

УДК 523.94+520.6

**Измерение  
в проекте  
осцилляций  
«Марс-96»**      **яркости  
(эксперимент  
СОЯ)**

**А. В. Брунс**

Кримська астрофізична обсерваторія ДКНТ ПП України, Наукове

*Надійшла до редакції 05.08.96*

Описується експеримент СОЯ, який проводиться на борту міжпланетної станції «Марс-96». Експеримент призначається для вивчення внутрішньої будови Сонця засобом геліосейсмології. В основу досліду покладено вимірювання осцилляцій яскравості Сонця як зірки. Амплітуда коливань відносно їх середнього рівня складає величину порядку  $10^{-5}$ . Детектування такої малої величини ставить до вимірювальної апаратури дуже високі метрологічні вимоги. Приводиться опис конструкції пренизійного фотометра СОЯ.

Эксперимент СОЯ относится к области фундаментальных исследований, а именно к изучению строения ближайшей к нам звезды — Солнца. Интерес к Солнцу велик не только потому, что оно представляет собой гигантскую физическую лабораторию, в которой протекают процессы, недоступные для воспроизведения на Земле. Солнце определяет существование всего живого на Земле, подчиняя своим ритмам все процессы в биологическом мире, включая мир человека.

**ГЕЛИОСЕЙСМОЛОГИЯ — НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ  
В ФИЗИКЕ СОЛНЦА**

Одна из главных проблем современной физики Солнца состоит в изучении физических условий в солнечных глубинах. Существует три метода изучения внутреннего строения Солнца.

Первый, и до недавнего времени единственный, заключается в построении эволюционных моделей. Стандартные модели Солнца относятся именно к этому классу моделей. Эволюция Солнца рассчитывается в предположении начально однородного химического состава. Предполагается, что перемешивание вещества происходит только в конвективной зоне, так что при эволюции Солнца как звезды главной последовательности продукты термоядер-

ных реакций накапливаются в областях их образования, поэтому относительное начальное содержание тяжелых элементов берется таким, каким оно наблюдается на поверхности Солнца. делаются также и другие предположения с тем, чтобы получить модель, удовлетворяющую наблюдаемым значениям радиуса и светимости Солнца. Как видно из вышеизложенного, данный метод основывается на косвенной информации и использует множество допущений.

Вторым источником информации о внутреннем строении Солнца, а следовательно, основой метода его исследования, в особенности солнечного ядра, являются солнечные нейтрино. Нейтрино появляются в результате термоядерных реакций в центральных областях Солнца и практически не поглощаются его внешними слоями. Изучение спектрального состава нейтринного потока позволит сделать вывод о физических условиях в центре Солнца. К сожалению, из-за больших трудностей, возникающих при детектировании нейтрино, большинство нейтринных исследований практически находятся в начальной стадии.

Наряду с этими двумя методами исследование внутреннего строения Солнца можно проводить сейсмическими методами. Сейсмология Солнца, или гелиосейсмология, представляет собой новое направление исследований в солнечной физике,

имеющей целью создание модели внутреннего строения Солнца по наблюдаемым его собственным глобальным колебаниям. Во многом это направление аналогично исследованию сейсмическими методами внутреннего строения Земли.

В солнечной сейсмологии существует два способа использования полученных в результате наблюдений значений параметров колебаний.

Первый способ состоит в том, что наблюдения сопоставляются с предсказанными по той или иной модели внутреннего строения Солнца. В случае расхождений с экспериментальными данными проводится коррекция параметров модели до наилучшего совпадения.

Другой способ использует только гелиосейсмологические данные и решает обратную задачу сейсмологии — построение «сейсмической» модели внутреннего строения Солнца по частотам наблюдаемых колебаний. Для решения этой задачи требуется получить как можно более точный и полный набор собственных частот колебаний, распределение их амплитуд по радиусу и поверхности, которое описывается соответствующей сферической гармоникой или модой колебания.

