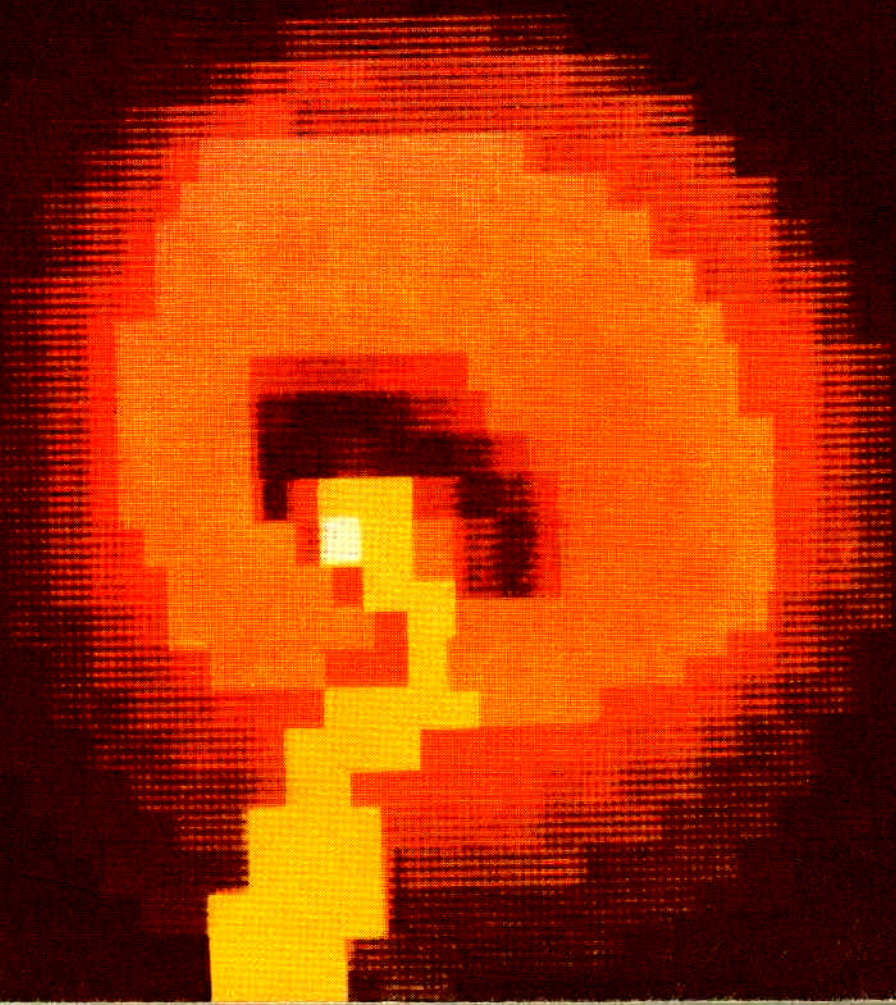


НАУЧНАЯ  
АППАРАТУРА  
для  
КОСМИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ



АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ



# НАУЧНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ответственный редактор  
В.М. БАЛЕБАНОВ



МОСКВА "НАУКА"  
1987

**Научная аппаратура для космических исследований.** М.: Наука, 1987. 185. с.

В сборнике рассмотрены основные принципы создания научной аппаратуры для космических исследований в области физики плазмы, планетных атмосфер, астрофизики, разработанной ИКИ АН СССР совместно с кооперацией других институтов АН СССР и ведомственными организациями. Описаны новые или усовершенствованные методы решения актуальных проблем научного космического приборостроения при подготовке текущих и перспективных программ исследований.

Сборник рассчитан на научных и инженерно-технических работников, а также студентов и аспирантов.

**Редколлегия:**

*В.М. Балебанов* (председатель), *Р.А. Сюняев*,  
*И.А. Струков*, *К.И. Грингауз*, *Э.В. Воронцова*,  
*Т.К. Бреус* (отв. секретарь)

## **НАУЧНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

*Утверждено к печати ордена Ленина Институтом  
космических исследований Академии наук СССР*

Редактор издательства *Е.В. Попова*  
Художественный редактор *М.Л. Храмцов*  
Технический редактор *Г.И. Астахова*  
Корректор *Р.Г. Ухина*

Набор выполнен в издательстве на наборно-печатающих автоматах

ИБ № 35239

Подписано к печати 02.06.87. Т – 15521. Формат 60 X 90 1/16  
Бумага офсетная № 1. Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная  
Усл.печл. 11,5. Усл.кр.-отт. 11,9. Уч.-изд.л. 12,9. Тираж 1150 экз.  
Тип. зак. 2687 Цена 2 р. 60 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Наука"  
117864 ГСП-7, Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90  
Типография № 9 Союзполиграфпрома, Москва, Волочаевская ул., д. 40

3607000000-274

И 314-87-III  
042 (02) -87

© Издательство "Наука", 1987 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании основных результатов волноводной теории вибраторных антенн с помощью ЭВМ проведен анализ и получены численные значения электрических характеристик уголкового цилиндрической вибраторной антенны в зависимости от радиуса ветвей, угла наклона между ними и расстояния между точками подключения питания. Результаты могут применяться при проектировании ионосферных станций, предназначенных для исследования ионосферы Марса, Венеры, а также плазмосферы Земли.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колосов М.А., Яковлев О.И., Круглов Ю.М. и др. О радиопросвечивании атмосферы Марса при помощи аппарата "Марс-2" // Радиотехника и электроника, 1972. Т. 17. вып. 12. С. 2483–2490.
2. Florida C.D. The development of series ionospheric satellites // Proc. IEEE. 1969. Vol. 57, № 6. P. 876–875.
3. Мигулин В.В., Васильев Г.В., Гончаров Л.Г. и др. Спутникова система импульсного зондирования ионосферы ИС-338 // Исследование космической плазмы: II научная конф. ИЗМИРАН, 1979. М., 1980. С. 58–65.
4. Шамеева Н.И. К теории Y-образной уголкового антенны. Радиоэлектронные устройства // Тр. РРТИ. 1975. Вып. 68. С. 84–89.
5. Шелкунов С., Фриис Г. Антенны: Теория и практика. М.: Сов. радио. 1955. 500 с.

