	(320)	555	(235)	(4)	28.XI	380	680	300	(4)
29.VIII	345	655	310	2,75	5.XII	(380)	640	260	3,4
6.IX	280	515	235	4,1	10.XII	370	775	405	3,75
(16.IX)	(300)	530	230	(2)	24.XII	350	565	215	3
19.IX	390	570	180	1,25	29.XII	395	555	160	4,25
23.IX	275	675	400	4,75	4.I.1984 г.	400	610	210	2,1
4.X	365	530	165	1	18.I	310	495	185	1,6
6.X	370	575	205	2,4	27.I	360	670	310	2,75
12.X	345	540	195	1					

*Примечание.* В скобках приведены приблизительно определенные значения.



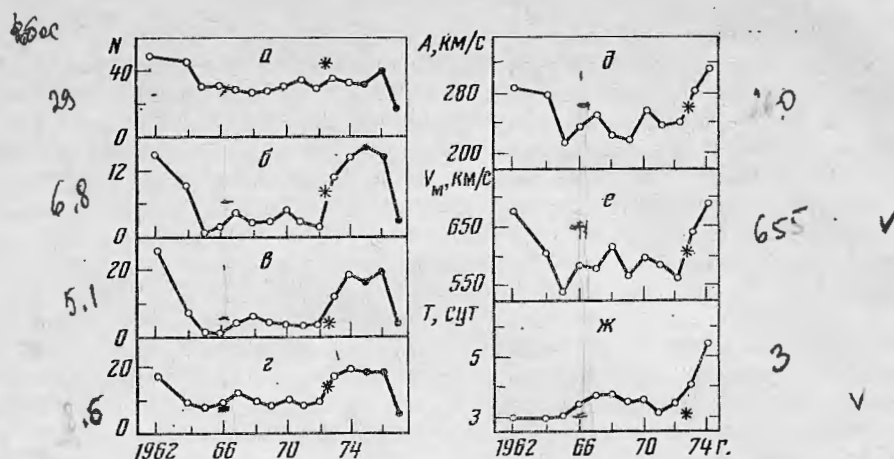


Рис. 3. Годовые средние характеристики высокоскоростных потоков *a* — полное число наблюдавшихся потоков; *б* — число потоков с амплитудой  $\geq 350$  км/с; *в* — число потоков с максимальной скоростью  $\geq 700$  км/с; *г* — число потоков с продолжительностью  $\geq 4$  сут; *д* — амплитуда наблюдавшихся потоков; *е* — максимальная скорость; *ж* — продолжительность на уровне полуамплитуды

активности, взятыми из работы [1] (светлые кружки) и дополненными на основе измерений солнечного ветра на космических аппаратах «Гелиос-1, -2» [6] (темные кружки). Результаты измерений на спутнике «Прогноз-9» нанесены на этом рисунке со сдвигом по времени на 11 лет для того, чтобы сопоставлять характеристики высокоскоростных потоков в соответствующих фазах цикла солнечной активности. Как можно видеть из рис. 3, в целом потоковая активность и характеристики высокоскоростных потоков в конце 1983—начале 1984 г. близки к соответствующим величинам в предыдущем цикле солнечной активности.

Обращает на себя внимание высокая степень рекуррентности высокоскоростных потоков солнечного ветра, наблюдавшихся на спутнике «Прогноз-9» на фазе спада текущего 21-го цикла солнечной активности (рис. 2). На других фазах цикла высокоскоростные потоки менее регулярны и существенно изменяются за время 1—2 оборотов Солнца. Ранее стабильные высокоскоростные потоки наблюдались в 1973—1976 гг. на фазе спада предыдущего 20-го цикла солнечной активности. Их возобновление ожидалось не позднее конца 1983 г. [6]. Соответствие прогнозов с фактом регистрации рекуррентных высокоскоростных потоков на спутнике «Прогноз-9» свидетельствует в пользу того, что их наличие на фазах спада 11-летних циклов солнечной активности закономерно и является одним из проявлений этих циклов.