В соответствии с силами, участвующими в колебании, принято разделять наблюдаемые осцилляции на акустические ( $p$ -моды) и гравитационные ( $g$ -моды). Акустические колебания обусловлены силами упругости солнечной плазмы и располагаются в короткопериодической области спектра с периодами порядка 3—8 мин (отсюда происходит исторически сложившийся термин «пятиминутные» колебания). Появление же гравитационных колебаний вызвано силами плавучести и располагаются они в области 15 мин и более.

Для определения параметров колебаний проводятся высокоточные измерения либо поля скоростей на поверхности Солнца, либо его яркости. В земных условиях предпочтение отдается измерениям поля скоростей по доплеровскому сдвигу линий в оптическом спектре, так как измерения яркости сильно обременены шумами от изменений прозрачности атмосферы. Наблюдаемые амплитуды отдельных мод колебаний скорости имеют значения порядка десятков см/с. Также малы и амплитуды колебаний яркости, которые составляют  $10^{-5}$ — $10^{-4}$  от ее среднего уровня. Для получения высококачественных сейсмических данных, кроме высокого отношения сигнал/шум, требуется непрерывность и большая длительность наблюдений. На Земле непрерывность наблюдений можно увеличить только созданием сети гелиосейсмических станций. Но даже в этом случае остаются перерывы, вызванные погодными условиями или слишком большим рас-

стоянием между соседними станциями. Возникают также проблемы, связанные с различием характеристик оборудования на разных станциях.

В первом внеатмосферном гелиосейсмологическом эксперименте ИФИР был установлен прибор на межпланетной станции «Фобос» и проведены измерения яркости Солнца на всей трассе перелета (Bruns, 1991; Bruns et al., 1991; Bruns, Shumko, 1991). Получен многомесячный непрерывный ряд наблюдений, не обремененный атмосферными помехами. Эксперимент проводился совместно учеными Давосской физико-метеорологической обсерватории (Швейцария, головной разработчик), института Космической астрофизики (Франция) и Крымской астрофизической обсерватории.

### ЗАДАЧА ЭКСПЕРИМЕНТА СОЯ

Эксперимент СОЯ предназначен для исследования Солнца методами гелиосейсмологии. Он предполагает измерение с высокой точностью солнечных осцилляций яркости от всего диска Солнца в узком спектральном диапазоне. Прибор СОЯ разработан и изготовлен в Крымской астрофизической обсерватории, а программа исследований предполагает как получение информации с борта КА, так и проведение одновременных наземных наблюдений в Крымской астрофизической обсерватории. В эксперименте также принимают участие ученыe Давосской физико-метеорологической обсерватории (Давос, Швейцария), института Космической астрофизики (Орсей, Франция) и Института ядерных исследований РАН. Свободные от атмосферных помех, непрерывные многодневные измерения с борта КА дадут возможность определить спектр солнечных осцилляций с высокой точностью. Проведение одновременных наземных наблюдений различными методами позволит выявить взаимосвязь явлений, наблюдавшихся на поверхности Солнца, с процессами, проходящими в его глубинах. С использованием наблюдений колебаний скорости, выполненных на Земле во время полета КА, будут получены значения фазового сдвига между колебаниями скорости и яркости для одинаковых мод, что даст дополнительную информацию о внутреннем строении Солнца.

Полученные данные являются основой для дальнейшего изучения внутреннего строения Солнца, уточняют его химсостав, распределение давления и строение его ядра, а совместное рассмотрение данных двух приборов СОЯ и ИФИР позволит проследить изменение физических параметров Солнца с 11-летним циклом его активности.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Как уже отмечалось, для исследования солнечных осцилляций используются наблюдения колебаний либо яркости Солнца, либо скорости его поверхности. В основу эксперимента СОЯ было положено измерение осцилляций яркости Солнца как звезды.

При разработке прибора внимание было обращено, с одной стороны, на получение высоких метрологических характеристик, с другой — на создание конструкции с оптимизированными эксплуатационными данными: вес, энергопотребление, простота управления и конструктивной привязки к КА.

