

УДК 520.6.07:523.92

## Гелиосейсмологический эксперимент КОРОНАС-ДИФОС

Р. И. Костык<sup>1</sup>, И. Г. Кесельман<sup>1</sup>, С. Н. Осипов<sup>1</sup>,  
Н. И. Лебедев<sup>2</sup>, В. Н. Ораевский<sup>2</sup>, Ю. Д. Жугжда<sup>2</sup>, И. Н. Копаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

<sup>2</sup>Інститут земного магнетизму та розповсюдження радіохвиль РАН, Тройцьк

*Надійшла до редакції 02.04.96*

---

Приводиться опис сонячного телескопа-фотометра ДИФОС, призначеного для реєстрації глобальних коливань яскравості Сонця на орбітальній станції КОРОНАС, виведеної на орбіту 2 березня 1994 р. Обговорюються попередні результати спостережень, одержані за допомогою цього фотометра.

---

### ВВЕДЕНИЕ

В марте 1994 г. на орбиту был выведен космический аппарат КОРОНАС (Oraevsky, Zhugzhda, 1991), предназначенный для изучения Солнца и солнечно-земных связей в рамках совместного проекта России и Украины. Орбита станции — полярная, квазисинхронная, поэтому каждые три месяца на протяжении 20 дней КА не заходит в тень Земли. Высота орбиты 500 км, наклон 82.5°, точность ориентации на центр Солнца — не хуже 10'.

Орбитальная станция КОРОНАС предназначена для изучения двух основных проблем солнечной физики — внутреннего строения Солнца и различных процессов в солнечных вспышках.

Среди приборов, расположенных на платформе станции (рис. 1), находится и телескоп-фотометр ДИФОС (Gurtovenko et al., 1994), изготовленный в Главной астрономической обсерватории НАНУ, Институте земного магнетизма и распространения радиоволн РАН и Физико-механическом институте НАНУ, предназначенный для регистраций колебаний яркости Солнца. Сравнительно малые вариации светимости Солнца могут быть хорошей основой для диагностики внутреннего строения Солнца. Эта методика получила недавно название гелио-

сейсмологии.

Нейтринный эксперимент Девиса показал, что наши представления о строении Солнца еще несовершенны. На сегодняшний день выдвинуты несколько гипотез для объяснения результатов Девиса, однако проблема окончательно не решена. Поэтому крайне необходимы исследования строения Солнца независимыми методами. Здесь большие надежды возлагаются на гелиосейсмологию. Наземные гелиосейсмологические наблюдения сталкиваются с двумя препятствиями. Первое — влияние земной атмосферы, которая увеличивает уровень шума и не позволяет с нужной точностью регистрировать чрезвычайно слабые сигналы колебаний яркости (~0.001 %). Второе — невозможность длительных рядов наблюдений из-за ночных перерывов, что сильно ограничивает спектральное разрешение, необходимое для изучения расщепления и смещения отдельных мод солнечных колебаний.

Внеатмосферные гелиосейсмологические наблюдения были предприняты со спутников СММ, а также во время миссии «Фобос». Эксперимент ACRIM на спутнике СММ не был специально ориентирован на измерение колебаний, а наблюдения с борта «Фобоса» были затруднены из-за низ-