УДК 523.62–726 : 520.662.07

*Ю.Д. Крисилов, В.В. Безруких, М.Н. Бойчук, Ю.И. Венедиктов,  
М.И. Веригин, Г.И. Волков, К.И. Грингауз, Л.И. Денщикова,  
С.Л. Емельянов, Г.А. Котова, Ю.Е. Собченко, В.И. Старцев*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПРИ ПОМОЩИ ШИРОКОУГОЛЬНОГО ЭНЕРГОСПЕКТРОМЕТРА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА СПУТНИКЕ "ПРОГНОЗ-9"

### ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей комплекса экспериментов, проведенных на спутнике "Прогноз-9", являлось исследование реликтового излучения. В дополнение к основному эксперименту на этом же спутнике был размещен ограниченный набор приборов, предназначенных для продолжения систематических измерений солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и солнечных космических лучей.

Опыт измерений ионной компоненты солнечного ветра, проведенных на советских и зарубежных космических аппаратах при помощи широкоугольных энергоанализаторов модуляционного типа [1–5], показал, что такие приборы, весьма экономные с точки зрения потребляемой мощности и количества передаваемой информации, позволяют надежно определять основные параметры солнечного ветра – его скорость, концентрацию и температуру протонов. Поэтому для решения ограниченной задачи обеспечения систематических измерений солнечного ветра на спутнике "Прог-

ноз-9" был установлен энергоанализатор ионов модуляционного типа Д-137А. В настоящей статье будут описаны упомянутый широкоугольный энергоспектрометр и подход к выбору его основных параметров.

## 1. СОСТАВ И ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ПРИБОРА

Энергоспектрометр ионов Д-137А состоит из трех блоков: широкоугольного модуляционного датчика ПЛ-51, коллекторный ток  $I_k$  которого преобразуется измерительным преобразователем в телеметрируемое напряжение  $U_{\text{вых}}$ , и формирователя анализирующих напряжений  $U_{\sim}, U_{\sim}$ . Упрощенная структурная схема энергоспектрометра приведена на рис. 1; датчик и элементы измерительного преобразователя на схеме расположены в верхнем ряду.

а) Модуляционный датчик ПЛ-51. Схема и основные геометрические размеры модуляционного датчика ПЛ-51 приведены на рис. 2. Поток ионов солнечного ветра, пройдя апертуру (1) радиуса  $R = 30$  мм и экранирующую сетку (2), модулируется переменным электрическим полем в промежутке между этой и двойной управляющей сеткой (3) и в дальнейшем через систему экранирующих (4) и супрессорных (5) сеток достигает коллектора (6). Суммарная прозрачность сеток датчика 0,254 определяет его эффективную площадь  $S_{\text{эфф}} = 7,2 \text{ см}^2$ . На супрессорную сетку и коллектор подаются отрицательные напряжения  $-70$  и  $-20$  В для уменьшения фотоэмиссии с коллектора и увеличения коэффициента преобразования потока ионов в коллекторный ток  $I_k$ . Существенным отличием модуляционного датчика ПЛ-51 от аналогичных датчиков, применявшихся ранее для измерений ионной компоненты солнечного ветра, является использование в нем управляющих сеток (3) сферической формы. Такие сетки уменьшают неопределенность определения скорости солнечного ветра (вследствие различного направления его прихода от нормали к апертуре) и практически устраняют паразитную модуляцию переменным электри-

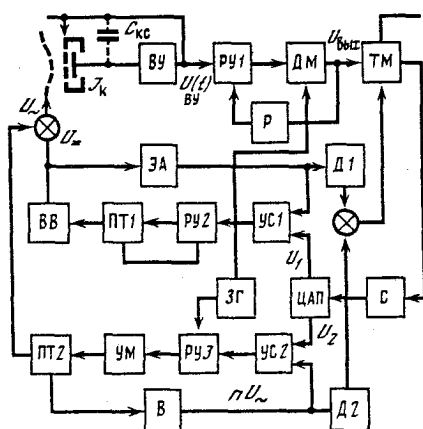


Рис. 1. Структурная схема энергоспектрометра ионов Д-137А

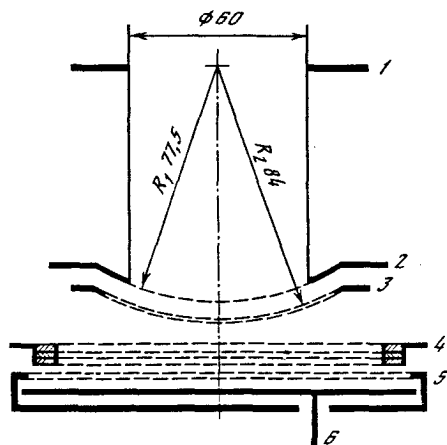


Рис. 2. Схема и основные геометрические размеры широкоугольного модуляционного датчика ПЛ-51

$i$	$U_{=}, \text{В}$	$U_{\sim}, \text{В}$	$i$	$U_{=}, \text{В}$	$U_{\sim}, \text{В}$
1	20	20	9	965	105
2	70	30	10	1200	130
3	150	50	11	1500	170
4	275	75	12	1875	205
5	395	45	13	2340	260
6	495	55	14	2900	300
7	620	70	15	3500	300
8	775	85	16	4100	300

ческим полем потока энергичных ионов, проходящих через управляющие сетки.