Как уже говорилось, относительная амплитуда колебаний яркости составляет величину порядка  $10^{-5}$ . Детектирование такой малой величины предъявляет высокие метрологические требования к работе всех узлов и систем прибора, в частности к точности измерения временных интервалов и стабильности параметров приемника излучения.

Исходя из точностных требований к отсчету времени, периода исследуемых осцилляций и принципов обработки наблюдений, применяемых в гелиосейсмологии, время накопления сигнала фотометра выбрано равным 30 с.

В качестве фотоприемника используется высокочувствительный кремниевый фотодиод. Для уменьшения дрейфа характеристик фотометра вследствие изменения его температуры в приборе используется термостабилизация. Дополнительную ошибку в показания фотометра вносит неточность ориентации КА. На трассе перелета точность ориентации станции на Солнце составляет  $1.5^\circ$ . Дрейф станции в пределах этого угла повлечет за собой изменение регистрируемого потока только за счет изменения площади проекции на  $-0.2\%$ . В реальных условиях значение ошибки будет еще больше. Для обеспечения возможности введения соответствующей коррекции в последующую обработку результатов измерений фотометра, прибор снабжен двухкоординатным датчиком, выдающим значение координат Солнца в системе поля зрения прибора для каждого измерения фотометра. Точность отсчета угла не хуже  $0.5'$ . Для получения информации по двум координатам в датчике положения Солнца (ДПС) применены две идентичные измерительные системы, использующие ПЗС-линейки.

Фаза и амплитуда солнечных осцилляций яркости в большой степени зависят от длины волны. При выборе длины волны наблюдения для прибора СОЯ был использован наш опыт аналогичных измерений прибором ИФИР на КА «Фобос». При обработке полученных данных была выявлена сильная деградация фильтров в синей и зеленой

области и отсутствие таковой в красной области спектра. По этой причине в фотометре прибора СОЯ применен интерференционный фильтр с длиной волны  $\lambda = 862$  нм.

## БЛОК-СХЕМА ПРИБОРА

Блок-схема прибора представлена на рис. 1. Схема состоит из следующих функциональных блоков:

- солнечный фотометр СФ;
- датчик положения Солнца по двум координатам: ДПС-Х и ДПС-У;
- термостат ТС с нагревателем ( $t^\circ$ ), датчиками температур: стабилизации ТД1 и корпуса прибора ТД2;
- регистр суммирования и формирования информации РСФИ;
- буферный регистр БР;
- командно-програмное управление КПУ;
- интерфейс связи с телеметрическим каналом КА (RS-422).

## УСТРОЙСТВО ПРИБОРА

Световой поток, излучаемый Солнцем, попадая на солнечный фотометр (СФ), преобразуется в набор импульсов, количество которых пропорционально световому потоку. Эти импульсы накапливаются и поступают в двадцатиразрядный счетчик, расположенный в РСФИ, где происходит накопление всей информации одного цикла наблюдения.

Термостат ТС с помощью нагревателя ( $t^\circ$ ) поддерживает постоянной температуру солнечного фотометра, контролируя ее с помощью датчика ТД1.

