

УДК 523.98

Внеатмосферные исследования Солнца, выполненные в Крымской астрофизической обсерватории за период 1959-1998 гг.

А.В. Брунс

НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория», 98409, Украина, Крым, Научный

Аннотация. Изложена история развития внеатмосферных исследований Солнца в Крымской Астрофизической Обсерватории. С 1959 г. по 1975 г. в космосе проводились пять спектральных исследований, начиная с коротковолновых спектрометров КДС, спектрометра-поляриметра СПШ-1, и заканчивая Орбитальным солнечным телескопом ОСТ-1 – экспериментом №1 на ОКС «САЛЮТ-4». Дальнейшие проекты были ориентированы на новое направление исследования Солнца – гелиосейсмологию.

Отмечается, что в основном эксперименты были разработаны, изготовлены, отлажены, установлены на космические аппараты и испытаны на полигонах сотрудниками КрАО.

В 1945 году было принято Постановление Правительства СССР «О начале строительства Крымской Астрофизической Обсерватории», которое практически совпало с другим знаменательным событием, хотя и менее известным общественности – решением о начале разработки мощной баллистической ракеты и назначением Главным конструктором Сергея Павловича Королева. Официальное открытие Обсерватории произошло в 1955 году, а в 1957 году новой ракетой был запущен Первый Искусственный Спутник Земли. И в дальнейшем развитие Крымской обсерватории происходило в тесном контакте с развитием космонавтики.

Вынесение исследовательской аппаратуры за пределы земной атмосферы позволило кардинально расширить диапазон длин волн, в котором проводились астрофизические исследования, и значительно улучшить разрешение в получаемых изображениях, доведя его до теоретического.

Все предшествующие исследования Солнца, проводимые с помощью наземных астрофизических средств, относятся в основном к нижним слоям солнечной атмосферы, в то время как для понимания физики протекающих процессов необходимо знание условий по всей ее толще. Сведение о верхней хромосфере и переходной области между хромосферой и короной может дать изучение ультрафиолетового излучения, образующегося в этой области солнечной атмосферы. В ультрафиолетовой (УФ) области спектра располагается лаймановский водородный континуум, а также резонансные линии водорода, многократно ионизированных атомов углерода, азота, кислорода, магния, кремния и т.д., способные дать важные сведения о числе атомов в основном квантовом состоянии, об электронной плотности и температуре, а также степени ионизации солнечной плазмы. Все эти данные могли быть получены только за пределами земной атмосферы.

В Советском Союзе первыми из ученых, занявшихся исследованиями УФ спектра Солнца, были С.Л. Мандельштам – ФИАН (Физический Институт АН им. Вавилова), А.И. Ефремов

ГОИ (Государственный Оптический Институт им. Лебедева) и В.Г. Курт ГАИШ (Государственный Астрономический Институт им. Штенберга).

В Крымской Астрофизической Обсерватории в 50-60-е годы царствовал все определявший культ науки, созданный и поддерживаемый директором А.Б. Северным. Менее чем за десятилетие был создан весь комплекс наземных инструментов, которые более чем через тридцать пять лет все еще представляют "Национальное достояние". Не было практически ни одного такого направления в астрофизике, в котором Северный, либо сам, либо с помощью сотрудников, не попытался бы "нащупать" передний край и оценить возможность и перспективность его развития в обсерватории. Не осталась в стороне и космонавтика. Для развития внеатмосферных исследований из ГОИ (Ленинград) был приглашен Владимир Константинович Прокофьев. Видный ученый – профессор, спектроскопист, один из немногих к тому времени соприкоснувшийся с ракетной техникой и имевший опыт проведения ракетных исследований

Первой нашей попыткой провести внеатмосферные исследования было создание в 1958 году ракетного спектрометра для регистрации ультрафиолетового излучения Солнца. К сожалению эксперимент не состоялся, т.к. мы не уложились в отведенное для разработки и изготовления прибора время из-за ряда связанных с проектом технических трудностей.

А проблем было много. Кроме общих для всех внеатмосферных экспериментов были и специфично астрономические. Одна из них была связана с освоением нового весьма сложного диапазона длин волн - далекого вакуумного ультрафиолета (ВУФ). Такое название это излучение получило потому, что оно возбуждается и распространяется только в вакууме. Воздухом оно поглощается. Пришлось осваивать неиспользуемую в астрономии вакуумную технику. Все обычные оптические материалы, прозрачные в видимой области спектра, тоже не пропускают ВУФ. При разработке оптических схем допустимо было применять только отражающие элементы. Кроме того, обычно применяемые материалы имеют для ВУФ чрезвычайно низкий коэффициент отражения. Были необходимы новые специальные отражающие покрытия.

Из-за отсутствия прозрачного материала для окон фотоумножителей, возникли проблемы с фотоприемниками. Более того, фотопленки тоже оказались нечувствительными к ВУФ, т.к. излучение поглощается в связующем материале эмульсии и не доходит до кристаллов бромистого серебра.

