

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЦА УЧЕНЫМИ КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ АН СССР:
ЭКСПЕРИМЕНТ ОСТ-1**

ФЕДОР ФЕДОРОВИЧ АДАМЕНЬ

*Управление РАН по взаимодействию с научными организациями
Республики Крым и города федерального значения Севастополь
Россия, 298648, Республика Крым, Ялта, пгт. Никита, Никитский спуск, д. 52
E-mail: vitainviva@ukr.net*

АНДРЕЙ ДМИТРИЕВИЧ ЩЕРБИНА

*Управление РАН по взаимодействию с научными организациями
Республики Крым и города федерального значения Севастополь
Россия, 119334, Москва, Ленинский пр., 32а
E-mail: aas175740@yandex.ru*

В статье на основе историко-научного анализа освещены этапы и ключевые моменты научно-исследовательской работы ученых Крымской астрофизической обсерватории, которая осуществлялась в рамках эксперимента ОСТ-1 на космической станции «Салют-4». Указаны особенности работы солнечного телескопа для получения стигматичных ультрафиолетовых спектров от избранных участков солнечной поверхности, предназначенного для исследований в широком спектральном интервале от вакуумного ультрафиолета до инфракрасной области. Освещены достижения ученых КрАО АН СССР в рамках данного проекта, в частности, успешное проведение экспериментов по нанесению новых отражающих слоев на оба зеркала телескопа. Определен вклад сотрудников исследовательского учреждения в развитие советской космической программы.

Ключевые слова: Крымская астрофизическая обсерватория, солнечный телескоп, космическая станция «Салют-4», эксперимент ОСТ-1.

DOI: 10.7868/S0205960618020015

SOLAR STUDIES AT THE CRIMEAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY OF THE USSR ACADEMY OF SCIENCES: EXPERIMENT OST-1

FEDOR FEDOROVICH ADAMEN

*Department of the Russian Academy of Sciences
for Interaction with Scientific Organizations
of the Republic of Crimea and the Federal City of Sevastopol
Nikitsky spusk, 52, Yalta, pgt. Nikita, Republic of Crimea, 298648, Russia
E-mail: vitainviva@ukr.net*

ANDREI DMITRIEVICH SHCHERBINA

*Department of the Russian Academy of Sciences
for Interaction with Scientific Organizations
of the Republic of Crimea and the Federal City of Sevastopol
Leninsky prospekt, 32a, Moscow, 119334, Russia
E-mail: aas175740@yandex.ru*

The paper describes the stages and milestones in the researchers' work at the Crimean Astrophysical Observatory that was conducted within the framework of the OST-1 experiment at the Salyut-4 space station. The solar telescope used in this work was intended for the studies within a wide spectral range from vacuum UV to IR region. The paper describes the specifics of operating this solar telescope to obtain the stigmatic UV spectra from the selected areas of solar surface, and the achievements of CAO's scientists, particularly the successful experiments with applying new reflective layers to both mirrors of the telescope. CAO's contribution to the development of the Soviet space program is identified.

Keywords: Crimean Astrophysical Observatory, solar telescope, Salyut-4 space station, experiment OST-1.

Во второй половине XX в. неизученная ультрафиолетовая область солнечного спектра считалась наиболее информативной для исследования физического состояния верхних слоев атмосферы Солнца. Для разработки данного вопроса был создан орбитальный солнечный телескоп (ОСТ-1) с высоким пространственным разрешением. Наиболее благоприятным временем для исследования процессов на Солнце является пик его активности. Поскольку таковой приходился на 1969–1970 гг., заявка от сотрудников Крымской астрофизической обсерватории АН СССР на проведение эксперимента ОСТ-1 была подана именно в этот период. Согласно документальным данным, успешному эксперименту с ОСТ-1 предшествовал ряд неудачных попыток. Так,

в соответствии с программой исследования околоземного космического пространства 6 июня 1971 года в 7 часов 55 минут по московскому времени в Советском Союзе стартовала ракетоноситель с космическим кораблем «Союз-11». В 8 часов 04 минуты корабль «Союз-11» выведен на расчетную орбиту спутника Земли.

Космический корабль пилотировал экипаж в составе командира корабля подполковника Г. Т. Добровольского, бортинженера В. М. Волкова, инженера-испытателя В. И. Пацаева.

7 июня 1971 года в 10 часов 45 минут по московскому времени, после успешно выполненной стыковки транспортного космического корабля «Союз-11» с научной станцией «Салют», которая была выведена на орбиту 19 апреля 1971 года, экипаж корабля «Союз-11» перешел в помещение научной станции¹.

Первый запуск не дал ожидаемых результатов. Отсек научной аппаратуры, в котором находился телескоп, на период выведения на орбиту закрывался дюралевой крышкой-обтекателем. Тот, в свою очередь, прикреплялся к станции двумя рядами пироболтов. Из этих двух рядов сработал только один, что привело к блокированию работы ОСТ-1. Пацаеву было поручено проверить цепи пироболтов и подорвать их². Однако цепи оказались неисправны, и освободиться от обтекателя не удалось. При возвращении экспедиции на Землю в результате нештатного открытия клапана произошло быстрое падение давления в кабине спускаемого аппарата «Союза-11», что привело к трагической гибели космонавтов.

Второй экземпляр ОСТ-1 был выведен на орбиту в составе орбитальной космической станции «Салют-2». Этот запуск был осуществлен ракетой-носителем «Протон-К» с космодрома Байконур 3 апреля 1973 г. по программе военных орбитальных пилотируемых станций СССР «Алмаз». На тринадцатые сутки произошла разгерметизация отсеков станции, а 25 апреля перестала поступать телеметрическая информация. Станция, пробыв на орбите 54 дня, закончила свою работу 28 мая 1973 г. в результате естественного торможения в верхних слоях атмосферы и упала в океан около Австралии. ОСТ-1 был утрачен вместе со станцией.