б) **Формирователь анализирующих напряжений.** Формирователь анализирующих напряжений размещен в гермоотсеке и служит для обеспечения ступенчатого сканирования потока ионов по энергиям в 16 примыкающих энергетических интервалах  $i = 1,16$ . Сканирование по энергиям осуществляется путем подачи на управляющие сетки (3) постоянного напряжения  $U_{=}$ , принимающего 16 значений, и переменного напряжения  $U_{\sim}$  формы меандра. Значения  $U_{=}$  и амплитуды  $U_{\sim}$  приведены в таблице.

Постоянное напряжение  $U_{=}$  генерируется в замкнутой системе, состоящей из эталонного аттенюатора ЭА, высоковольтного выпрямителя ВВ, повышающего трансформатора ПТ1, регулируемого усилителя РУ2 и устройства сравнения УС1 (см. рис. 1). Управляющий сигнал  $U_1$  изменяется при воздействии телеметрического синхроимпульса на счетчик С и цифро-аналоговый преобразователь ЦАП. Напряжение  $U_{\sim}$  получается в результате прохождения импульсного напряжения  $U_T$  задающего генератора ЗГ через замкнутую систему, содержащую широкополосный повышающий трансформатор ПТ2, усилитель мощности УМ, регулируемый усилитель РУ3, устройство сравнения УС2 и выпрямитель В. Эта система управляется сигналом  $U_2$ .

Для индикации анализирующих напряжений и восстановления номера энергетического интервала  $i$  в случае сбоя синхронизации сигналы, пропорциональные величинам  $U_{=}$  и  $U_{\sim}$ , через делители напряжения Д1, Д2 поступают на сумматор и передаются на Землю по одному телеметрическому ТМ-каналу. Погрешность задания нижних и верхних ( $U_{\text{Н}}^i = U_{=}^i - U_{\sim}^i$ ,  $U_{\text{В}}^i = U_{=}^i + U_{\sim}^i$ ) значений анализирующих напряжений для каждого энергетического интервала  $i = 1,16$  не превосходит  $\pm 0,01 U_{\text{Н,В}}^i \pm 1,5 \text{ В}$  при изменениях температуры от 0 до  $40^\circ \text{C}$  в диапазоне напряжений бортового источника питания 23–37 В. Время установления стационарных значений  $U_{=}$ ,  $U_{\sim}$  не более 50 мс; частота модулирующего переменного напряжения  $U_{\sim}$  установленного на спутнике "Прогноз-9" экземпляра прибора Д-137А составляла  $f_{\text{М}} = 0,92 \text{ кГц}$ .

Ступенчатое изменение напряжения на управляющих сетках (3) от  $U_{\text{Н}}^i$  до  $U_{\text{В}}^i$  приводит к ступенчатой модуляции величины проходящего через эти сетки потока ионов и коллекторного тока  $I_{\text{К}}$ . С учетом сферической формы управляющих сеток (см. рис. 2) падающий перпендикулярно апертуре датчика поток ионов с различной эффективностью будет модулирован частотой  $f_{\text{М}}$  в диапазоне энергий  $q U_{\text{Н}}^i \lesssim E \lesssim q U_{\text{В}}^i / (1 - R^2/R_2^2)$ ,

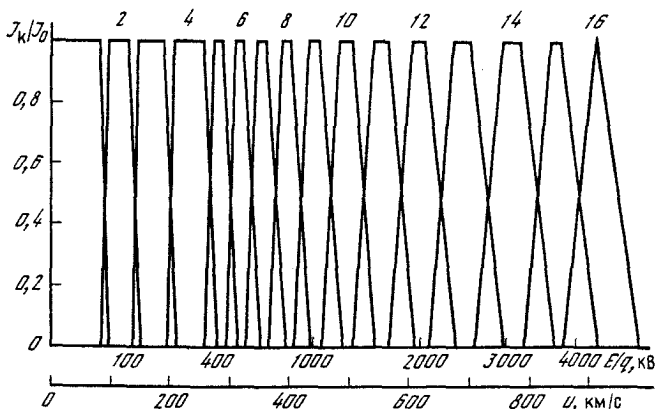


Рис. 3. Зависимость эффективности модуляции потока ионов от их энергии для 16 энергетических интервалов энергоспектрометра Д-137А

где  $q$  — заряд ионов. На рис. 3 показана эффективность модуляции потока ионов, направленного перпендикулярно апертуре датчика ПЛ-51, в зависимости от энергии ионов  $E$  для всех 16 энергетических интервалов, приведенных в таблице. Для протонов на этом рисунке приведены также значения их скорости  $V$  (общее выражение для эффективности модуляции потока ионов датчиком ПЛ-51 будет приведено ниже). Таким образом, как можно видеть из рис. 3, при выбранных номиналах  $U_{\sim}$  и  $U_{\sim}$  энергоанализатор ионов Д-137А обеспечивает измерения дифференциальных энергетических спектров ионов в диапазоне энергий  $0 \leq E/q \leq 5$  кВ.

в) **Измерительный преобразователь.** Коллекторный ток модуляционного датчика, имеющий форму меандра амплитуды  $I_K$ , поступает на входное устройство ВУ с измерительным резистором  $R_H = 0,1$  ГОм и повторителем напряжения (см. рис. 1). С выхода этого устройства двухполярные импульсы подаются на регулируемый усилитель РУ1, а затем преобразуются демодулятором ДМ в сигнал  $U_{\text{вых}}$ , поступающий на телеметрию ТМ. Регулятор  $P$  является элементом системы задержанной авторегулировки коэффициента преобразования. При  $U_{\text{вых}} \leq 1$  В он осуществляет масштабное преобразование  $U_{\text{вых}} = k_H I_K$ ; при  $U_{\text{вых}} \geq 1$  В коэффициент масштабного преобразования уменьшается по сравнению с начальным значением  $k_H = 10^{11} \text{ В/А}^{-1}$  и формируется нелинейная характеристика  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}(I_K) \approx 1,0 + 1,7 \lg(I_K/I) \text{ В}$ , где  $I = 10^{-11} \text{ А}$ .