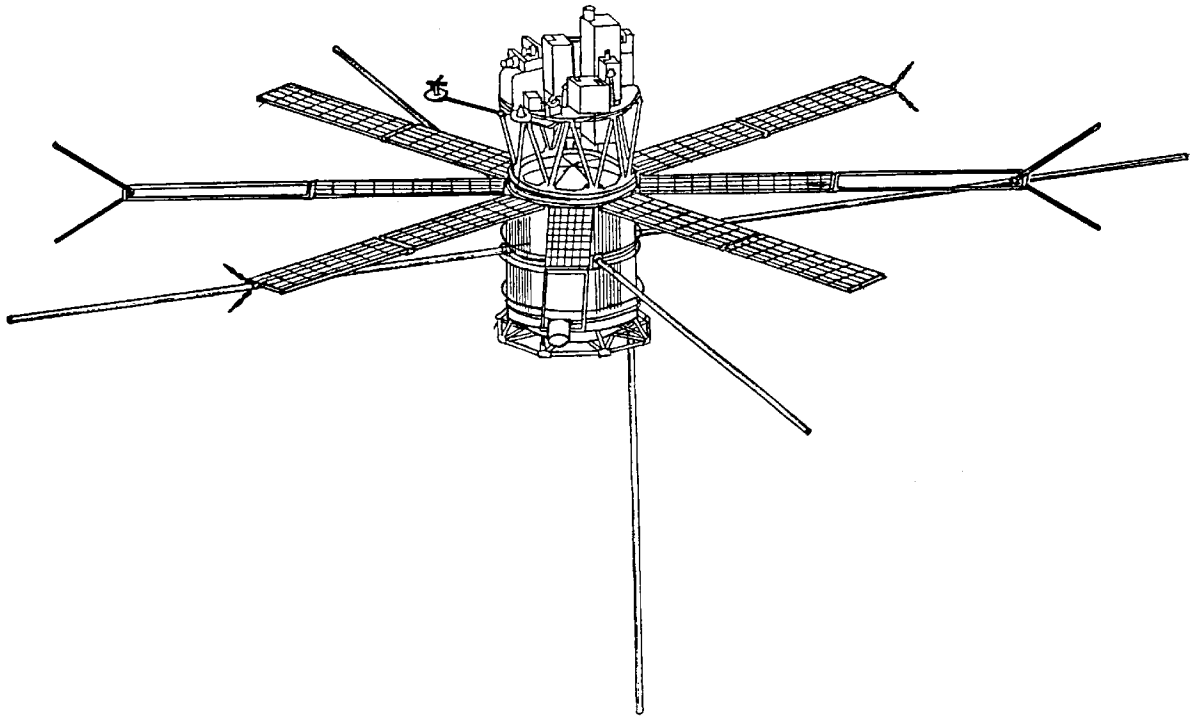


Рис. 1. Космический аппарат КОРОНАС

кой точности ориентации станции на Солнце.

Телескоп ДИФОС предназначен для регистрации интенсивности солнечного излучения от всего диска. При этом происходит наибольшее пространственное усреднение и достигается высокое отношение сигнала к шуму. Однако анализу доступны лишь собственные колебания Солнца низких степеней  $l \leq 3$ , так как колебания с более высокими  $l$  взаимно компенсируются.

В ходе осуществления проекта КОРОНАС-ДИФОС предполагается:

- 1) получить продолжительные высококачественные измерения солнечного излучения и его вариаций;
- 2) определить частоты, амплитуды и фазы р-мод солнечных колебаний в диапазоне от 1 до 5 мГц;
- 3) установить, изменяются ли параметры колебаний с 11-летним циклом солнечной активности;
- 4) подтвердить или опровергнуть существование g-мод солнечных колебаний;
- 5) использовать найденные характеристики колебаний для построения модели строения Солнца и

определения значений скорости звука, распределения плотности и скорости вращения внутренних слоев Солнца.

#### ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ФОТОМЕТРА ДИФОС

Прибор состоит из трех идентичных каналов, оптические оси которых параллельны и размещены в углах равностороннего треугольника. Расстояние между осями равно 25 мм. Непрерывное измерение интенсивности интегрального по диску Солнца светового потока осуществляется в трех оптических спектральных каналах:  $\lambda$  550 нм с шириной полосы пропускания 105 нм,  $\lambda$  750 нм с шириной полосы пропускания 100 нм (формируются оптическими фильтрами);  $\lambda\lambda$  400—1100 нм (определяется спектральной характеристикой фотодиода). Конструкция каналов в сечении фотометра плоскостью, содержащей оптические оси любой пары каналов приведена на рис. 2.