Третий экземпляр ОСТ-1 был изготовлен для орбитальной космической станции «Салют-3». Она была выведена на орбиту ракетой-носителем «Протон» 26 июня 1974 г. Из 16 ежесуточных витков вокруг Земли, которые делал «Салют-3», три-четыре находились вне зоны видимости наземных телеметрических станций. В один из дней, когда станция вышла из глухих витков, после расшифровки переданной с ее борта информации стало понятно, что станция вращается с большой скоростью и систему ориентации запустить невозможно. К неуправляемой и быстро вращающейся станции транспортный корабль пристыковаться не мог. Пробыв на орбите 213 суток и обеспечив пилотируемый полет с первым экипажем («Союз-14») в течение 13 суток, станция закончила свою работу 25 января 1975 г.³

В 1973 г. США запустили орбитальную научную лабораторию *Skylab*. Напряженное соперничество в области освоения космоса между СССР и США имело одним из следствий подготовку к запуску следующего, четвертого,

¹ Брунс А. В. Как это было. Орбитальный солнечный телескоп Крымской астрофизической обсерватории. Научный: КрАО АН СССР, 1999. С. 61–62.

² Там же. С. 62.

³ Космонавтика: энциклопедия / Гл. ред. В. П. Глушко. М.: Советская энциклопедия, 1985. С. 340–344.

экземпляра орбитальной космической станции «Салют». Сотрудники КрАО АН СССР, в свою очередь, приступили к созданию очередного экземпляра ОСТ-1. К середине 70-х гг. XX в. отсутствовали заготовленные элементы к телескопу, серийные заводские комплектующие деталей. Некоторые чертежи были утеряны. Тем не менее разработчики за четырехлетний период полностью вошли в суть выполняемой каждым из них работы и четко представляли ее место в общем комплексе. Каждый последующий экземпляр телескопа совершенствовался. Орбитальная космическая станция «Салют-4» по программе гражданских пилотируемых станций СССР «Долговременная орбитальная станция» была выведена на орбиту ракетой-носителем «Протон-К» 24 декабря 1974 г. 12 января 1975 г. на борт «Салюта-4» прибыл первый экипаж в составе командира корабля А. А. Губарева и бортинженера Г. М. Гречко («Союз-17»). В июне 1975 г. на борт орбитальной космической станции прибыла вторая экспедиция космонавтов: командир корабля И. И. Климук и бортинженер В. И. Севастьянов⁴. Наблюдательный рабочий день у космонавтов на орбите продолжался четыре часа, рабочих дней по программе исследований с ОСТ-1 было два-три в неделю. После стыковки и перехода космонавтов на станцию «Салют-4» она начала свое функционирование. Основным предназначением телескопа, согласно цели эксперимента «ОСТ-1», было получение стигматичных ультрафиолетовых спектров избранных участков солнечной поверхности. Прибором управлял космонавт, который в соответствии с переданной с Земли программой наблюдения находил для исследования на H_{α} -изображении Солнца указанные астрофизиками объекты и спектрографировал их в диапазоне 90–140 нм.

Руководство экспериментом ОСТ-1 было возложено на Н. В. Стешенко, конструктором назначен А. В. Брунс. При создании телескопа ученые КрАО учитывали ряд требований для проведения внеатмосферных экспериментов: 1) необходимость компоновки комплекса аппаратуры без деформации готовой конструкции станции; 2) обеспечение точности ориентации спутника для достижения максимальной функциональности телескопа; 3) использование прозрачных материалов, пригодных для изготовления оптических деталей для применения фотографического метода регистрации в диапазоне короче 1050 Å.

Разработчики ОСТ-1 учли основные из перечисленных требований к конструкции телескопа. Все его механические и оптические части (за исключением решеток) были спроектированы и сделаны в КрАО. При длине телескопа более 3 м его установка не вызывала затруднений благодаря удачной основной конструктивной идее. Система подразделялась на отдельные блоки, включающие в себя от одного до нескольких оптических элементов. Полная оптическая схема комплекса создавалась при соответствующем расположении блоков на поверхности отсека научной аппаратуры, корпус которого фактически выполнял роль несущей конструкции. Использование для точного наведения поворачивающегося плоского зеркала дало возможность установить телескоп на орбитальную станцию, имеющую точность

⁴Брунс А. В. Разработка комплекса аппаратуры ОСТ-1 и исследование Солнца с борта станции «Салют-4». Дис. ... докт. физ.-мат наук. М., 1983. С. 241.

ориентации 1° . При этом вся система телескопа располагалась неподвижно относительно корпуса станции, что позволило решить проблему доставки фотокассет из открытого космоса.

Весь комплекс аппаратуры подразделялся на две основные части: измерительную, включающую телескоп с дифракционным спектрографом, и систему управления и визуального контроля положения изображения. Телескоп состоял из двух зеркал. Главное, вогнутое, диаметром 250 мм, было покрыто германием и сернистым цинком, имело форму внеосевой параболы и строило изображение Солнца размером ~ 24 мм на расстоянии 2 м от входной щели спектрографа ⁵. Возвратно-поступательное движение зеркала, обеспечиваемое электроприводом, позволяло во время работы осуществить точную фокусировку. Такая конструкция давала возможность достаточно легко превратить камерную часть спектрографа в шлюзовую камеру непосредственно из жилого отсека станции, извлекать из спектрографа кассеты с отснятой фотопленкой, а также устанавливать новые ⁶. Следящее, плоское, зеркало, покрытое фтористым литием (с тонким защитным слоем MgF_2), поворачиваемое вокруг двух взаимно перпендикулярных осей электроприводом, посылало отраженный свет на главное, обеспечивая с помощью гида все режимы работы телескопа: наведение на Солнце, наведение на активное образование и стабилизацию изображения. При этом главное зеркало, спектрограф и вся остальная оптическая схема оставались стационарными относительно станции. Двухзеркальная система телескопа имела преимущество над однозеркальной в отношении конструктивного выполнения. В ней сочетались автономная высокоточная система ориентации и неподвижное положение регистрирующей станции астрофизического комплекса относительно корпуса «Салюта-4».