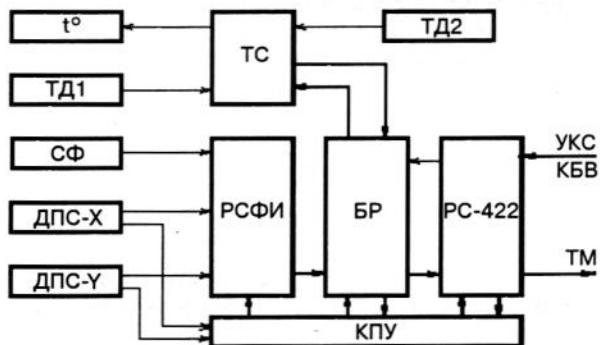


Рис. 1. Блок-схема прибора СОЯ

Значение этой температуры выбирается дискретно в зависимости от температуры корпуса прибора, измеренной датчиком ТД2. Диапазон рабочих температур термостата 0—60° С. Включение и выключение термостата производится по команде. Номер диапазона в виде трехбитового числа поступает в регистр БР. Двухкоординатный датчик положения Солнца ДПС измеряет координаты  $X$  и  $Y$  центра солнечного диска. Их измерение производится каждую секунду, т. е. 30 раз за время одного измерения яркости. Значение координат передается в регистр РСФИ в виде последовательности импульсов. Количество импульсов в этой последовательности, деленное на 30, соответствует среднему значению текущей координаты. Разрядность числа каждой координаты равна 10 бит. Регистр РСФИ собирает информацию в последовательном виде.

В течение первой 1/8 секунды цикла регистр передает накопленную за предыдущий цикл информацию параллельным кодом в буферный регистр БР и обнуляется. Сбор информации осуществляется в течение интервала, равного 29/8 с. За это время, одновременно с накоплением в РСФИ данных фотометра (20 бит) и данных ДПС (2×10 бит), в регистр БР заносятся также 3 бита — номер диапазона стабилизатора температуры ТС — и 3 бита разряда времени из полученного значения КБВ. По окончании 30-й с регистр РСФИ начинает новый цикл сбора информации.

Командно-программное устройство КПУ принимает сигналы бортового времени КБВ через интерфейс RS-422 и согласно их значениям вырабатывает сигналы управления всеми функциональными блоками прибора.

## КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА

Конструктивно прибор представляет собой прямоугольную коробку с размерами 262 × 120 × 90 мм. Входные оптические окна фотометра и датчика положения Солнца расположены на меньшей стороне параллелепипеда. Крепление прибора осуществляется с помощью четырех лап, расположенных по периметру в средней части блока. В этой же части блока расположен электрический разъем питания и интерфейса. Внутри корпуса прибора располагаются все его системы: оптические элементы, фотоприемники, а также все его электронные устройства.

Оптическая часть прибора состоит из трех отдельных систем: фотометра и двух идентичных датчиков по двум осям координат. Фотометр включает в себя бенду и фотодиод. В качестве фотоде-

тектора в координатном датчике применены две ПЗС-линейки, по 1024 элемента каждая, расположенные ортогонально и образующие систему координат  $X$ ,  $Y$  поля зрения прибора. Сопряжение прибора СОЯ с внешней системой сбора и передачи телеметрической информации происходит через сбалансированный последовательный интерфейс RS-422. В этом интерфейсе используется асинхронно-синхронная передача данных.

## СОЛНЕЧНЫЙ ФОТОМЕТР

Солнечный фотометр СФ предназначен для высокоточного измерения светового потока, излучаемого Солнцем в узком спектральном интервале, и выдачи результатов измерения в цифровой форме. Он состоит из кремниевого фотодиода ФД, в качестве детектора, усилителя УС и аналого-цифрового преобразователя АЦП (рис. 2). Перед фотодиодом установлен интерференционный фильтр ИФ с полосой пропускания 5 нм на длине волны  $\lambda = 862$  нм.

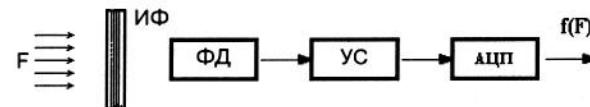


Рис. 2. Функциональная схема солнечного фотометра

Каждое измерение является результатом интегрирования текущего значения входного сигнала фотометра за время 29 с. Выходной ток фотодиода ФД, усилившийся в усилителе УС, поступает в АЦП-преобразователь. Схема, осуществляющая интегрирование и формирующая в цифровом виде результат каждого измерения, расположена в блоке РСФИ. Считывание и обнуление счетчика происходит по сигналам из командно-программного устройства.