Определенные сложности возникли с тепловыделяющими узлами и элементами приборов в связи с особенностью работы в вакууме и условиях невесомости. Вакуум не обладает теплопроводностью, а невесомость исключает конвективный отвод тепла при работе приборов в герметичном контейнере.

Нашими приборами, успешно работавшими в космосе, была серия коротковолновых дифракционных спектрометров (КДС) (Брунс А.В., Прокофьев В.К., 1961). Они были предназначены для измерения излучения Солнца в (УФ) области спектра. В качестве диспергирующего элемента в них использовалась вогнутая дифракционная решетка, примененная в схеме Роуланда. Сканирование спектра осуществлялось движением по кругу Роуланда выходной щели спектрометра, пропускавшей свет на расположенный за ней фотоприемник. В качестве фотоприемника использовался разработанный в ГОИ вторичный электронный умножитель открытого типа, не имевший ни стеклянной колбы, ни входного окна. При работе в спектрометре использовался естественный вакуум космоса.

Примененная в приборе автономная двухкоординатная система астроориентации на Солнце позволяла установку прибора на неориентированном спутнике. С помощью плоского поворотного зеркала система посылала свет на неподвижную входную щель спектрометра.

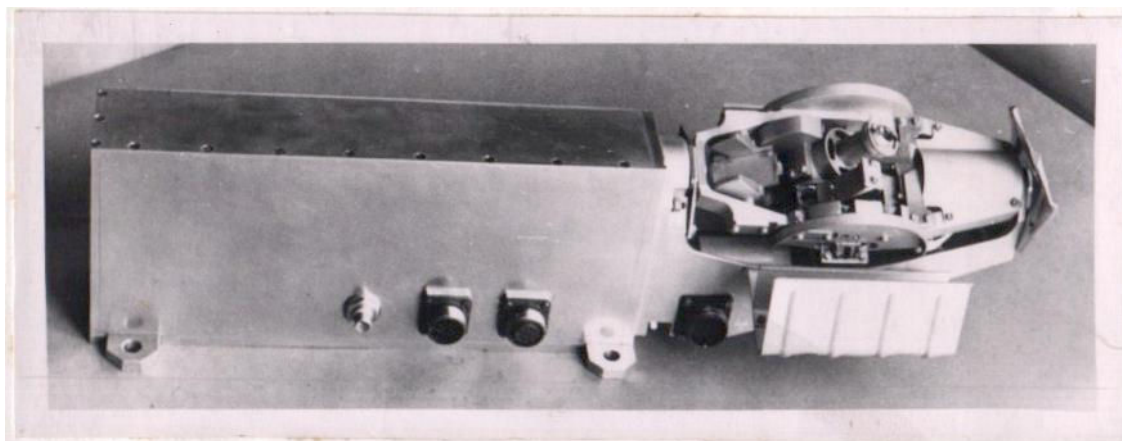


Рис. 1. Коротковолновый дифракционный спектрометр КДС-1

Первый вариант прибора КДС-1, запущенный в декабре 1959 года на "3-м корабле-спутнике" зарегистрировал спектр Солнца в узкой спектральной области 30.3-30.5 нм, (линии He II 30.4 нм) (Брунс А.В., Прокофьев В.К., 1961, 1963).

Продолжены исследования Солнца в далеком ультрафиолете были в 1967 году на ИСЗ "Космос-166". В приборе КДС-2 был модернизирован спектрограф: регистрировалось излучение Солнца в диапазоне 90.0-110.0 нм. Была также разработана новая система ориентации. В результате исследований удалось выявить переменность УФ-излучения во время солнечных вспышек (Брунс А.В., Прокофьев В.К., Северный А.Б., 1969).

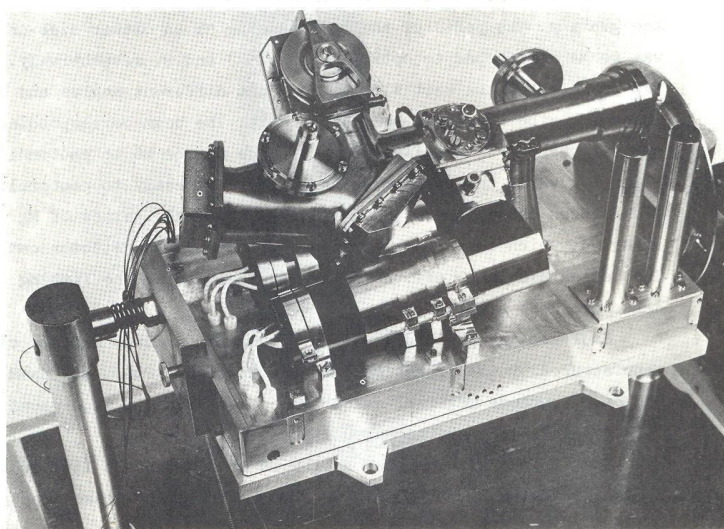


Рис. 2. Совместный Советско-Шведский космический проект: измерение УФ излучения солнечной короны в диапазоне 125-140 нм.