Учеными КрАО была создана оригинальная высокоточная двухступенчатая система ориентации телескопа, автономная от станции. Сначала работала первая ступень – грубая, – которая направляла солнечный свет в телескоп на главное зеркало. Затем включалась вторая – точная, – которая имела свои датчики и осуществляла донаведение и стабилизацию положения изображения. Для упрощения процедуры установки телескопа, изначально проводившейся по сложной технологии с подсчетом времени движения от упора, астрофизиками была выработана новая простая методика: каждый раз перед заходом в тень станция ориентировалась в пространстве определенным образом по отношению к Солнцу, затем телескоп наводился на центр Солнца и его двигатели выключались. В этом случае после выхода из тени и восстановления ориентации станции телескоп оказывался автоматически направленным на центр Солнца.

Согласно данным репрезентативных источников, при первом включении ОСТ-1 на орбите отечественные астрофизики установили, что грубый

⁵ Брунс А. В. Устройство орбитального солнечного телескопа станции «Салют-4» // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 1979. Т. 59. С. 35.

⁶ Брунс А. В. Как это было: внеатмосферные исследования солнца Крымской астрофизической обсерватории // Из истории Крымской астрофизической обсерватории. Сборник рассказов / Сост. А. В. Брунс. Симферополь: ЧерноморПРЕСС, 2008. С. 65.

датчик наведения на Солнце уводил следящее зеркало от оси телескопа на такой угол, что солнечный пучок совсем не попадал на главное зеркало. Просмотр всей системы через иллюминатор показал, что датчики засвечивались ложным солнечным пучком, отраженным от одного из приборов, с которого была частично сорвана теплоизоляционная обшивка. Чтобы направить солнечный пучок в телескоп при выключенном датчике грубого наведения была разработана методика поворота следящего зеркала на нужный угол по времени его движения по каждой координате, начиная от одного из крайних положений зеркала ⁷. При этом двигатели поворота зеркала включались вручную. После того как солнечный пучок был наведен на главное зеркало, включались датчики точного удержания Солнца и телескоп начал работать в полном объеме.

В результате технически грамотно выполненной сотрудниками КрАО работы спектрограф обеспечивал получение достаточно стигматичного спектра для широкого участка длин волн от 970 до 1420 Å, возможность повышения освещенности фотопленки при входном относительном отверстии 1:10 и выходном относительном отверстии 1:5, построение стигматичного спектра двумя оптическими элементами — сферическими решетками ⁸. Эти конструкторские решения позволили избежать лишних потерь ультрафиолетового излучения на отражающих поверхностях. Спектрограф был собран по видоизмененной схеме Уодсворта и содержал две вогнутые дифракционные решетки. В фокусе первой из них находилась входная щель, осуществляющая предварительную монохроматизацию и одновременно являющаяся коллиматором для второй решетки. Связанное с увеличением длины волны увеличение потерь света в спектрографе создавало полезное выравнивание эффективности системы при регистрации солнечного спектра, в котором учеными КрАО фиксировалось существенное нарастание интенсивности в длинноволновой области спектра.

Так как спектрограф работал только в ультрафиолетовой области спектра, то обе его решетки были изготовлены с трехслойным покрытием Al + Ge + ZnS, которое позволило существенно снизить уровень рассеянного света. Учеными КрАО АН СССР было установлено, что в области 6563 Å, используемой в системе визуального контроля, эффективность зеркала снижалась до 30 %. Поэтому нанесение на оба зеркала телескопа этого покрытия чрезвычайно ослабило бы область спектра, необходимую для работы датчиков фотогида и системы визуального контроля. Для нанесения трехслойного покрытия было определено только одно, главное, зеркало. Следящее зеркало было покрыто алюминием и защитным слоем LiF. В свою очередь, слой LiF был защищен от воздействия влаги слоем MgF₂. Это покрытие хорошо

⁷ Брунс А. В., Гречко Г. М., Губарев А. А., Климук П. И., Севастьянов В. И., Северный А. Б., Стешенко Н. В., Феоктистов К. П. Результаты спектральных исследований солнечных активных областей на «Салюте-4» // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 1979. Т. 59. С. 5–6.

⁸ Брунс А. В., Сидоров Г. Г., Стешенко Н. В. Ультрафиолетовый спектрограф орбитального солнечного телескопа станции «Салют-4» // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 1979. Т. 59. С. 58.

отражало в видимой области, хотя имело сравнительно худший коэффициент отражения в области λ 1000 Å⁹.