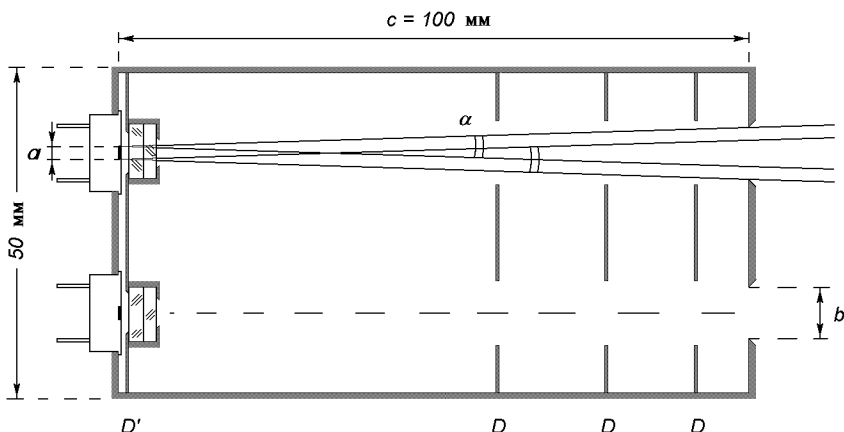


Рис. 2. Конструкция телескопа-фотометра ДИФОС

При изготовлении фотометра, кроме ограничения его веса и габаритов, учитывались следующие факторы.

1. Светочувствительная поверхность фотоприемника  $a$  (диаметр поверхности 2 мм) во время эксперимента должна освещаться потоком от всего диска Солнца. В то же время угол зрения  $\alpha$  из центра светочувствительной поверхности в направлении оптической оси должен быть максимально ограничен, чтобы избежать возможной паразитной засветки от других объектов и уменьшить нагрев корпуса фотодиода.

2. При расчете угла  $\alpha$  необходимо учитывать точность центрировки входных отверстий  $b$  на корпусе фотометра и центрировке отверстий  $a$  фотодиодов (в обоих случаях это составляет 0,2 мм), а также погрешность установки фотометра на платформу спутника (несколько угловых минут).

3. На светочувствительную поверхность  $a$  фотодиода не должен попадать свет, прошедший через входное отверстие в двух остальных каналах.

4. Коэффициенты пропускания фильтров могут немного различаться в разных местах их поверхности. Ограниченная точность ориентировки оси спутника на Солнце ( $10'$ ) может вызвать ложный эффект в сигнале.

С учетом факторов, указанных в пунктах 1 и 2 при габаритах фотометра, приведенных на рис. 2, угол зрения  $\alpha = 2 \arctg(b - a) / (2c)$  принят равным  $200'$ , а размер входных отверстий фотометра  $b = 8$  мм. Для выполнения условий, указанных в пункте 3, внутри корпуса фотометра установлена система диафрагм  $D$ , которые действуют так же, как и ловушка рассеянного света. Для уменьшения возможных эффектов, указанных в пункте 4, фильтры помещены непосредственно перед фотоди-

одом. Диафрагма  $D'$ , установленная перед фильтрами, рассчитана таким образом, чтобы ее отверстия пропускали во время эксперимента поток от всего диска Солнца даже при максимальных качаниях оси спутника. Кроме того, она уменьшает нагрев корпуса фотодиода.

Масса телескопа ДИФОС — 5,5 кг; размеры блока фотоприемников —  $130 \times 130 \times 505$  мм; блока электроники —  $120 \times 180 \times 210$  мм. Мощность, потребляемая от бортовой сети электропитания — 25 Вт.

#### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АППАРАТУРЫ

Во всех трех каналах светоприемниками являются кремниевые фотодиоды ФД-293 с областью чувствительности 400—1100 нм. Спектральные полосы пропускания каналов приведены на рис. 3. Светоприемники установлены на автономной платформе, обеспечивающей с высокой точностью равенство их температур и одновременно хорошую изоляцию от корпуса фотометра. Для исключения влияния изменений температуры на чувствительность фото-

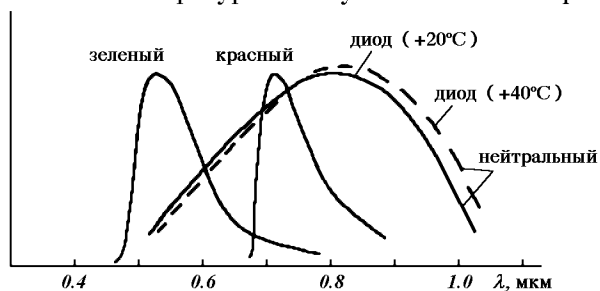


Рис. 3. Спектральные полосы пропускания каналов фотометра

приемников в приборе применена система активного термостатирования нагревательного типа с адаптивной установкой температуры посредством предварительного измерения температуры окружающей среды  $T_e$ . Термостатирование происходит при  $T_1 = T_e \pm 3$  К. Датчиком температуры служит термодиод, установленный на платформе фотоприемников и имеющий с ними хороший тепловой контакт.