Совместно с учеными Швеции был осуществлен космический проект: измерение резонансного рассеяния света в солнечной короне с помощью совместно разработанного спектрометра-поляриметра (Брунс А.В., Стенфло Я.О. и др., 1980).

Внеатмосферные эксперименты с небольшими приборами позволили получить и изучить спектр от всего Солнца в УФ области, что дало определенное представление о строении солнечной атмосферы. Одновременно исследования показали, что все УФ излучение сосредоточено в небольших по площади активных областях. Оставался нерешенным целый ряд фундаментальных проблем. Сложности возникли при попытках понять связь фотосферных и хромосферных явлений, в частности, роль магнитного поля и активных образований в переносе энергии и массы. Несмотря на относительно малые размеры, именно в активных образованиях может осуществляться основной процесс переноса. Необходимо было изучение отдельных конкретных образований на его поверхности. Это возможно только с помощью вынесенного за атмосферу телескопа, управляемого человеком.

В плане решения этой задачи, нами был разработан и изготовлен инструментальный комплекс - Орбитальный Солнечный телескоп (ОСТ) (Брунс А.В., 1979).

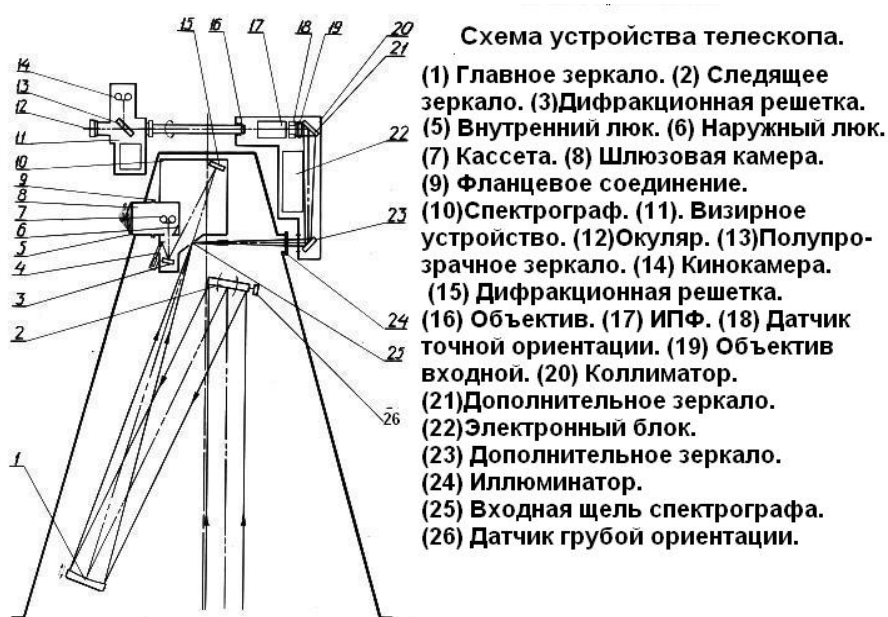


Рис. 3.

При поддержке К.П. Феоктистова на пилотируемые станции "Салют" были установлены прибор КДС-3 и Орбитальный Солнечный телескоп ОСТ-1. В 1975 году с борта станции "Салют-4" были получены ультрафиолетовые спектры флоккулов, солнечных вспышек и других образований. Астрофизические наблюдения проводились двумя экспедициями космонавтов, прошедших специальную подготовку в КрАО (Брунс А.В., Гречко Г.М., Губарев А.А., и др. 1976а). В первой - работали Г.М. Гречко и А.М. Губарев, во второй - В.И. Севастьянов и П.И. Климук. В результате эксперимента получено свыше 600 ультрафиолетовых спектров активных образований на Солнце и около двух тысяч его изображений; отождествлено более 100 эмиссионных линий в области 97.0 – 140.0 нм.

Обработка спектров дала много новых сведений о физических условиях в различных активных образованиях на уровне верхней хромосферы и переходной области от хромосферы к короне.