С целью проведения исследований вне атмосферы Земли сотрудникам КрАО было необходимо усовершенствовать систему термостатирования. Для наблюдения на диске Солнца имеющихся активных образований необходимо рассматривать его через узкополосный интерференционно-поляризационный фильтр, так называемый H_{α} -фильтр. Данный прибор, изготовленный из оптических кристаллов исландского шпата и кварца, обладал высокой чувствительностью к температуре и должен был работать при постоянном ее значении, стабилизированном с точностью до 0,1 °С. Функционально он состоял из двух частей: оптического блока и системы термостатирования. Оптическая часть была рассчитана и изготовлена А. Б. Северным и специалистом из Института кристаллографии АН СССР А. Б. Гильваргом в 1948 г.¹⁰ Работавшую в системе терморегулирования цепочку элементов (измеритель температуры (терморезистор), электронный усилитель и подключенный к нему проволочный электронагреватель) ученые предполагали применить для ОСТ-1. Однако с исчезновением веса прекращался конвективный теплообмен и воздушная прослойка препятствовала прохождению тепла от нагревателя к узлам, подлежащим нагреву. Поэтому в устройстве термостатирования H_{α} -фильтра была применена принудительная циркуляция воздуха по специальной замкнутой системе, которая охватывала пространство, окружающее оптические элементы фильтра. Система регулирования температуры предусматривала работу в трех режимах и управлялась тремя датчиками. При первой подаче напряжения включался форсированный режим нагрева. После достижения температуры 28 °С происходило переключение на режим прецизионного управления. При отказе системы терморегулирования в силу каких-либо причин автономная аварийная система отключала питающее напряжение при достижении температуры 38 °С¹¹.

Для эффективной работы оптических элементов при проведении внеатмосферных исследований, кроме получения эффективных оптических покрытий, ученые КрАО ставили целью сохранить отражающие свойства этих покрытий в течение всего времени с момента их нанесения и до окончания работы на орбите. Были предусмотрены три группы мероприятий для выполнения вышеописанных задач. Первая осуществлялась на этапе проектирования. Оно велось с учетом требований вакуумной техники, в частности, внимание сотрудников обсерватории было обращено на правильный выбор материалов конструкции, а именно оправ зеркал и других оптических элементов, на обработку поверхностей металлических конструкций, которые в результате не становились пористыми и шероховатыми. Предпочтение отдавалось полированным поверхностям, легко поддающимся очистке. С момента изготовления аппаратуры и до запуска проводилась вторая группа мероприятий, которая предусматривала меры по защите оптических элементов при проведении всех видов юстировочно-регулирующих работ

⁹ Брунс. Устройство орбитального солнечного телескопа... С. 35.

¹⁰ Брунс. Как это было. Орбитальный солнечный телескоп... С. 63—64.

¹¹ Брунс. Устройство орбитального солнечного телескопа... С. 47.

и испытаний, включая испытания на технической позиции. Третья группа мероприятий по защите оптических поверхностей выполнялась во время пребывания на орбите.

Среди особых достижений разработчиков ОСТ-1 следует отметить уникальное технологическое решение – ими впервые в мире был реализован метод нанесения свежих покрытий в космосе специально сконструированными установками для термомолекулярного напыления алюминия с целью предотвращения влияния контаминации на отражающие свойства зеркал. Качество оптических элементов космического телескопа могло ухудшаться из-за образования на них налета за счет конденсации различных веществ, входящих в микроатмосферу космического аппарата. Поэтому учеными КрАО было принято решение разработать и установить на ОСТ-1 устройство для термомолекулярного нанесения на зеркала новых отражающих слоев в процессе их эксплуатации на борту орбитальной космической станции. Помимо А. В. Брунса, свой проект установки предложил инженер механической мастерской обсерватории В. В. Бенюх. Заместитель директора по научной работе Н. В. Стешенко объявил конкурс проектов, который завершился с явным преимуществом основного варианта. В соответствии с ним каждое зеркало ОСТ-1 было снабжено испарителем алюминия, управляемым с пульта управления бортинженера. Это позволило примерно в 12 раз увеличить отражение от щечек щели, которые не имели отдельной защиты во время вывода корабля на орбиту. Космонавтами первой экспедиции было произведено напыление алюминия на главное зеркало, второй – на следящее зеркало телескопа. Как показали измерения, отражающие свойства слоя алюминия, напыленного в космосе, оказались практически такими же, как у многослойных покрытий, выполненных в лаборатории. В то же время на зеркалах телескопа сотрудниками КрАО не зафиксировано преимущество в коэффициенте отражения в ультрафиолетовой области спектра из-за быстрого окисления алюминиевого покрытия атомами и ионами кислорода, присутствующими в малых количествах вокруг корабля.

Телескоп не имел собственной несущей конструкции, а был выполнен в виде отдельных блоков. Они располагались на внешней и внутренней поверхностях отсека научной аппаратуры таким образом, что образовывали оптическую схему телескопа. После их установки на соответствующие посадочные места требовалась дополнительная юстировка, которая проводилась в два этапа: сначала центр зеркала совмещался с оптической осью спектрографа, а затем зеркало разворачивалось на необходимый угол. Для выверки положения центра зеркала использовалось прицельное приспособление, установленное на боковой поверхности спектрографа. Разработка, изготовление, наладка, испытания и работа на орбите солнечного телескопа ОСТ-1 подтвердили правильность общих принципов, положенных учеными КрАО АН СССР в основу его конструкции. Блочное строение всего комплекса значительно облегчило его вес, уменьшило габариты и упростило размещение на орбитальной станции, которое свелось к установке в отсеке научной аппаратуры пяти отдельных блоков. Такое конструктивное решение позволило

проводить исследование в прямом фокусе главного зеркала при больших фокусных расстояниях.

Еще одним удачным техническим усовершенствованием являлась прямая оптическая передача изображения с щели спектрографа в визирное устройство, расположенное в кабине. Камерная часть спектрографа была герметизирована при неподвижном расположении прибора на корпусе станции. Данное конструктивное решение позволило ученым обсерватории иметь доступ к кассете из кабины станции и тем самым решить проблему смены фотопленки. При смене экипажа результаты наблюдений доставлялись на Землю, где оценивалось их качество и корректировалась программа работы следующего экипажа. Каждый из экипажей отснял по две кассеты спектрографа, проводя для их установки и смены по три операции шлюзования.