Терморегулятор представляет собой систему пропорционального регулирования состоящую из датчика, преобразующего температуру термодиода в напряжение, цифро-аналогового преобразователя, который преобразует входной код, соответствующий требуемому значению температуры термостатирования, в напряжение; усилителей рассогласования и мощности; плоского нагревателя, прикрепленного к платформе фотодиодов и контроллера.

Преобразование фототока в эквивалентный цифровой код осуществляется трехканальным параллельным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) интегрирующего типа. Так как фотометр предназначен для измерения вариаций яркости Солнца относительно его среднего значения, то АЦП сделан как преобразователь дифференциального типа. Для этого вводится дополнительный эталонный ток компенсации, соответствующий среднему значению фототока с последующим измерением отклонений сигнала от среднего значения. Предусмотрены два диапазона регистрации измерений — грубый и точный. На грубом диапазоне фототок уменьшается в два раза. Для увеличения отношения сигнал/шум в АЦП используется усреднение 160 измерений с интервалом 0.1 с, что обеспечивает относительную разрешающую способность не хуже 1/40000. Проверка функциональной работоспособности и основных метрологических характеристик (стабильности нуля и коэффициента преобразования АЦП) осуществляется встроенным в фотометр генератором эталонных токов. Конструктивно аналоговая часть АЦП размещена в двойном электромагнитном экране из сплава с высокой магнитной проницаемостью.

#### ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ СВЕТОПРИЕМНИКОВ

Для обеспечения максимальной точности измерений при освещении солнечным потоком рабочий ток фотодиодов должен находиться в пределах 80—160 мА. Для обеспечения этого требования необходимо выровнять нейтральными светофильтрами потоки во всех трех каналах фотометра таким образом, чтобы необходимое значение фототока

достигалось при прямом освещении Солнцем в заатмосферных условиях.

С этой целью перед главным зеркалом горизонтального солнечного телескопа АЦУ-5 ГАО НАН Укаины в невиньетированном световом пучке устанавливался прибор ДИФОС и ориентировался вдоль оптической оси телескопа. Ослабление регистрируемого тока в фотодиодах по сравнению с предполагаемым заатмосферным значением определяется ослаблением при отражении на зеркалах целостатной группы и поглощением земной атмосферы. Ослабление потока при отражении на целостате незначительно и легко учитывается. Для учета влияния поглощения земной атмосферы необходимо в течение всего светового дня измерять величину фототока при различных воздушных массах. Методом Бугера определяется прозрачность земной атмосферы и экстраполируется заатмосферное значение фототока. Затем для каждого из трех фотодиодов подбирались дополнительные нейтральные светофильтры таким образом, чтобы величины фототоков не отличались между собой более чем на 10 %.

Отладка фотометра и его испытание проводились с помощью специально изготовленного стабильного источника света, освещающего фотоприемники с интенсивностью, близкой к солнечной.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Телескоп ДИФОС проработал на орбите 52 дня — с 4 марта по 7 мая 1994 г. Данные об интенсивности излучения передавались со станции КОРОНАС по двум независимым системам телеметрии, что позволило восстановить методом сравнения поте-

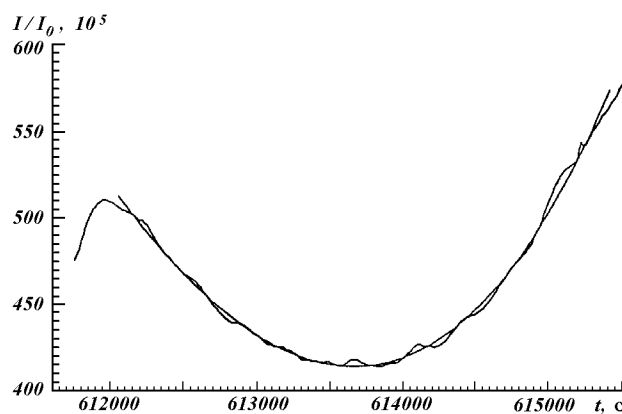


Рис. 4. Зависимость интенсивности солнечного излучения от времени в спектральном канале 400—1100 нм