Для того чтобы избежать потерь энергии из-за искажения импульсов  $I_K(t)$  в соединительном кабеле, блок измерительного преобразователя размещен в одном корпусе с ловушкой. Однако искажения возникают и из-за шунтирования этих импульсов емкостью  $c_K$  между коллектором и корпусом ловушки. Можно, например, показать, что при типичных значениях  $c_K = 10$  пФ форма импульсов  $U_{\text{в.у}}(t)$  будет близка к треугольной, а их энергия уменьшится на порядок по сравнению с неискажающим преобразованием  $U_{\text{в.у}}(t) \sim I_K(t)$ .

В описываемой аппаратуре улучшение передачи формы импульсов коллекторного тока достигается путем уменьшения эффективной вели-

чины  $c_k$  до 0,2–0,3 пФ. Для этого на супрессорную сетку (5), полностью охватывающую и экранирующую коллектор (6) (см. рис. 2), подается сигнал  $U_{в.у}$  (рис. 1). Емкость  $c_{кс}$  между коллектором и сеткой (5) оказывается включенной в петлю положительной обратной связи, компенсирующей искажения формы импульсов.

В результате принятых мер относительная погрешность определения  $I_k$  измерительным преобразователем с учетом дискретности телеметрии, наводок модулирующего напряжения и шумов аппаратуры не превышает  $\approx 10\%$  в диапазоне  $2 \cdot 10^{-12} \text{ А} \lesssim I_k \lesssim 5 \cdot 10^{-9} \text{ А}$ , что соответствует диапазону измеряемых потоков ионов  $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \lesssim F \lesssim 4,4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Приведенное к коллектору эффективное значение наводок и шумов измерительного преобразователя составляет около  $10^{-13} \text{ А}$ , что обеспечивает чувствительность энергоспектрометра к направленному потоку ионов  $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Время установления телеметрического сигнала  $U_{в.ых}$  при скачкообразном изменении  $I_k$  составляет  $\approx 0,5 \text{ с}$ .

## 2. ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭНЕРГОСПЕТРОМЕТРА

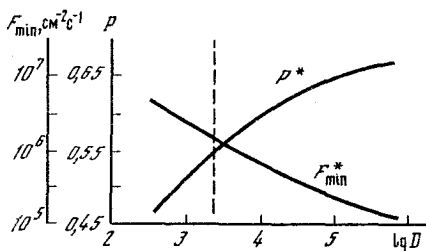
Оптимальный выбор характеристик прибора должен базироваться на некоторой целевой функции. Качество работы энергоспектрометра разумно характеризовать вероятностью достоверной оценки параметров плазмы солнечного ветра по результатам измерений одного энергетического спектра. В процессе моделирования эксперимента по методике, описанной в [6], исследовалась вероятность  $P$  того, что при измерениях в солнечном ветре не менее чем в трех энергетических интервалах для протонов и не менее чем в двух энергетических интервалах для ионов  $\text{He}^{++}$  (из числа приведенных в таблице) потоки ионов  $F$  не будут выходить за пределы динамического диапазона измерений  $F_{\min} \lesssim F \lesssim F_{\max}$ . При заданной величине диапазона измеряемых потоков  $D = F_{\max}/F_{\min}$  максимум вероятности информативных измерений  $P^*$  достигается при определенной величине  $F_{\min} = F_{\min}^*$ . На рис. 4 в соответствии с результатами моделирования показана зависимость оптимальных значений  $F_{\min}^*$  и достигаемых при этом значений  $P^*$  от динамического диапазона  $D$ .

Как можно видеть из рис. 4, величина динамического диапазона измерений потока ионов  $D$  существенно влияет на качество эксперимента. Факторами, ограничивающими динамический диапазон измерений, являются нестабильность параметров системы авторегулировки коэффициента преобразования  $U_{в.ых}/I_k$  и дискретность телеметрии. В измерительном преобразователе энергоспектрометра Д-137 использовано специальное устройство для стабилизации параметров системы авторегулировки и взаимной компенсации их отклонений [7]. Используя результаты анализа систем авторегулировки [8], в случае, когда шумы измерительного преобразователя достаточно малы, для динамического диапазона измерений ионного потока  $D$  можно получить следующее выражение:

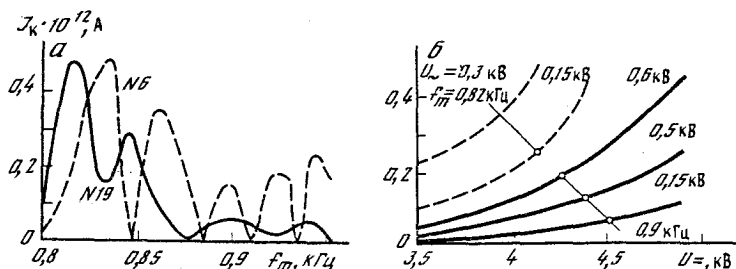
$$D \approx 4N^2(\delta I_k/I_k)^2, \quad (1)$$

где  $N$  – число уровней телеметрии, а  $\delta I_k/I_k$  – требуемая точность измерения коллекторного тока. Таким образом, при  $N = 2^8$  и  $\delta I_k/I_k \approx 0,1$  в опи-





Р и с. 4. Зависимость оптимальных значений  $F_{\min}^*$  и достигаемых при этом значений  $p^*$  от динамического диапазона прибора



Р и с. 5. Зависимость амплитуды фоновго коллекторного тока от частоты модулирующего напряжения для двух экземпляров датчика (а) и от величины постоянного напряжения  $U_ =$  для различных значений амплитуды модулирующего напряжения (б)

сываемой аппаратуре можно реализовать  $D \approx 2,5 \cdot 10^3$ . В этом случае, если обеспечить нижний предел измерения ионных потоков  $F_{\min} = F_{\min}^* = 1,7 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  (см. рис. 4), можно ожидать, что приблизительно в 55% случаев по измерениям энергетических спектров ионов при помощи прибора Д-137 будет возможно оценить параметры протонов и ионов  $\text{He}^{++}$  солнечного ветра.