Хотя в отдельных высокоскоростных потоках, наблюдавшихся на «Прогнозе-9», скорость плазмы достигала  $700\div 800$  км/с, однако их сравнение с рекуррентными высокоскоростными потоками, наблюдавшимися на фазе спада предыдущего цикла в 1973—1974 гг. [12] показывает, что в то время наблюдались более мощные и продолжительные высокоскоростные потоки. Возможно, отмеченное отличие связано с тем, что время измерения солнечного ветра на «Прогнозе-9» попадает по фазе на начало формирования стабильных рекуррентных потоков в солнечном ветре (см. рис. 3).

Проведенное в следующей работе [14] сопоставление распределения высокоскоростных потоков в пределах отдельных солнечных оборотов по данным спутника «Прогноз-9» с крупномасштабной структурой межпланетного токового слоя позволяет сделать вывод, что для рассматриваемого интервала времени характерна 4-секторная структура межпланетно-

го магнитного поля (ММП) в плоскости эклиптики, и что в соответствии с этой структурой на протяжении солнечного оборота, как правило, могут быть выделены 4 рекуррентных высокоскоростных потока солнечного ветра. Во время же наблюдения мощных рекуррентных потоков солнечного ветра в 1973—1974 гг. на фазе спада предыдущего цикла солнечной активности структура ММП в плоскости эклиптики была 2-секторной и соответственно за один оборот Солнца наблюдалось только 2 потока. Следствием 4-секторной структуры в конце 1983 г.— начале 1984 г., по-видимому, и является меньшая, чем в соответствующей фазе предыдущего цикла солнечной активности полуширина высокоскоростных потоков.

Следует отметить, что на фазах спада обоих солнечных циклов наблюдались участки с 2-секторной и 4-секторной структурой межпланетного магнитного поля. Так, в 1971—1972 гг. на фазе спада 20-го цикла в плоскости эклиптики наблюдалось 4 сектора ММП. На протяжении 1982 г. на фазе спада 21-го цикла до начала измерений солнечного ветра на «Прогнозе-9» структура ММП в плоскости эклиптики была 2-секторной [15], и практически сразу же после окончания в плоскости эклиптики вновь стало наблюдаться 2 сектора ММП [16]. Измерения межпланетного магнитного поля при помощи магнитометра Misha на космических аппаратах «Вега-1, -2» показывает, что и в первой половине 1985 г. структура межпланетного магнитного поля в плоскости эклиптики продолжала оставаться 2-секторной.

### Заключение

Измерения солнечного ветра, проведенные на спутнике «Прогноз-9» при помощи широкоугольного энергоспектрометра Д-137А, пришлось на фазу спада 21-го цикла солнечной активности. Этот еще не закончившийся цикл является всего вторым полным циклом солнечной активности со времени начала в 1959 г. прямых измерений солнечного ветра [13].

В настоящее время еще не проведена взаимная калибровка результатов измерения параметров солнечного ветра на «Прогнозе-9» и IMP-8, позволяющая включить полученные на «Прогнозе-9» данные в систему других данных о солнечном ветре. Поэтому в этой и в следующей работе [14] используются только результаты измерения скорости солнечного ветра как наиболее надежно определяемого параметра; содержащиеся в них выводы могут быть в дальнейшем уточнены.

С точки зрения исследования 11-летней периодичности весьма непродолжительные измерения солнечного ветра на «Прогнозе-9» (8 мес.) после проведения интеркалибровок позволят получить только одно полугодичное среднее значение параметров солнечного ветра. Однако измерения солнечного ветра на этом спутнике были практически непрерывны (в отличие от весьма прерывистых измерений на спутнике IMP-8), и полученная информация о структуре высокоскоростных потоков является достаточно полной.

Суммируя приведенные выше результаты измерений солнечного ветра на спутнике «Прогноз-9» в период с июля 1983 г. по февраль 1984 г. на фазе спада 21-го цикла солнечной активности, можно заключить, что: в солнечном ветре в рассматриваемый интервал времени наблюдались рекуррентные высокоскоростные потоки; эти потоки были устойчивы на протяжении 5—6 оборотов Солнца; как правило, за солнечный оборот наблюдалось 4 высокоскоростных потока в соответствии с 4-секторной структурой межпланетного магнитного поля в плоскости эклиптики; величина скорости в некоторых из этих потоков достигала 700—800 км/с.