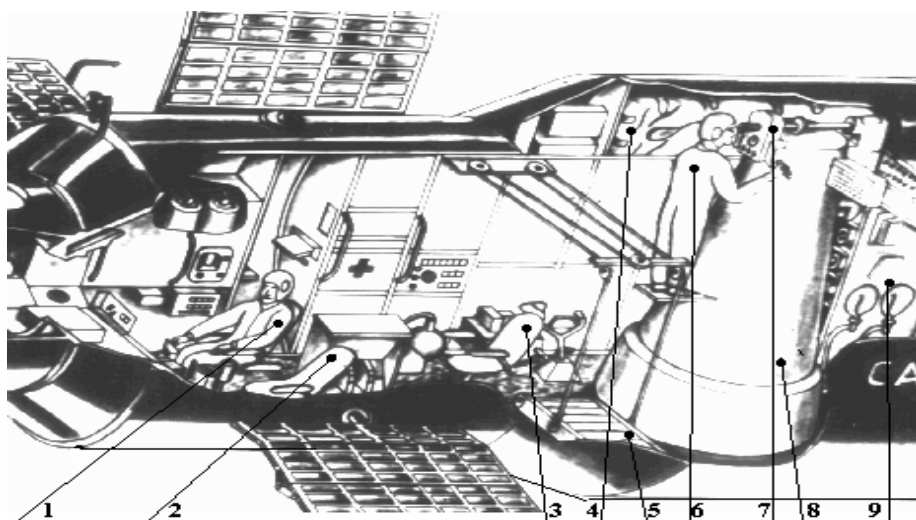


Рис.4-а. 1, 2,3, 6 -- рабочие места космонавтов, 4 - спальное место, 5 - бегущая дорожка, 7 - визир телескопа, 8 - отсек научной аппаратуры, 9 – туалеты.

Функционирование телескопа

Солнечный свет сквозь отверстие в основании конуса освещает Следящее зеркало (22), поворачивающееся таким образом, чтобы, отраженный луч попадал на Главное зеркало (2). Управление наведением осуществляется сначала по сигналам датчика предварительной ориентации (21), затем – точного наведения (18). Главное зеркало строит изображение Солнца на входной щели (9) спектрографа (13). Свет, прошедший через щель в спектрограф, обрабатывается на двух вогнутых дифракционных решетках и в виде изображения спектра фотографируется на пленке помещенной в кассете (15). Свет, отраженный от зеркальных щек щели, проходит через иллюминатор (20) в коллиматорное устройство, где, отражаясь от двух зеркал, освещает два узла – датчик точного наведения (18) и систему визуального контроля. Космонавт, глядя в окуляр (11) через Н-альфа ИП фильтр (17), видит изображение Солнца на щели спектрографа. Управляя с помощью ручек (10) системой ориентации, он может перемещать изображение Солнца по щели и пропустить любой выбранный его участок сквозь щель внутрь спектрографа. Одновременно, положение изображения Солнца на щели спектрографа регистрируются на фотокамере (12).

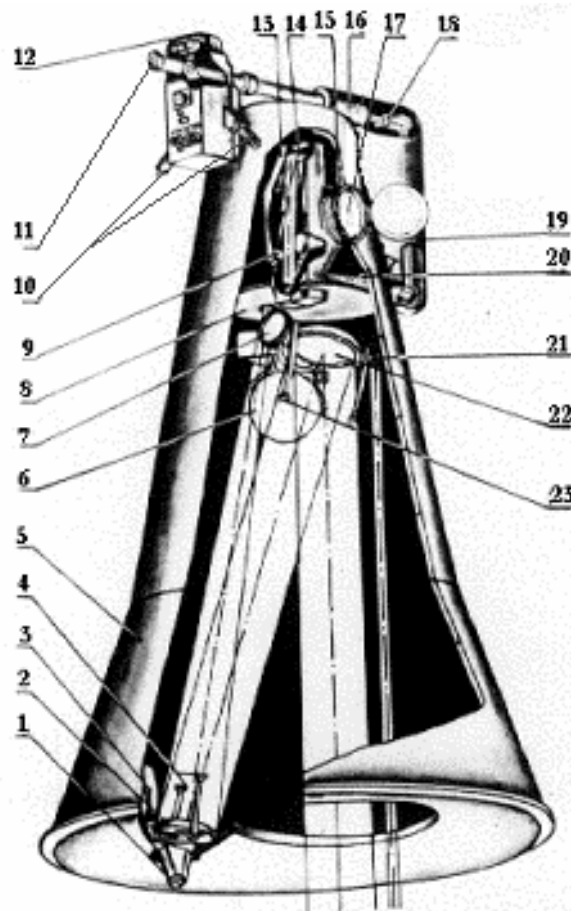


Рис.4-б



Рис. 5а.
Инженер-исследователь первой Экспедиции на ОКС «САЛЮТ-4»
Летчик-космонавт
Георгий Михайлович Гречко



Рис. 5б.
Инженер-исследователь второй Экспедиции на ОКС «САЛЮТ-4»
Летчик-космонавт
Виталий Иванович Севастьянов