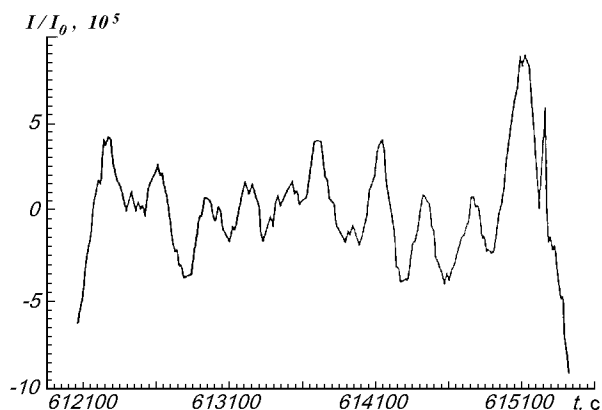


Рис. 5. Вариации интенсивности солнечного излучения после исправления за рассеянный свет

рянные данные при сбоях в какой-либо системе телеметрии. Все системы и функциональные узлы работали в штатном режиме. Потери не превышали 10 % времени и были связаны в основном с качеством приема телеметрии на приемных пунктах. Анализ полученной информации показал хорошее качество наблюдательных данных. Относительная разрешающая способность фотометра равна  $2 \cdot 10^{-5}$ .

Результатом обработки данных стало построение амплитудных спектров р-мод собственных колебаний Солнца в диапазоне 1—5 мГц (Lebedev et al., 1995).

На рис. 4 приведена зависимость интенсивности солнечного излучения от времени в спектральном канале  $\lambda \lambda$  400—1100 нм. Можно видеть, что после выхода станции из тени в течение приблизительно шести минут происходит ее ориентирование на центр Солнца. Тренд, по-видимому, объясняется рассеиванием части отраженного от поверхности Земли солнечного света, попавшего в прибор. Величина тренда составляет примерно 0.5 %. Тренд хорошо аппроксимируется полиномом третьей степени. Вариации интенсивности после вычитания тренда приведены на рис. 5. Острый пик в конце записи обусловлен, скорее всего, резким изменением ориентации станции в момент разгрузки маховика системы ориентации. Величина вариаций интенсивности солнечного излучения составляет примерно 0.005 % от полного потока с периодом около 5 мин. На рис. 6 приведены амплитудные спектры флюктуаций интенсивности за два дня наблюдений (витки 938—968) для трех спектральных каналов. На всех спектрах видны моды колебаний степени  $l = 1$  и радиальных порядков  $n = 18—22$ . Относительная амплитуда колебаний составляет около  $1/100000$  яркости Солнца. На рис. 7 видна динамика