К усовершенствованиям в последней модели ОСТ-1 следует отнести применение в спектрографе интегрирующего фотоэкспонетра. В дифракционной решетке, строившей одновременно два спектра (первый — справа от нормали к ней, второй — слева), один из спектров фотографировался на фотопленку, другой направлялся на люминофор. Ультрафиолетовый световой поток, переизлученный люминофором в видимой области спектра, регистрировался фотоумножителем интегрирующей системы регистрации. Благодаря такой конструкции появилась возможность задавать величину экспозиции при фотографировании двумя способами: по времени, отсчитываемому по электронному секундомеру, и по количеству упавшей энергии, зарегистрированной с помощью экспонетра.

Поскольку надежность ракетносителя «Протон», выводящего «Салют», была существенно ниже, чем у транспортного корабля, коллектив астрофизиков настоял на доставке фильтра не со станцией «Салют», а вместе с космонавтами на транспортном корабле, причем с каждым экипажем фильтр должен был летать в оба конца. Изготовить подобный фильтр, пригодный для работы на орбите, ученые могли только в одном экземпляре. Необходимость доставки фильтра на транспортном корабле определяла его конструктивное оформление из двух отдельных частей — спасаемой и стационарной¹². В спасаемый узел, имеющий минимальную массу, входил блок оптических элементов, помещенных в оправу с закрепленным на ней датчиком температуры. Система термостатирования была выполнена отдельно и входила в стационарную часть фильтра.

Большим преимуществом ОСТ-1 на «Салюте-4» по сравнению с аналогичным телескопом *Skylab* являлось наличие стигматических изображений спектра, что позволило астрофизикам КраО установить наличие тонкой структуры в активных областях Солнца. В течение двух периодов (январь — февраль и июнь — июль 1975 г.) двумя экспедициями космонавтов были получены свыше 600 спектрограмм активных областей Солнца, включая вспышки или поярчания, флоккулы, протуберанцы, пятна и спокойные области диска, исследованы около 80 различных активных образований на Солнце. Чтобы получить яркие линии спектра с нормальной для

¹² Брунс. Как это было. Орбитальный солнечный телескоп... С. 63–64.

фотометрии плотностью, каждую активную область фотографировали с 5–6 различными экспозициями от 0,25 сек. до 2 мин. Обычные экспозиции для протуберанцев длились 2 час. 10 мин.¹³ После наблюдения каждой активной области фотографировался спектр невозмущенной части центра диска Солнца. Помимо космической, все активные области наблюдались наземными обсерваториями, в частности, КрАО. С целью выбора активных областей для наблюдения постоянно поддерживался контакт между астрономами и космонавтами. Первая экспедиция космонавтов работала с различными комбинациями экспозиций. После обработки фотопленок на Земле было установлено, что для фотографирования активных образований оптимальный набор состоял из пяти экспозиций: 0,5; 2, 8, 32, 128 сек.¹⁴ Этот набор был задан как основной для второй экспедиции.

Активность Солнца во время наблюдений в январе – феврале и июне – июле 1975 г. была низкой. Несмотря на данное обстоятельство, астрофизикам удалось сфотографировать орбитальным солнечным телескопом с пространственным разрешением 3–5" и спектральным 0,3 Å стигматичные спектры двух вспышек и ряда флоккулов. По различным спектрограммам вспышек и флоккулов в области от 970 до 1430 Å обнаружены 145 эмиссионных линий, принадлежащих различным атомам и ионам. Так, в слабой вспышке 2 февраля 1975 г. (13^h 50^m UT) наблюдались более 100 линий, во вспышке 11 июля 1975 г. (19^h 00^m UT), а также в ярком западном флоккуле 12 декабря 1975 г. (18^h 45^m UT) – более 90 линий¹⁵.

Именно анализ учеными КрАО стигматичных спектров показал, что верхняя хромосфера и переходная область между хромосферой и короной в области вспышек и флоккулов имела столь же тонкую структуру по распределению интенсивности и направленных скоростей движения, как и наблюдаемая наземными телескопами¹⁶. Это открытие объясняло природу солнечной активности: магнитное поле, являющееся основным носителем солнечной активности, в верхних областях вспышек и флоккулов сосредоточено в тонких, размером в несколько секунд и менее, жгутах.

Астрофизиками-исследователями было установлено, что интенсивность линий в области спокойного Солнца существенно флуктуировала вдоль линии. Яркость линий ионов и большинства слабых линий изменялась в два и более раз, что указывало на сильную неоднородность верхней хромосферы¹⁷. Для сканов в области спокойного Солнца выбирались средние по яркости

¹³ Брунс А. В., Гречко Г. М., Губарев А. А. и др. Результаты спектральных исследований солнечных активных областей на «Салюте-4» // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 1979. Т. 59. С. 8.

¹⁴ Брунс. Разработка комплекса аппаратуры ОСТ-1... С. 293.

¹⁵ Брунс, Гречко, Губарев и др. Результаты спектральных исследований солнечных активных областей... С. 8.

¹⁶ Брунс А. В., Гречко Г. М., Губарев А. А. и др. Результаты исследований, проведенных с орбитальным солнечным телескопом ОСТ-1 станции «Салют-4» // Космическая физика: труды VI научных чтений по космонавтике, посвященных памяти выдающихся советских ученых-пионеров освоения космического пространства (Москва, 11–15 января 1982 г.) / Ред. Р. З. Сагдеев. М.: ИИЕТ РАН, 1982. С. 39.

¹⁷ Там же. С. 40.

участки. Это давало возможность довольно правильно сопоставить измерения с интенсивностями линий, полученных с меньшим пространственным разрешением.