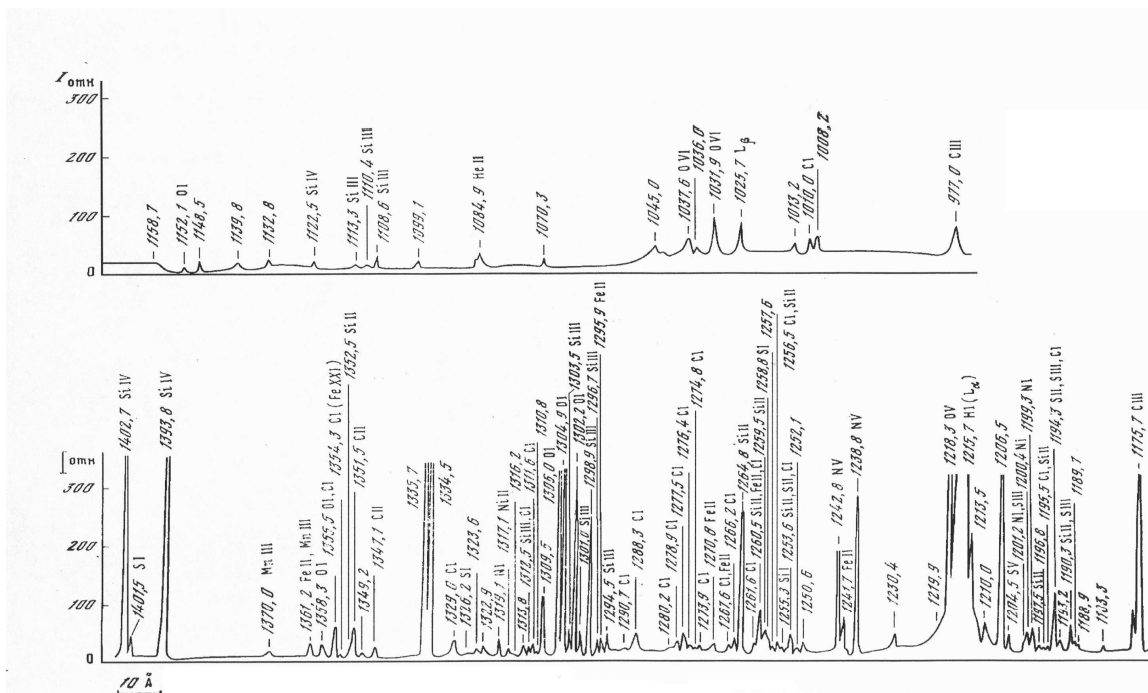


Рис. 6. Микрофотометрическая запись спектра слабой вспышки 2.11.75 г. 13h 49m 24s UT

Доплеровские сдвиги спектральных линий для зон флоккулов с разной полярностью показали, что эти зоны замкнуты между собой петлеобразными структурами, распространяющимися в верхней хромосфере и переходной области к короне. Скорости направленных движений в петлях, определенные на основании измерений величин смещения спектральных линий, достигают 100 км/с. Это значение в 10 раз выше, чем скорость движения плазмы, регистрируемая по наземным наблюдениям для фотосферы (Брунс А.В., Гречко Г.М., Губарев А.А., Климук П.И., Севастьянов В.И., Северный А.Б. и др. 1976 б).

Измеренная в эксперименте величина отношения интенсивности линий СШ 117.5 нм и СШ 97.7 нм составляют для слабых вспышек ~ 0.8 , для флоккулов в области поднимающейся плазмы ~ 0.9 , а в области опускающейся плазмы ~ 0.6 . Проведенный на основании этих измерений расчет показал, что для соответствующих высот солнечной атмосферы ($T \sim 55 \cdot 10^3 \text{K}$) во всех указанных активных образованиях, электронная концентрация $n_e > 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (Брунс А.В., Гречко Г.М., Губарев А.А., Климук П.И., Севастьянов В.И., Северный А.Б. и др. 1976 в).

Водородные линии лаймановской серии имеют протяженные крылья (до 2 нм для L_α). Зарегистрирована избыточная яркость красного крыла по сравнению с синим. Расчеты, проведенные на основе зарегистрированных контуров спектральных линий L_α и L_β , позволили сделать вывод, что в зоне образования крылья линий во флоккулах и слабых вспышках расширены главным образом за счет штарк-эффекта, электронная концентрация в них составляет $n_e = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а кинетическая температура $T = 15 \cdot 10^3 \text{K}$ при числе атомов в основном состоянии $N_1 = 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ (Брунс А.В., Гречко Г.М. и др. 1977).

Разработка комплекса сопровождалась значительными достижениями в создании новой техники астрофизических исследований. Был создан принципиально новый астрофизический инструментальный комплекс - Орбитальный солнечный телескоп. Одной из отличительных особенностей его устройства являлось отсутствие собственной единой несущей конструкции. Его оптические элементы были сгруппированы определенным образом в 5-ти блоках, неподвижно располагаемых на поверхности станции таким образом, что образовывали полную оптическую схему телескопа. Наведение на Солнце осуществлялось плоским зеркалом, установленным в карданном подвесе. Такая конструкция во много раз уменьшила вес комплекса и позволила решить ряд других проблем. Так, например, расположение спектрографа неподвижно на внешней поверхности станции, позволило камерную часть спектрографа выполнить в виде шлюзовой камеры и обеспечить возможность многократной перезарядки кассет космонавтами непосредственно из кабины, без выхода в открытый космос.

Был решен большой круг вопросов, имевших самостоятельное практическое значение. К ним относится создание новых оптических схем спектральных приборов для области вакуумного УФ, обладающих при двойной монохроматизации высокой стигматичностью изображения спектра и низким уровнем рассеянного света; нахождение общих закономерностей в распределении эффективности по поверхности вогнутых дифракционных решеток.