## ТЕРМОСТАТ

Термостат предназначен для выбора величины рабочей температуры элементов солнечного фотометра и дальнейшего поддержания ее стабильной с требуемой точностью. В соответствии с изложенным схему термостата можно разбить на две основных системы (рис. 3):

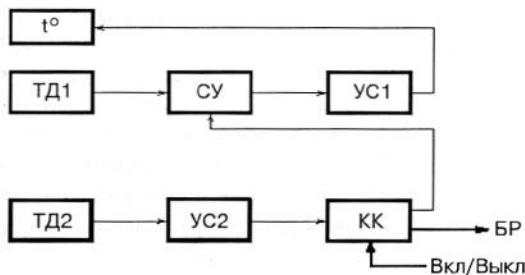


Рис. 3. Функциональная схема стабилизатора температуры

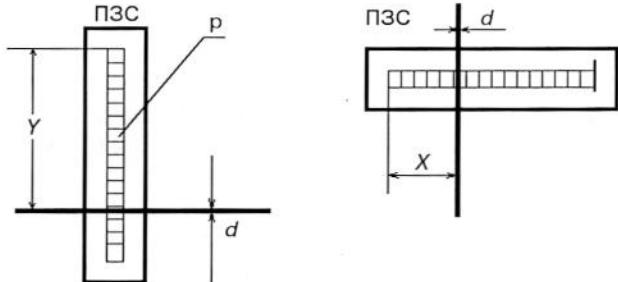


Рис. 4. Схема расположения координатных ПЗС-линеек

- термостабилизатор фотометра СтФ;
- схема выбора диапазона стабилизации ВДС.

Термостабилизатор фотометра состоит из температурного датчика ТД1, усилителя сигнала датчика УС1 и нагревательного элемента ( $t^\circ$ ). Датчик ТД1 установлен на тепловой массе фотометра, его сигнал в суммирующем устройстве СУ складывается с сигналом ВДС поправки, соответствующей выбранному значению температуры стабилизации, и поступает в УС1. Выходной ток усилителя, протекая через нагревательный элемент ( $t^\circ$ ), увеличивает температуру фотометра. Его охлаждение может происходить только в результате оттока тепла на корпус станции. Для протекания этого процесса необходимо, чтобы температура фотометра была выше температуры корпуса прибора. Вместе с тем для уменьшения энергопотребления прибора величина превышения не должна быть большой. Поэтому значение температуры фотометра выбирается дискретно в зависимости от естественно устанавливющейся в полете равновесной температуры корпуса прибора, измеренной датчиком ТД2. При выполнении условия температура стабилизации превышает равновесную температуру корпуса на 5–10 °C, термостабилизация может осуществляться на одном из семи различных уровнях номинального значения температуры около 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 °C. Схема выбора диапазона стабилизации фотометра состоит из установленного на корпусе прибора температурного датчика ТД2, усилителя УС2 и комплекта компараторов КК. Сигнал температурного датчика, усиленный усилителем УС2, с помощью комплекта компараторов КК задает уровень постоянного напряжения, подаваемого на сумматор СУ, определяя тем самым диапазон температуры стабилизации фотометра. Включение и выключение термостата производится по команде с Земли. Номер диапазона в виде трехбитового числа поступает в регистр БР.

#### ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ СОЛНЦА

Основу ДПС составляют две ПЗС-линейки, по 1024 пикселя  $p$  (рис. 4) каждая, расположенных ортогонально и образующих систему координат  $X$ ,  $Y$  поля зрения прибора. Перед каждой линейкой на расстоянии 180 мм располагается оптическая щель шириной 0.2 мм, проектирующая подобно цилиндрической линзе изображение Солнца, растянутое в виде полоски шириной  $d$ . Щель ориентирована по отношению к ПЗС таким образом, что световая полоска перпендикулярна к линейке. В зависимости от положения Солнца по отношению к системе щель — линейка, освещается та или иная группа пикселов. Количество одновременно освещенных пикселов определяется размером изображения Солнца (шириной полоски  $d$ ) и будет изменяться в процессе перелета в зависимости от расстояния станции от Солнца. За значение координаты  $X$  или  $Y$  принимается число пикселов соответствующей матрицы между первым, принятым за начало отсчета, и центральным пикселом освещенной зоны. Измерение по обеим координатам проводится одновременно.