Усиление интенсивностей линий активной области было различно для разных линий. Ученые КрАО установили, что наиболее усилены во вспышках линии 1402,7 и 1393,8 Å Si IV. Их интенсивность в 21 раз превышала ту же усредненную величину в области спокойного Солнца. Во вспышке 2 февраля 1975 г. указанные линии были усилены в одинаковое число раз, что свидетельствовало о том, что в данной вспышке они оставались оптически тонкими¹⁸.

Линии 1242,8 и 1238,8 Å N V усилены во вспышке 2 февраля в 7,7 и 5,8 раза. Более яркая линия этого дублета усилена немного меньше, чем слабая. Астрофизики предположили, что данные показатели указывали на самопоглощение в центральной части линии 1238,8 Å. В других изученных активных образованиях эти линии усиливались примерно в одинаковое число раз (в 12 раз во вспышке 11 июля и примерно в 6 раз во флоккуле)¹⁹.

Значительному влиянию самопоглощения подвергались линии 1335,7 и 1334,5 Å C II. В спокойной области Солнца отношение их интенсивностей примерно равнялось 1,5, а во вспышке 2 февраля они усилились соответственно в 6,4 и 9,3 раза и яркость их стала почти одинаковой. Подобная картина наблюдалась также во флоккуле, но линии дублета там усиливались соответственно только в 2,6 и 3,5 раза. В наиболее интенсивных частях вспышек и флоккулов, где La имела наиболее протяженные крылья, была зафиксирована довольно яркая линия 1204,5 Å S V. В других частях активной области и на невозмущенном диске эта линия не видна, следовательно, во вспышке она усилилась в 4 раза по сравнению со спокойным Солнцем. Существенно усилилась (в 9 раз) во вспышке 2 февраля линия 1218,3 Å O V. Во флоккуле ее яркость увеличилась только в 3,1 раза по сравнению с невозмущенным диском. В 6 раз усилилась во вспышке линия 1031,9 Å O VI и примерно так же увеличена яркость линии 1037,6 Å O VI. Следует отметить, что в отдельных небольших участках (размером около 10") ярких флоккулов отношение интенсивностей указанных линий достигало 0,93, что, согласно гипотезе астрофизиков, указывало на сходные физические условия в переходном слое над вспышками и локальными областями ярких флоккулов. Линии нейтральных атомов, за исключением очень ярких линий O I, усиливались, как правило, в 1,5–3 раза²⁰. Сотрудники КрАО установили, что наибольшему усилению во вспышках подвергались линии высокоионизированных атомов. Ионы средней степени ионизации усиливались умеренно, а нейтральные атомы – слабо. Данное свойство являлось общим для всех вспышек. Данные, полученные отечественными учеными, совпадали с материалами

¹⁸ Брунс, Гречко, Губарев и др. Результаты спектральных исследований солнечных активных областей... С. 14.

¹⁹ Брунс, Гречко, Губарев и др. Результаты исследований, проведенных с орбитальным солнечным телескопом ОСТ-1 станции «Салют-4»... С. 40.

²⁰ Брунс, Гречко, Губарев и др. Результаты спектральных исследований солнечных активных областей... С. 14.

наблюдений на *Skylab*. Измерение относительных интенсивностей линий ионов в ультрафиолетовой области позволило также сделать заключение о том, что электронная плотность в области вспышки превосходила 10^{12} см^{-3} , это согласовалось с данными, полученными по линии L_{α} ²¹.

Стигматические спектры, полученные сотрудниками КрАО, в отличие от астигматических, полученных на американской станции *Skylab*, не были засвечены соседними участками Солнца, что особенно важно для надежного определения фактических физических условий в плазме активной области, которая имела размер меньший, чем астигматическое расширение линий поперек спектра.

Наземные наблюдения флоккулов не отображали сильных движений этих образований: скорости обычно не превосходили несколько километров в секунду, редко достигая 10 км/с. Стигматичные ультрафиолетовые спектры позволяли получить больше информации о движении плазмы во флоккулах, так как многие сильные резонансные линии, возникавшие в переходном слое между хромосферой и короной, сконцентрированы в этой области спектра.

Важные сведения о скоростях движения плазмы содержит серия ультрафиолетовых спектрограмм яркого компактного флоккула, снятого 2 февраля 1975 г. в 14^h 10^m UT, расположенного в восточной части диска Солнца (флоккул № 13465 по классификации Национальной обсерватории Китт-Пик, США). Ученые КрАО наблюдали характерные зигзаги, указывающие на различные доплеровские сдвиги эмиссионных линий в разных частях флоккула. Величина сдвига варьировала от линии к линии, для некоторых линий сдвиг отсутствовал. Величины сдвига линий были измерены на микроскопе-компараторе относительно положений линий соседнего участка спокойного Солнца. Точность измерений скоростей составляла около 5–10 км/с. Линии нейтральных атомов (за исключением L_{α} водорода) показывали небольшие скорости движения, а некоторые слабые линии (образовавшиеся в нижней хромосфере) указывали на движение плазмы, направленное в противоположную сторону по отношению к движению ионов.

В большей степени была смещена центральная часть линии L_{α} , очень яркой резонансной линии 1206,5 Å Si III, линии 1175,7 и 977 Å C III. Оптически тонкие линии и линии промежуточной оптической толщи показывали четко выраженную зависимость увеличения скорости плазмы в верхних слоях хромосферы, где зафиксирована более высокая температура. Данный факт астрофизики проинтерпретировали как движение плазмы вдоль петли, основания которой связывали области флоккула противоположной полярности фотосферного магнитного поля. Зависимость скорости движения от температуры для опускающейся плазмы выражена нечетко, тем не менее обратная тенденция (убывание скорости с высотой) была прослежена.