Телескоп имел высокоточную автономную от станции систему ориентации, позволявшую при ручном управлении наведением на любую точку поверхности Солнца автоматически поддерживать выбранное направление. По результатам работы реальная ошибка удержания не превышала 1-1.5 сек. дуги.

Большое значение для будущих внеатмосферных оптических экспериментов может иметь предложенный и впервые реализованный на комплексе ОСТ-1 технологический эксперимент - нанесение в условиях космического вакуума новых отражающих покрытий на зеркала непосредственно во время их эксплуатации, за пределами земной атмосферы. Обработка наблюдений показала хорошее качество покрытий (Брунс А.В. 1979).

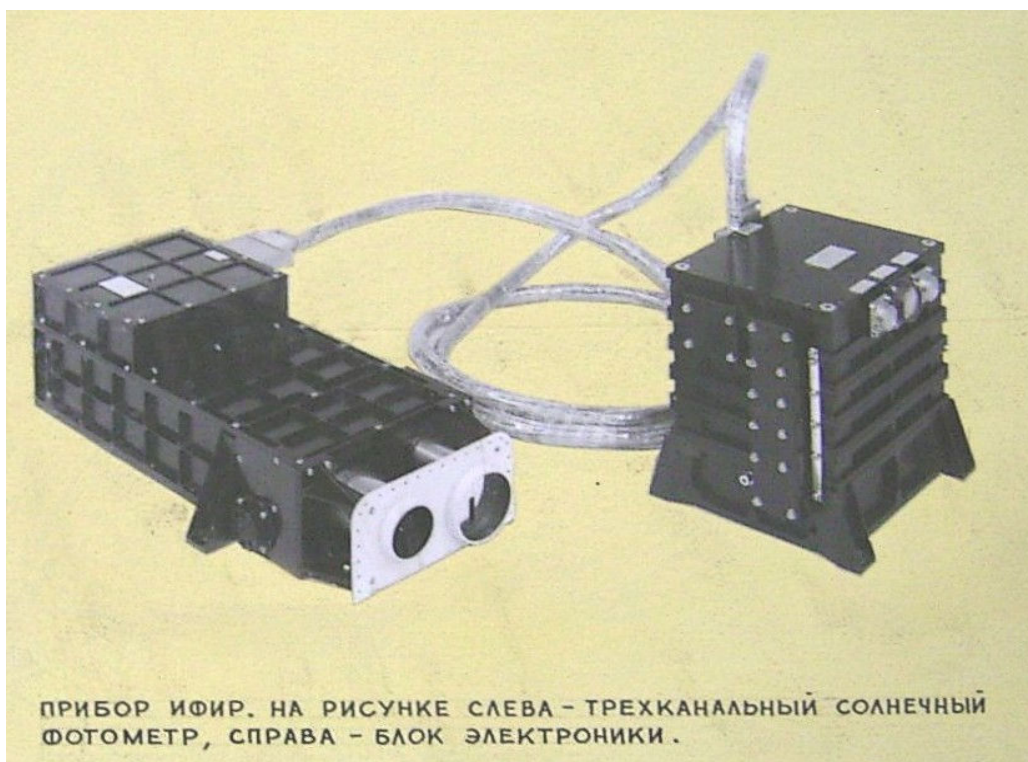
Работы явились важным этапом в развитии внеатмосферных астрономических исследований: освоен новый спектральный диапазон - далекий ультрафиолет, включая вакуумный. Накоплен большой опыт по созданию крупных космических аппаратов и по использованию промышленной космической техники (Брунс А.В., Гречко Г.М., Губарев А.А., Климук П.И., Севастьянов В.И., Северный А.Б., Стешенко Н.В. 1976 в).

Полученные с помощью орбитального комплекса ОСТ-1 УФ спектры позволили объективно оценить физические условия, существующие на Солнце в различных образованиях на уровне верхней хромосферы и переходной зоны между хромосферой и короной. Они явились основой для теоретических исследований ряда авторов. Полученный материал представляет практическую ценность для разработки методов оперативного и долгосрочного прогнозирования и определения радиационной обстановки в атмосфере и околоземном космическом пространстве.

Дальнейшие исследования в КрАО были посвящены изучению внутреннего строения Солнца, недоступного для прямых наблюдений. С целью “заглянуть” в солнечные глубины были использованы сейсмические методы, в какой-то мере сходные с геосейсмологическими исследованиями строения Земли. Метод основывается на том, что Солнце, как всякая механическая система, обладает резонансными свойствами, определяемыми его внутренним строением.

Происходящие на Солнце различные энергетические процессы имеют широкий спектр шумов, из которого резонансной системой Солнца выделяются отдельные частоты колебаний - моды, охватывающие всю толщу Солнца.

Измерения характеристик солнечных мод дает информацию теоретикам для создания модели его внутреннего строения.



ПРИБОР ИФИР. НА РИСУНКЕ СЛЕВА - ТРЕХКАНАЛЬНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ФОТОМЕТР, СПРАВА - БЛОК ЭЛЕКТРОНИКИ.