Поскольку наличие шумов на входе измерительного преобразователя уменьшает динамический диапазон прибора по сравнению с его величиной, определяемой выражением (1), при разработке энергоспектрометра, кроме описанных в этой статье, был принят еще ряд мер, обеспечивающих увеличение отношения энергии сигнала к энергии шумов и наводок.

В частности, низкочастотный коэффициент усиления  $k_{\text{исх}}$  и постоянная времени  $\tau_{\text{исх}}$  исходного усилителя, на основе которого выполнен повторитель напряжения во входном устройстве ВУ (см. рис. 1), выби- рались из условия

$$k_{\text{исх}} \tau_{\text{исх}} = (\tau_{\text{исх}} + R_{\text{искс}})^2 / 4R_{\text{искс}}, \quad (2)$$

обеспечивающего монотонность фронта и минимальное искажение формы импульсов напряжения  $U_{\text{в.у}}(t)$  на выходе ВУ.

Численное исследование зависимости погрешности измерения  $I_{\text{к}}$  от величины измерительного сопротивления  $R_{\text{и}}$  и частоты модуляции напряжения  $f_{\text{м}}$  на управляющих сетках датчика ПЛ-51 (с учетом разброса прочих параметров) позволило выявить область поиска их оптимальных значений:  $0,1 \text{ ГОм} \leq R_{\text{и}} \leq 0,4 \text{ ГОм}$  и  $0,6 \text{ кГц} \leq f_{\text{м}} \leq 1,5 \text{ кГц}$ . Окончательный выбор номинала  $R_{\text{и}}$  осуществлялся с учетом конструктивных требо-

ваний, а частота  $f_M$  выбиралась с учетом результатов исследования электромеханических свойств конкретного экземпляра модуляционного датчика ПЛ-51.

На рис. 5, а приведены зависимости от  $f_M$  амплитуды фонового тока коллектора  $I_K$  для датчиков ПЛ-51 № 6 и 19. Анализ аналогичных зависимостей для этих и других экземпляров датчика показал, что величины глобальных максимумов функции  $I_K(f_M)$  отличаются друг от друга на 30–40%. У каждого экземпляра датчика ПЛ-51 в оптимальном интервале частот  $f_M$  имелся участок с относительно слабой интенсивностью фонового тока (например, 0,87–0,95 кГц для датчика № 19). В середине такого участка и выбиралось окончательное значение  $f_M$ .

При фиксированной частоте  $f_M$  интенсивность электромеханических эффектов, вызывающих появление фонового тока, зависит от величины  $U_+$  и амплитуды модуляции  $U_{\sim}$  управляющего напряжения (рис. 5, б). С учетом этой зависимости пришлось ограничить  $U_{\sim} = 0,3$  кВ на трех верхних интервалах энергетического диапазона прибора (см. таблицу).

Методы оптимизации параметров электронных элементов использовались и при разработке формирователя анализирующих напряжений. Выполнение противоречивых требований к его динамическому диапазону ( $U_{\sim}^6/U_{\sim}^1 \geq 200$ ), ко времени установления  $U_+$ ,  $U_{\sim}$  и к устойчивости используемых устройств связано со значительными трудностями [9]. В описанном выше формирователе применен высоковольтный автогенераторный усилитель с компенсирующим источником напряжения [10] и выбраны оптимальные параметры электронных компонентов. Это позволило разумным образом разрешить указанные противоречия и обеспечить достаточно высокую стабильность приведенных в таблице анализирующих напряжений.

### 3. РАСЧЕТ УГЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

На рис. 3 была представлена эффективность модуляции датчиком ПЛ-51 падающего перпендикулярно апертуре потока ионов. В настоящем разделе будет рассмотрена эффективность модуляции потока ионов, падающего на датчик под произвольным углом.

Эффективность модуляции потока ионов, падающего на апертуру датчика, в случае, когда переменное напряжение  $U_{\sim}$  представляет собой последовательность прямоугольных импульсов, определяется разностью коллекторных токов  $I_K^{H,i}$  и  $I_K^{B,i}$  при потенциалах на управляющих сетках соответственно  $U_H^i$  и  $U_B^i$ . В свою очередь, отношение коллекторного тока  $I_K$  к току пучка частиц, падающего на датчик  $I_0 = nVqS_{эфф}$  ( $n$  — концентрация,  $V$  — скорость,  $q$  — заряд частиц в пучке), зависит от конструкции датчика, энергии  $E$  и угла падения  $\vartheta$  частиц, величины напряжения на управляющих сетках  $U$ . Общий метод определения функции  $\Omega = I_K/I_0$  по известным характеристикам ловушки изложен в работе Г.И. Волкова и др. [1]. Как уже отмечалось, в модуляционном датчике ПЛ-51 в отличие от ранее применявшихся плоских управляющих сеток были использованы

сферические сетки. Для этого датчика функция  $\Omega(qU/E, \vartheta) = \Omega(\xi, \vartheta)$  следующая:

при

$$0 \leq \xi \leq \xi_0 = 1 - \frac{R^2}{R_2^2} \left[ 1 - \frac{\sin^2 \vartheta}{4} \operatorname{tg}^2 \vartheta \left( \frac{R_1^2}{R^2} - 1 \right) \right]$$

$$\Omega = \frac{\cos \vartheta}{\pi} [2\psi - \sin 2\psi], \text{ где } \cos \psi = \frac{\sqrt{R_1^2 - R^2}}{2R} \operatorname{tg} \vartheta;$$

при

$$\xi_0 < \xi \leq \xi_1 = 1 - \frac{R^2}{R_2^2} \cos^2 \vartheta$$

$$\Omega = \frac{a^2}{\pi R^2} \arccos \left( \frac{y-x}{a} \cos \vartheta \right) - \frac{a^2}{\pi R^2} \arccos \frac{z \cos \vartheta}{a} + \\ + \frac{\cos \vartheta}{\pi} \arccos \frac{x}{R} + \frac{\cos \vartheta}{\pi} \arccos \frac{z}{R} - \frac{y}{\pi R^2} \sqrt{R^2 - x^2} \cos \vartheta,$$

где

$$a = \sqrt{1-\xi} R_2, y = \operatorname{tg} \vartheta \sqrt{R_1^2 - R^2}, z^2 = \frac{R^2 - (1-\xi) R_2^2}{\sin^2 \vartheta},$$

$$x = \frac{1}{\sin \vartheta} [\sqrt{R_1^2 - (1-\xi) R_2^2} - \cos \vartheta \sqrt{R_1^2 - R^2}];$$

при

$$\xi_1 < \xi \leq \xi_2 = 1 - \frac{R^2}{R_2^2} \left( \sqrt{\frac{R_1^2}{R^2} - 1} \sin \vartheta - \cos \vartheta \right)^2$$

$$\Omega = \frac{a^2}{\pi R^2} \arccos \left( \frac{y-x}{a} \cos \vartheta \right) + \\ + \frac{\cos \vartheta}{\pi} \arccos \frac{x}{R} - \frac{y}{\pi R^2} \sqrt{R^2 - x^2} \cos \vartheta,$$

где

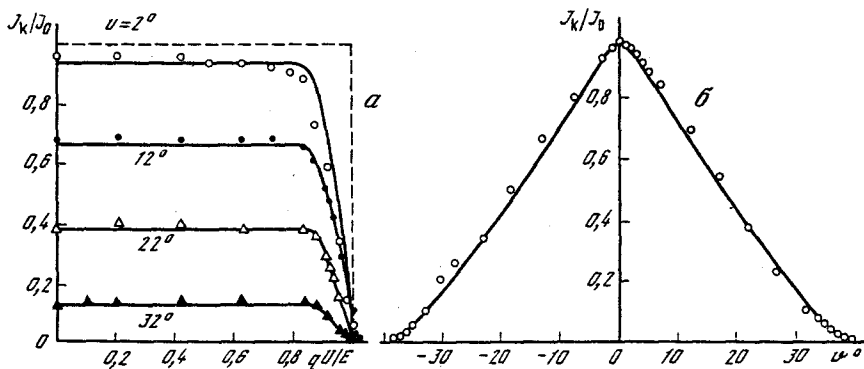
$$a = \sqrt{1-\xi} R_2, y = \sqrt{R_1^2 - R^2} \operatorname{tg} \vartheta,$$

$$x = \frac{1}{\sin \vartheta} [\sqrt{R_1^2 - (1-\xi) R_2^2} - \cos \vartheta \sqrt{R_1^2 - R^2}]$$

при

$$\xi_2 < \xi \leq 1, \quad \Omega = \frac{(1-\xi) R_2^2}{R^2} \quad \text{для } \sin \vartheta < \frac{R}{R_1},$$

$$\Omega = 0 \quad \text{для } \sin \vartheta \geq \frac{R}{R_1}.$$



Р и с. 6. Вольтамперные (а) и угловая (б) характеристики модуляционного датчика ПЛ-51

Приведенное теоретическое выражение для функции  $\Omega$  сравнивалось с экспериментальными характеристиками датчика. Предполетные испытания прибора проводились в вакуумной камере, в которой датчик облучался широкими параллельными пучками ионов  $H^+$  с энергией 200, 500, 2000, 5000 эВ. Угол прихода ионов на ловушку изменялся от 0 до  $40^\circ$ . Разброс ионов по энергиям не превышал 3%. Измерения проводились при давлении остаточных газов в камере  $1,2 \cdot 10^{-6}$  торр.

На рис. 6 приведены вольт-амперная (рис. 6,а) и угловая (рис. 6,б) характеристики модуляционного датчика ПЛ-51. Сплошные линии соответствуют рассчитанным характеристикам прибора, различные значки — экспериментальным значениям, полученным при облучении датчика ионами  $H^+$  с энергией 4826 эВ. Видно хорошее согласие (в пределах ошибок эксперимента) экспериментальных и теоретических характеристик прибора; поэтому при обработке данных, полученных с помощью датчика ПЛ-51, можно надежно использовать теоретическое выражение для функции  $\Omega$ .

#### 4. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА СПУТНИКЕ "ПРОГНОЗ-9"

Искусственный спутник Земли "Прогноз-9" 1 июля 1983 г. был выведен на необычно высокую для спутников этой серии орбиту. Начальные параметры орбиты были следующие: высота в апогее —  $111,9 R_3$  ( $R_3$  — радиус Земли), высота в перигее —  $1,93 R_3$ , наклонение —  $-65,3^\circ$ , период обращения — 25,64 сут. "Прогноз-9" стабилизировался вращением с угловой скоростью  $\sim 3$  град/с относительно оси, совпадающей с точностью  $\sim 5^\circ$  с направлением на Солнце. Ось датчика ПЛ-51 была ориентирована вдоль оси вращения спутника.