По обеим осям ДПС работают идентичные электронные системы, снабженные общим устройством управления. На рис. 5 изображена блок-схема ДПС по одной координате.

Информация о распределении освещенности вдоль линейки ПЗСрабатывается на ее фоторегистре ФР. При подаче с устройства управления УУ команды на считывание, с выхода транспортного регистра ТР матрицы информация о величине освещенности каждого пикселя поступает на амплитудный анализатор-формирователь АА. Количество импульсов в сформированной им последовательности соответствует текущей координате.

За время одного цикла измерения фотометра,

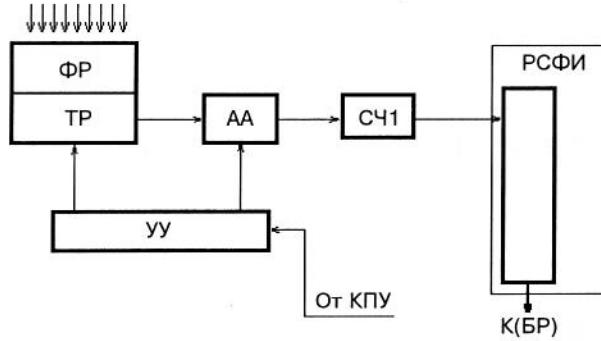


Рис. 5. Блок-схема ДПС по одной координате

равного  $297/8$ , с происходит 30 отсчетов текущей координаты по каждой из осей. Отсчеты происходят через 1 с, в момент прихода метки  $1/2$  с. Все отсчеты поступают и накапливаются на двух соединенных последовательно двоичных счетчиках: 4- и 10-разрядных (соответственно СЧ1 и СЧ2). Показания 10-разрядных счетчиков входят в блок информации одного цикла измерения.

#### ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

|                            |                 |
|----------------------------|-----------------|
| Поле зрения фотометра      | $\pm 1.5^\circ$ |
| Длина волны фильтра        | 862 нм          |
| Полоса пропускания фильтра | 5 нм            |
| Поле зрения ДПС            | $\pm 2.0^\circ$ |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| Число элементов ПЗС-линейки              | 1024 пикселов             |
| Точность отсчета угла                    | $30''$                    |
| Время накопления сигнала                 | $297/8$ с                 |
| Напряжение питания                       | U1 = +15 В,<br>U2 = -15 В |
| Потребляемая мощность                    | 3.0 Вт                    |
| Масса прибора без соединительного кабеля | 1.2 кг                    |
| Габаритные размеры прибора               | 90×120×262 мм.            |

Bruns A. V. Some peculiarities of the power spectrum of the 5-min solar brightness oscillations // Solar Physics.—1991.—133.—P. 89—94.

Bruns A. V., Bonnet R. M., Delaboudiniere J. P., et al. The helioseismology experiment on the planetary mission "Phobos" // Bull. Crim. Astrophys. Obs.—1991.—N 83.—P. 22—33.

Bruns A. V., Shumko S. M. Short term variability of the power spectrum of 5-min oscillations of the Sun // Planet. Sci.—1991.—39, N 1/2.—P. 41—46.

---

#### MEASUREMENT OF BRIGHTNESS OSCILLATIONS ON THE SUN ON BOARD "MARS-96" SPACECRAFT (SOYA EXPERIMENT)

A. V. Bruns

The experiment SOYA conducted on board interplanetary station "Mars-96" is described. The experiment is intended for studying the internal solar structure by helioseismology methods. The experiment is based on the measurement of brightness oscillations on the Sun as a star. The amplitude of brightness fluctuations with respect to the average level is of order of  $10^{-5}$ . Detection of such small oscillations presents very high metrological requirements to the device. The design of the high-precision photometer SOYA is described.