Рис. 7. Прецизионные фотометры «ИФИР» работали на пролетной части траектории станций «ФОБОС» на пути к Марсу.

Первый реализованный внеатмосферный гелиосейсмологический эксперимент КрАО (совместный со швейцарскими и французскими учеными) - “ИФИР” был выполнен на двух межпланетных станциях ФОБОС. Приборы - прецизионные фотометры - работали на пролетной части траектории станций на пути к Марсу (Брунс А.В., Боне Р.М., Фролих К. и др. 1988).

Уникальность эксперимента состояла в том, что он проводился на большом удалении от Земли, что исключало “земные” помехи, и позволяло практически непрерывно в течение 180 дней проводить измерения флуктуаций солнечного излучения, составляющие 10^{-5} от его среднего уровня (Брунс А.В., Боне Р.М., Фролих К. и др. 1989).

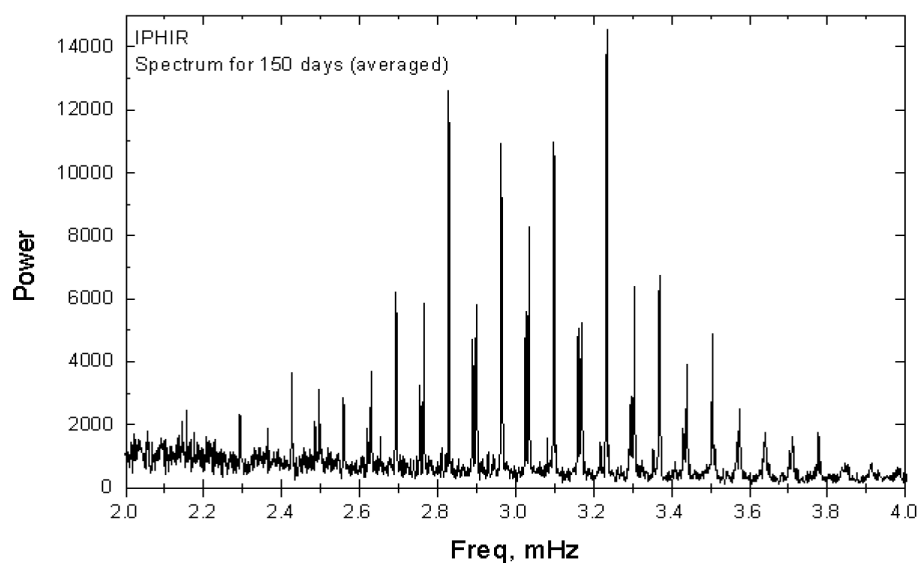


Рис. 8. Спектр р-мод глобальных колебаний Солнца полученных прибором «ИФИР».

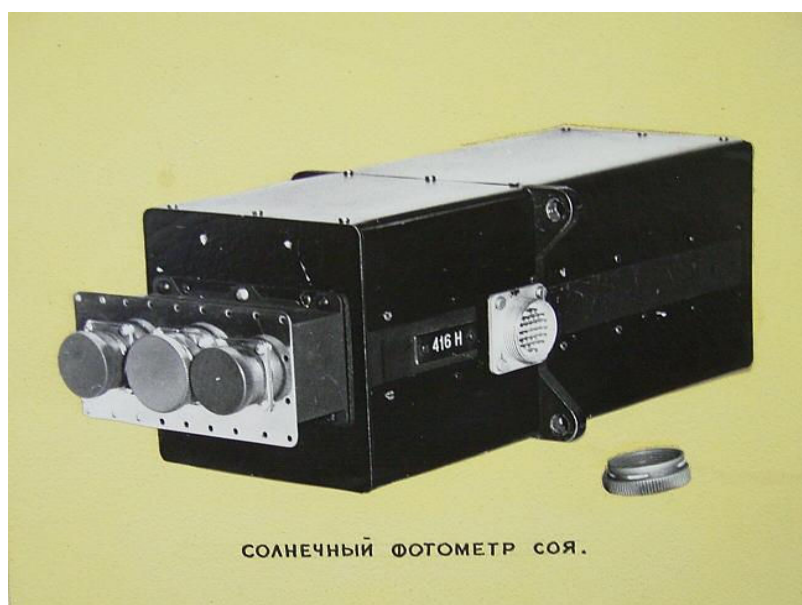


Рис. 9. Эксперимент СОЯ.

Полученные данные позволили рассчитать параметры глобальных колебаний Солнца с наилучшей на сегодняшний день точностью (Брунс А.В., Боне Р.М., Фролих К. и др. 1991), а также выявить особенности изменения параметров колебаний со временем (Брунс А.В., 1991; Брунс А.В., Шумко С.М. 1990; Брунс А.В., Шумко С.М., 1992).

Продолжение исследований солнечных осцилляций яркости входило в программу исследований проекта МАРС-96 - эксперимент СОЯ (Брунс А.В., 1996).