На рис. 7 показан обзорный график ионных спектров, полученных с помощью энергоспектрометра ионов Д-137А 22–23 августа 1983 г. По оси абсцисс отложено московское время в часах, расстояние от центра Земли до спутника в радиусах Земли и угол Солнце–Земля–спутник; по оси ординат приведены диапазоны энергий  $E^i$  (на единицу заряда) и средние скорости регистрируемых в каждом энергетическом интервале  $i$  ионов

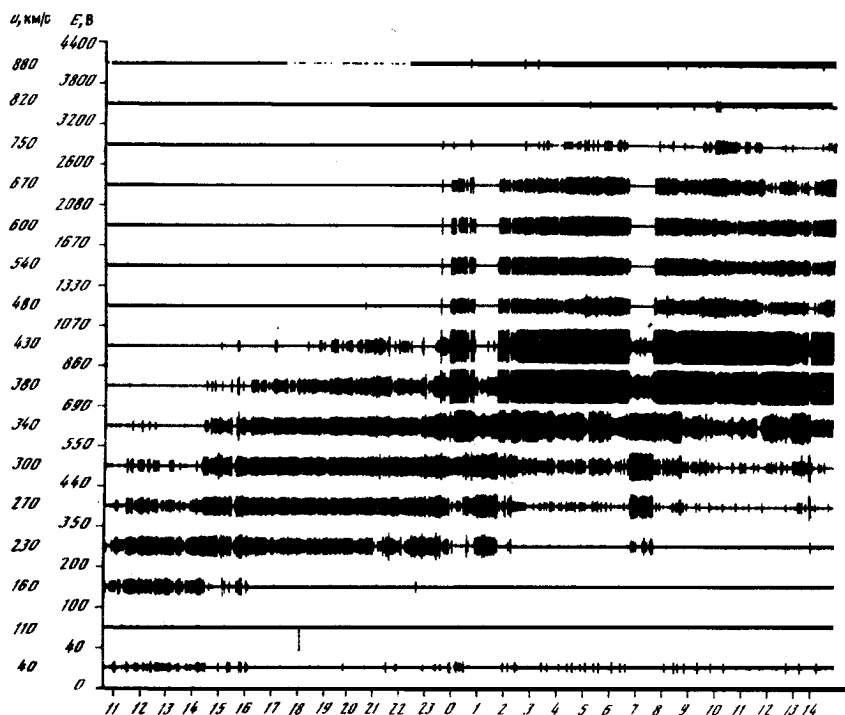


Рис. 7. Обзорный график спектров ионов, полученных с помощью энергоспектрометра ионов Д-137А 22–23 августа 1983 г.

(протонов). Длина вертикальных отрезков прямой пропорциональна логарифму потока ионов в каждом энергетическом интервале. По таким обзорным графикам легко определить, где находился спутник в данное время — в солнечном ветре, где спектры потоков ионов близки к максвелловским; в переходной области, т.е. в солнечном ветре, возмущенном после прохождения околоземной ударной волны, или в магнитосфере, где потоки ионов с энергией 0–4400 эВ близки к нулю. Так, приведенный график соответствует выходу спутника из магнитосферы. Видны многократные пересечения спутником магнитопаузы (МП) и ударной волны (УВ). Расстояния, на которых наблюдались магнитопауза и ударная волна, характерны для околоземного космического пространства.

Для интервалов времени, когда спутник находился в солнечном ветре, по энергетическим спектрам ионов определялись параметры протонов. Это делалось путем сравнения измеренных энергетических спектров с расчетными, т.е. использовалась "библиотека" ионных спектров. Расчет "библиотеки" осуществлялся следующим образом.

При распределении солнечного ветра по скоростям  $f$  и потенциале на управляющих сетках  $U$  коллекторный ток  $I_K$  определяется следующим выражением:

$$I_K = nqS_{\text{эф}} \iiint V^3 f \Omega \left( \frac{2qU}{mV^2}, \vartheta \right) \sin \vartheta dV d\vartheta d\varphi.$$

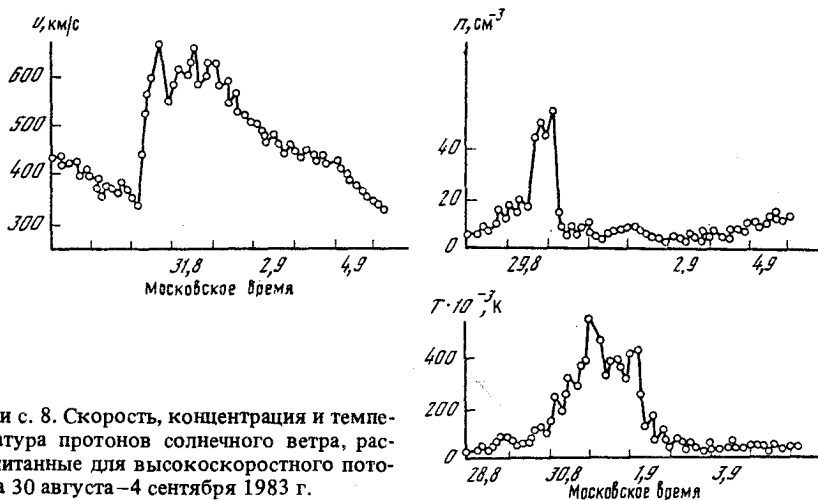


Рис. 8. Скорость, концентрация и температура протонов солнечного ветра, рассчитанные для высокоскоростного потока 30 августа–4 сентября 1983 г.