²¹ Брунс А. В., Гречко Г. М., Губарев А. А., Северный А. Б., Стешенко Н. В. Исследование активных областей Солнца в ультрафиолетовой области спектра на «Салюте-4» // Внеатмосферные исследования активных областей на Солнце. Труды VIII консультативного совещания академий наук социалистических стран по физике Солнца (г. Иркутск, 21–25 июня 1976 г.) / Гл. ред. В. Е. Степанов. М.: Наука, 1976. С. 15.

Крымские астрофизики установили, что водородные линии лаймановской серии имели очень протяженные крылья с избыточной яркостью красного крыла по сравнению с синим. Это могло указывать на сжатие плазмы в определенной части вспышки. Изучение профилей линий L_a и L_b слабых вспышек и флоккулов показывает, что крылья линий расширены главным образом за счет штарк-эффекта и затухания излучения. В области образования крыльев этих линий электронная концентрация во вспышках и флоккулах $n_e = 2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, количество атомов водорода в основном состоянии в столбе сечением 1 см^2 $N_1 = 4 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$. В активных областях n_e в 10–100 раз больше, а N_1 в 10–100 раз меньше, чем в спокойной хромосфере. Следовательно, ионизация в активной области (слабые вспышки, флоккулы) в 10^2 – 10^4 раз больше, чем в спокойной хромосфере ²².

Во время исследования активных областей Солнца щель спектрографа пересекала области различной полярности магнитного поля. Изучение доплеровских сдвигов линий во флоккулах показало, что области противоположной полярности фотосферного магнитного поля связаны между собой через хромосферу и переходную область между хромосферой и короной петлями, по которым плазма перетекала из одной части активной области в другую. Согласно космическим и наземным наблюдениям, скорость направленных движений, а также хаотических («турбулентных») движений в нижних частях флоккулов составляла около 10 км/сек, а в верхних вследствие роста высоты – 80–100 км/с ²³.

Проведение астрофизического эксперимента ОСТ-1 было осложнено минимальной солнечной активностью. На поверхности Солнца учеными наблюдалось малое количество активных образований. Еще более редкими были такие явления, как вспышки. За проведение эксперимента и получение весомых результатов в области астрофизики присуждена правительственная награда – орден Трудового Красного Знамени. «За достигнутые успехи в развитии народного хозяйства» два участника эксперимента награждены золотыми, один серебряной и десять – бронзовыми медалями ВДНХ. Эксперимент ОСТ-1 значился как главный в программе орбитальной космической станции «Салют-4» и назывался Астрофизический эксперимент № 1. По «табелю о рангах» подобные успешно проведенные основные эксперименты космических запусков отмечались Государственной премией ²⁴. Для награждения премией составлялся список ученых, разработчиков и космонавтов орбитальных космических станций. Для включения в таковой ученых КрАО состоялась встреча директора обсерватории А. Б. Северного и руководителя разработки «Салюта» К. П. Феофистова. Андрей Борисович не поддержал Константина Петровича, поскольку ученые обсерватории уже были задействованы в создании «Щита Родины» и за участие в этом проекте могли быть удостоены Ленинской премии. КрАО, имевшая опыт в разработке космических телескопов, выдвинула предложение разработать новый оптический прибор с зеркалом большего размера, пригодный для наблюдения за ракетами в космосе. Ученые предполагали создать

²² Брунс, Гречко, Губарев и др. Результаты спектральных исследований солнечных активных областей... С. 3.

²³ Там же. С. 27.

²⁴ Брунс. Как это было. Орбитальный солнечный телескоп... С. 85–86.

звездный телескоп, подобный запущенному к тому времени на Западе телескопу «Коперник», а затем использовать разработку как зеркальный объектив для целей разведки. Прибор, способный заранее увидеть «рейгановские» ракеты, направленные на СССР, планировали создать за два-три года. В течение же некоторого времени после получения Государственной премии исследователи не могли быть удостоены Ленинской премии. Парадоксально, но Комитет по делам изобретений и открытий не выявил в эксперименте элементы новизны. Универсальность ОСТ-1, заключающаяся в размещении на станции «Салют-4» блоков телескопа на поверхности станции без собственной несущей конструкции, таковыми не была признана.

Тем не менее ученые КрАО внесли большой вклад в развитие советской космической программы. Ими был разработан и сконструирован крупнейший в мире управляемый космонавтами солнечный телескоп с фокусным расстоянием 2,5 м и рабочей апертурой 490 см², работавший в широком спектральном интервале от вакуумного ультрафиолета до инфракрасной области. Уникальный астрофизический комплекс ОСТ-1 отличался от всей созданной ранее оптической аппаратуры для проведения внеатмосферных экспериментов. Он не имел собственной единой механической конструкции, состоял из ряда отдельных блоков, содержащих логически законченные части оптической системы. В конструкцию H_{α} -камеры был впервые внедрен интерференционно-поляризационный фильтр, снабженный оригинальной системой терморегулирования и обеспечивающий при длине волны фильтра $\lambda = 656,3$ нм полосу 0,05 нм, полноценно функционировавший на орбите искусственного спутника Земли. Низкоабберационный ультрафиолетовый спектрограф с двойной монохроматизацией в сочетании с ОСТ-1, дававшим высококачественные изображения Солнца, впервые дал возможность получить стигматичные короткие ультрафиолетовые спектры, в которых участки спектральных линий по высоте спектра принадлежали соответствующим точкам изображения, передаваемым входной щелью.