В настоящее время предполагается продолжение исследований на Украинском модуле международной орбитальной станции. Разработанный на более высоком экспериментальном

уровне прибор позволит получить дополнительную информацию о модах солнечных осцилляций, а, следовательно, о внутреннем строении Солнца. Кроме того, повторение измерений в течение ряда лет позволит проследить изменение характера осцилляций с 11-летним циклом солнечной активности и определить наличие и величину вариаций его параметров.

Литература.

- Брунс А.В., Прокофьев В.К. // Искусств. Спутн. Земли. 1961. 11. С. 15-22.
- Брунс А.В., Прокофьев В.К. (Bruns A.V, Prokof'ev V.K.) // Planetary and Space Sci. 1963. V. 7. С. 73-86.
- Брунс А.В., Прокофьев В.К., Северный А.Б. (Bruns A.V., Prokof'ev V.K., Severni A.B.) // Ultra-violet Stellar Spectra and Ground - Based observations, I.A.U. Simpos.Luntran, The Netherlands. 1969. N. 36. P. 24-27.
- Брунс А.В., Стенфло Я.О., Дравинс Д., Вильборг Н., Прокофьев В.К., Житник И.А. и др. (Bruns A.V, Stenflo J.O., Dravins D., Wihlborg N., Prokof'ev V.K., Zhitnik I.A., Biverot H., Stenmark L.) // Solar Phys. 1980. V. 66. N 1. P. 13-20.
- Брунс А.В. // Изв. Крымск.Астрофиз. Обсерв. 1979. Т. 59. С. 31-56.
- Брунс А.В., Гречко Г.М., Губарев А.А., Климух П.И., Севастьянов В.И., Северный А.Б., Стещенко Н.В. // Сб. Внеатм. Исслед. Активн. Обл.на Солнце. Тр. УИИ Консультатив. Совещ. Ак. наук соц. стран по физ. Солнца. Изд. Наука. 1976а. С. 12-15.
- Брунс А.В., Гречко Г.М., Губарев А.А., Климух П.И., Севастьянов В.И., Северный А.Б., Стещенко Н.В. // Изв. Крымск.Астрофиз.Обсерв. 1979. Т. 59. С. 3-31
- Брунс А.В., Гречко Г.М., Губарев А.А., Климух П.И., Севастьянов В.И., Северный А.Б., Стещенко Н.В. (Bruns A.V, Gubarev A.A., Grechko G.M., .Severny A.B., Stechenko N.V.) // Space Research, Akademie Verlag, Berlin, 1976.б, vol. 16.
- Брунс А.В., Гречко Г.М., Губарев А.А., Климух П.И., Севастьянов В.И., Северный А.Б., Стещенко Н.В. (Bruns A.V, Gubarev A.A., Grechko G.M., Severny A.B., Stechenko N.V.) // Space Research, Pergamon Press, Oxford and New York, 1977. V.17.
- Брунс А.В., Гречко Г.М., Губарев А.А., Климух П.И., Севастьянов В.И., Северный А.Б., Стещенко Н.В. (Bruns A.V, Gubarev A.A., Grechko G.M., Severny A.B., Stechenko N.V.) // Energy balance and hydrodynamics of the Solar chromosphere and corona, IAU Colloquium N36, Nice, France. 1976в. P. 333-372.
- Брунс А.В. // Авторское свидетельство. 1972. № 342072.
- Брунс А.В. // Журнал прикл. Спектроск. 1981. Т. 35. С.1098.
- Брунс А.В., Боне Р.М., Фролик К. и др. (Bruns A.V., Bonnet R.M., Frohlich C., et al.) // Proc. Symp. Seismology of the Sun and Sun-likstars, 1988. P. 359-362
- Брунс А.В., Боне Р.М., Фролик К. и др. (Bruns A.V, R.M.Bonnet, C.Frohlich, et al. // Inside the Sun. IAU Collocuium. 1989. N 121, P. 279-288.
- Брунс А.В., Шумко С.М. (Bruns A.V, Shumko S.M.) // 1991. Planet. Sci. V.39. N. 1/2. P. 41-46.
- Bruns A.V. // Solar Phys. 1991. T.1 33. P. 89-94.
- Брунс А.В., Делабудиниер Ж.П., Фрелих К., Бонне Р.М., Шумко С.М. // Письма в Астрон. Журн. 1990. Т. 16. С. 330-342.
- Брунс А.В., Шумко С.М. // Изв. Крымск. Астрофиз.Обсерв. 1992. Т.85. С.20-27.
- Брунс А.В., Шумко С.М. // Астрон. журн. 1990. Т.67. С. 829-836.
- Брунс А.В. // Космічна нука і технологія. 1996. Т. 2. № 3-4. С. 18 - 23.
- Брунс А.В., Боне Р.М., Фролик К. и др. (Bruns A.V., Bonnet R.M., Delaboudiniere, Domingo V. Frohlich C., Kotov V.A., Kollath Z., Rachkovsky D.N., Toutain T., Wehrli Ch.,Shumko S.M.) // Bull. Crim. Astrophys. 1991 Obs. No 83, pp 22-33.