“Библиотека” ионных спектров – таблица значений токов  $I_{\kappa}^i$ , где  $i$  – номер энергетического интервала, вычислялась для максвелловского распределения протонов с переносной скоростью  $V_0(V_0, \vartheta_0, \varphi_0)$  и температурой  $T$  по формуле:  $I_{\kappa} = I_{\kappa}^{H,i} - I_{\kappa}^{B,i}$ , при этом концентрация плазмы и полагалась равной 1,  $\vartheta_0$  – угол между осью датчика и  $V_0$  – равным  $180^\circ$ . Последнее условие оправданно ввиду незначительных отклонений направления прихода плазмы солнечного ветра от линии Солнце–Земля. При расчете переносная скорость  $V_0$  изменялась от 0 до 860 км/с, а температура  $T$  – от  $10^4$  до  $6,3 \cdot 10^6$  К. С рассчитанными спектрами сравнивались измерения ионного потока  $I_{\kappa}^i$  только в трех энергетических интервалах в окрестности имеющего наибольшее значение  $I_{\kappa}^i$ .

Благодаря необычной орбите с высоким апогеем и большим периодом обращения вокруг Земли спутник “Прогноз-9” на каждом витке длительное время (более 10 сут) находился в невозмущенном магнитосферой Земли солнечном ветре. Это позволяло на этом спутнике непрерывно исследовать крупномасштабные структуры солнечного ветра. На рис. 8 приведены рассчитанные по описанной выше методике скорость, концентрация и температура протонов солнечного ветра для высокоскоростного потока, наблюдавшегося с 30 августа по 4 сентября 1983 г. Переносная скорость протонов в этом потоке возросла до 600–650 км/с, температура – до  $(4 \div 5) \cdot 10^5$  К, на фронте высокоскоростного потока концентрация протонов достигала  $50 \text{ см}^{-3}$ . Приведенный на рис. 8 высокоскоростной поток солнечного ветра был связан с находившейся в окрестности солнечного экватора корональной дырой, имевшей долготную протяженность  $\sim 40^\circ$ , прохождение которой через центральный меридиан Солнца было зарегистрировано несколькими днями раньше [11].

Еще одной особенностью высокоскоростного потока солнечного ветра наблюдавшегося 30 августа – 4 сентября 1983 г., является его рекуррентный характер. По данным предварительного анализа результатов измерений в солнечном ветре при помощи энергоспектрометра Д-137А можно сделать вывод, что этот высокоскоростной поток существовал на протя-

жении 5–6 оборотов Солнца; переносная скорость плазмы в нем достигала 700–800 км/с.

Ранее устойчивые рекуррентные высокоскоростные потоки наблюдались в солнечном ветре в 1973–1975 гг. по фазе спада 20-го цикла солнечной активности [12, 13]. Их регистрация во второй половине 1983 г. на спутнике "Прогноз-9" позволяет, по-видимому, говорить о возобновлении регулярной структуры солнечного ветра на спаде последнего, 21-го цикла солнечной активности.

Описанная в настоящей статье аппаратура для исследования солнечного ветра работала в течение всего периода активного существования спутника "Прогноз-9" – до конца февраля 1984 г. Измерения в солнечном ветре, проведенные с ее помощью, обрабатываются и анализируются, и их результаты будут опубликованы в дальнейшем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волков Г.И., Застенкер Г.Н., Копылов В.Ф. и др. Некоторые особенности изучения потоков заряженных частиц с помощью ловушек и анализаторов. 1. Модуляционные ловушки // Космич. исслед. 1970. Т. 8. С. 423.
2. Грингауз К.И., Безруких В.В., Волков Г.И. и др. Исследования солнечной плазмы вблизи Марса и на трассе Земли – Марс при помощи ловушек заряженных частиц на советских космических аппаратах 1971–1973 гг. 1. Методы и приборы // Космич. исслед. 1974. Т. 12. С. 430.
3. Безруких В.В., Беляшин А.П., Волков Г.И. и др. Изучение плазмы в магнитосфере Земли и межпланетном пространстве на спутниках серии "Прогноз" // Геомагнетизм и аэрономия, 1974. Т. 14. С. 399.
4. Bridge H.S., Belcher J.W., Butler R.J. et al. The plasma experiment on the 1977 voyager mission // Space Sci. Revs. 1977. Vol. 21. P. 259.
5. Bridge H.S., Dilworth C., Rossi B. et al. An instrument for the investigation of interplanetary plasma // J. Geophys. Res. 1960. Vol. 65. P. 3053.
6. Крисилов Ю.Д. Электронная аппаратура космических приборов с зондовыми датчиками // Космическое приборостроение. М.: Наука, 1982. С. 47–71.
7. А.С. 387494 СССР. Усилитель с автоматической регулировкой усиления / В.Е. Ваулин, Ю.Д. Крисилов, Н.И. Тарасов, В.И. Старцев. Оpubл. в Б.И. 1973. № 27.
8. Крисилов Ю.Д. Автоматическая регулировка и стабилизация усиления транзисторных схем. М.: Сов. радио. 1972. 272 с.
9. Крисилов Ю.Д. Формирование анализирующих сигналов для исследования космической плазмы // Радиотехника. 1978. Т. 33. С. 75–77.
10. А.С. 647844 СССР. Усилитель постоянного тока / С.Л. Емельянов, Ю.Д. Крисилов, В.И. Старцев, Н.И. Тарасов. Оpubл. в Б.И., 1979, № 6.
11. Solar Geophysical Data. 471. Pt 1.
12. Bame S.J., Asbridge J.R., Feldman W.C., Gosling J.T. Solar cycle evolution of high speed solar wind streams // Astrophys. J. 1976. Vol. 207. P. 977–980.
13. Schwenn R. The "average" solar wind in the inner heliosphere: structures and slow variations, in "Solar Wind Five" / Ed. M. Neugebauer. Wash., 1983. P. 489–507. (NASA Conf. Publ.; N 2280).