Запуск астрофизического комплекса «ОСТ-1» ознаменовал начало широкого освоения нового спектрального диапазона в прикладной науке, а именно далекого ультрафиолета, включая вакуумный. Изучение сотрудниками КрАО ультрафиолетовых спектров солнечных образований позволило дать объективную оценку физическим условиям в последних на уровне верхней хромосферы и переходной зоны между хромосферой и короной. В системе был впервые применен теневой датчик ориентации, позволивший существенно упростить механическую часть системы и тем самым повысить ее общую надежность. К достижениям ученых КрАО можно отнести успешное проведение экспериментов по нанесению новых отражающих слоев на оба зеркала телескопа. Космонавтами первой экспедиции А. А. Губаревым и Г. М. Гречко было нанесено новое отражающее покрытие на главное зеркало, а космонавтами второй — П. И. Климуком и В. И. Севастьяновым — покрыто алюминием следящее зеркало.

Данные исследований, полученные в двух экспедициях на космической станции «Салют-4», были систематизированы, бортовые журналы и записи упорядочены. Материалы изысканий послужили основой для разработки методов оперативного и долгосрочного прогнозирования и определения радиационной обстановки в атмосфере в околоземном космическом пространстве. По

результатам эксперимента ОСТ-1 сотрудниками КрАО АН СССР создан каталог фотографий спектров, опубликованы более 12 печатных работ в отечественных и зарубежных журналах, сделаны шесть докладов на международных симпозиумах и конференциях и четыре сообщения на внутрисоюзных конференциях²⁵. Удачное проведение эксперимента ОСТ-1 обусловило начало работ над проектом «Астрон» под руководством А. А. Боярчука.

References

- Bruns, A. V. (1979) Ustroistvo orbital'nogo solnechnogo teleskopa stantsii "Saliut-4" [The Construction of the Orbital Solar Telescope at the Salyut-4 Station], *Izvestiia Krymskoi astrofizicheskoi observatorii*, vol. 59, pp. 31–56.
- Bruns, A. V. (1983) *Razrabotka kompleksa apparatury OST-1 i issledovanie Solntsa s borta stantsii Saliut-4. Dis. ... dokt. fiz. – mat. nauk* [The Development of OST-1 Equipment and Solar Studies at the Salyut-4 Station. Thesis for the Doctor of Physical and Mathematical Sciences Degree]. Moskva.
- Bruns, A. V. (1999) *Kak eto bylo. Orbital'nyi solnechnyi teleskop Krymskoi astrofizicheskoi observatorii* [How It Had Been. The Orbital Solar Telescope of the Crimean Astrophysical Observatory]. Nauchnyi: KRAO AN SSSR.
- Bruns, A. V. (2008) *Kak eto bylo: vneatmosfernye issledovaniia solntsa Krymskoi astrofizicheskoi observatorii* [How It Had Been: Exoatmospheric Solar Studies Conducted by the Crimean Astrophysical Observatory], in: Bruns, A. V. (ed.) *Iz istorii Krymskoi astrofizicheskoi observatorii. Sbornik rasskazov* [From the History of the Crimean Astrophysical Observatory. A Collection of Narratives]. Simferopol': ChernomorPRESS.
- Bruns, A. V., Grechko, G. M., Gubarev, A. A., etc. (1982) Rezul'taty issledovaniia, provedennykh s orbital'nym solnechnym teleskopom OST-1 stantsii "Saliut-4" [The Results of the Studies Conducted Using the Orbital Solar Telescope OST-1 at the "Saliut-4" Station], in: Sagdeev, R. Z. (ed.) *Kosmicheskaiia fizika: trudy VI nauchnykh chtenii po kosmonavtike, posviashchennykh pamiati vydaushchikhsia sovetskikh uchenykh – pionerov osvoiniia kosmicheskogo prostranstva* (Moskva, 11–15 ianvaria 1982 g.) [Space Physics: Proceedings of the 6th Cosmonautics Readings Devoted to the Memory of Outstanding Soviet Scientists, Pioneers of Space Exploration]. Moskva: IIET RAN, pp. 37–45.
- Bruns, A. V., Grechko, G. M., Gubarev, A. A., Klimuk, P. I., Sevastianov, V. I., Severnyi, A. B., Steshenko, N. V., and Feoktistov, K. P. (1979) Rezul'taty spektral'nykh issledovaniia solnechnykh aktivnykh oblastei na "Saliute-4" [The Results of Spectral Studies of Active Solar Zones, Conducted on "Salyut-4"], *Izvestiia Krymskoi astrofizicheskoi observatorii*, vol. 59, pp. 3–30.
- Bruns, A. V., Grechko, G. M., Gubarev, A. A., Severnyi, A. B., and Steshenko, N. V. (1976) Issledovanie aktivnykh oblastei Solntsa v ul'trafiolietovoi oblasti spektra na "Saliute-4" [Studies of Active Solar Zones in UV Region, Conducted on Salyut-4], in: Stepanov, V. E. (ed.) *Vneatmosfernye issledovaniia aktivnykh oblastei na Solntse. Trudy VIII konsul'tativnogo soveshchaniia akademii nauk sotsialisticheskikh stran po fizike Solntsa* (g. Irkutsk, 21–25 iunია 1976 g.) [Exoatmospheric Studies of Active Solar Zones. Proceedings of the 8th Consulting Session of the Socialist Countries' Academies of Science on Solar Physics (Irkutsk, June 21–25, 1976)]. Moskva: Nauka, pp. 12–15.
- Bruns, A. V., Sidorov, G. G., and Steshenko, N. V. (1979) Ul'trafiolietovyi spektrograf orbital'nogo solnechnogo teleskopa stantsii "Saliut-4" [Ultraviolet Spectrograph of the Orbital Solar Telescope on the Salyut-4 Station], *Izvestiia Krymskoi astrofizicheskoi observatorii*, vol. 59, pp. 57–63.
- Glushko, V. P. (ed.) (1985) *Kosmonavtika: entsiklopediia* [Cosmonautics: An Encyclopedia]. Moskva: Sovetskaia entsiklopediia.

²⁵ Брунс. Как это было: внеатмосферные исследования солнца... С. 65.