Таким образом, наблюдения солнечного ветра на спутнике «Прогноз-9» позволяют сделать вывод о возобновлении регулярной структуры высокоскоростных потоков в солнечном ветре на фазе спада 21-го цикла солнечной активности в соответствии с прогнозом работы [6], сделанным на основе измерений солнечного ветра в предыдущем цикле. Это свидетельст-

вует, что наличие рекуррентных высокоскоростных потоков на фазах спада 11-летних солнечных циклов закономерно и является одним из проявлений таких циклов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bame S. J., Asbridge J. R. et al. Solar cycle evolution of high-speed solar wind streams.— *Astrophys. J.*, 1976, v. 207, № 3, part 1, p. 977.
2. Gosling J. T., Asbridge J. R. et al. Solar wind speed variations: 1962–1974.— *J. Geophys. Res.*, 1976, v. 81, № 28, p. 5061.
3. Feldman W. C., Asbridge J. R. et al. Long-term solar wind electron variations between 1971 and 1978.— *J. Geophys. Res.*, 1979, v. 84, № A12, p. 7371.
4. Svalgaard L. Geomagnetic activity: Dependence on the solar wind parameters.— In: *Coronal holes and high speed solar wind streams*/Ed. by Zirker J. B. Colorado Associated University Press, Boulder, 1977, p. 371.
5. Gosling J. T., Asbridge J. R., Bame S. J. An unusual aspect of solar wind variations during solar cycle 20.— *J. Geophys. Res.*, 1977, v. 82, № 22, p. 3311.
6. Schwenn R. The «average» solar wind in the inner heliosphere: structures and slow variations.— In: *Solar five*/Ed. by Neugebauer M., NASA, CP-2280, 1980, p. 489.
7. Howe H. C., Jr., Binsack J. H. Explorer 33 and 35 plasma observations of magnetosheath flow.— *J. Geophys. Res.*, 1972, v. 77, № 19, p. 3334.
8. Грингауз К. И., Безруких В. В. и др. Исследование солнечной плазмы вблизи Марса и на трассе Земля – Марс при помощи ловушек заряженных частиц на советских космических аппаратах 1971–1973 гг. I. Методы и приборы.— *Космич. исслед.*, 1974, т. 12, № 3, с. 430.
9. Gringauz K. I., Bezrukhikh V. V. et al. Plasma observations near Venus onboard the Venera-9 and -10 satellites by means of wideangle plasma detectors.— In: *Physics of solar planetary environments*/Ed. by Williams D. J., AGU, Boulder, Colorado, 1976, p. 918.
10. Bezrukhikh V. V., Breus T. K. et al. Dependence of magnetopause and bow shock positions on solar wind parameters and magnetopause plasma structure.— *Space Research*, 1976, v. 16, p. 657.
11. Крисилов Ю. Д., Безруких В. В. и др. Широкоугольный энергоспектрометр заряженных частиц для исследования солнечного ветра на спутнике «Прогноз-9».— В кн.: *Научная аппаратура для космических исследований*. М.: Наука, 1986.
12. *Interplanetary medium data book*/Ed. by King J. H., NASA-GSPC, Greenbelt, Maryland, 1977.
13. Грингауз К. И., Безруких В. В. и др. Изучение межпланетного ионизированного газа, энергичных электронов и корпускулярного излучения Солнца при помощи трехэлектродных ловушек заряженных частиц на второй советской космической ракете.— *Докл. АН СССР*, 1960, т. 131, № 6, с. 1301.
14. Котова Г. А., Грингауз К. И., Безруких В. В. и др. Зависимость скорости солнечного ветра от расстояния до гелиосферного токового слоя по данным спутника «Прогноз-9».— *Космич. исслед.*, 1986, наст. выпуск.
15. Hoeksema J. T. Structure and evolution of large scale solar and heliospheric magnetic fields.— Ph. D. Dissertation, CSSA-Astro-84-07, Stanford, California, 1984.
16. *Solar Geophysical Data*, 1985, № 488, part 1.

Поступила в редакцию  
10.XI.1985