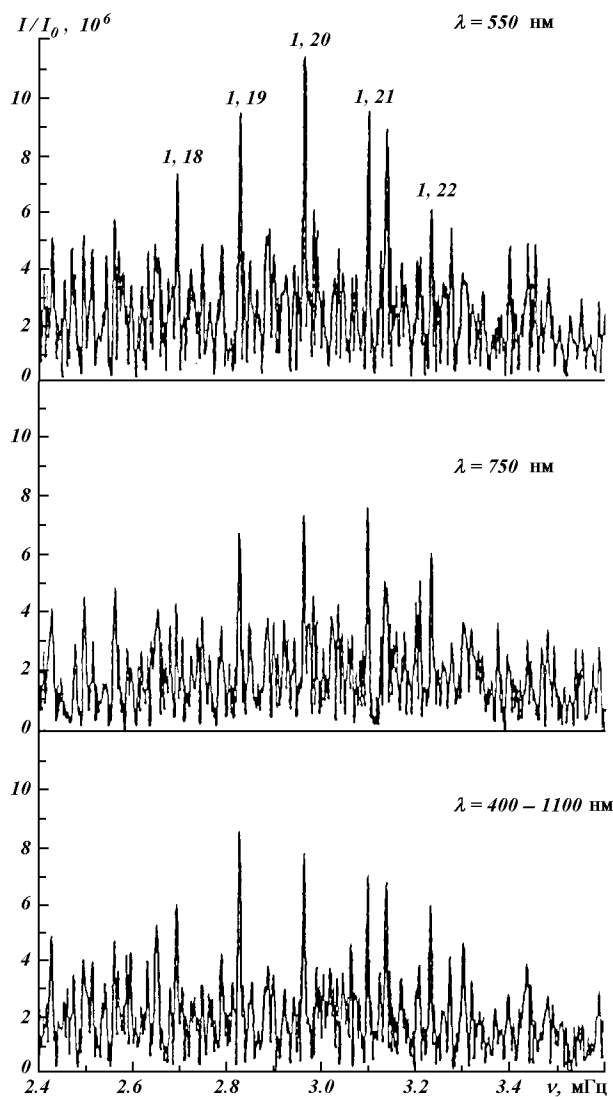


Рис. 6. Спектры мощности глобальных колебаний Солнца в области периода 5 мин за два дня наблюдений (витки 938—968) для трех спектральных каналов. На всех трех спектрах видны акустические моды (р-моды) колебаний степени  $l = 1$  и радиальных порядков  $n = 18—22$ .

ка колебаний. Спектры за последовательные двухдневные интервалы наблюдений, сдвинутые на  $2/3$  суток каждый, помещены снизу вверх друг над другом. Мода колебаний с  $l = 1$  и  $n = 19$  находится на стадии возбуждения, в то время как мода с  $l = 1$  и  $n = 23$  затухает. Колебание с  $l = 1$  и  $n = 20$  сохраняется в течение данного интервала наблюдений без видимых изменений. Суммарный амплитудный спектр двухдневных спектров за общее время 15 суток приведен на рис. 8 вверху. Наклон спектра

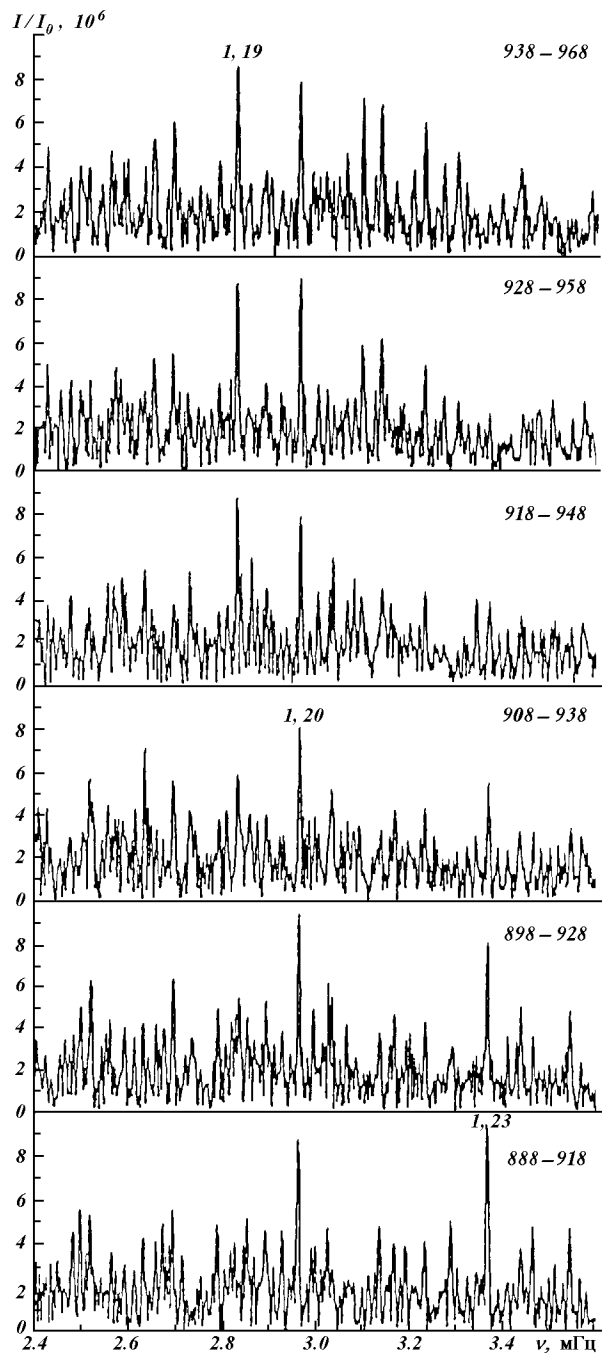


Рис. 7. Динамика колебаний ( $\lambda = 400\text{--}1100$  нм). Мода с  $l = 1$  и  $n = 19$  находится на стадии возбуждения, а мода с  $l = 1$  и  $n = 23$  затухает. Колебание с  $l = 1$  и  $n = 20$  остается без видимых изменений

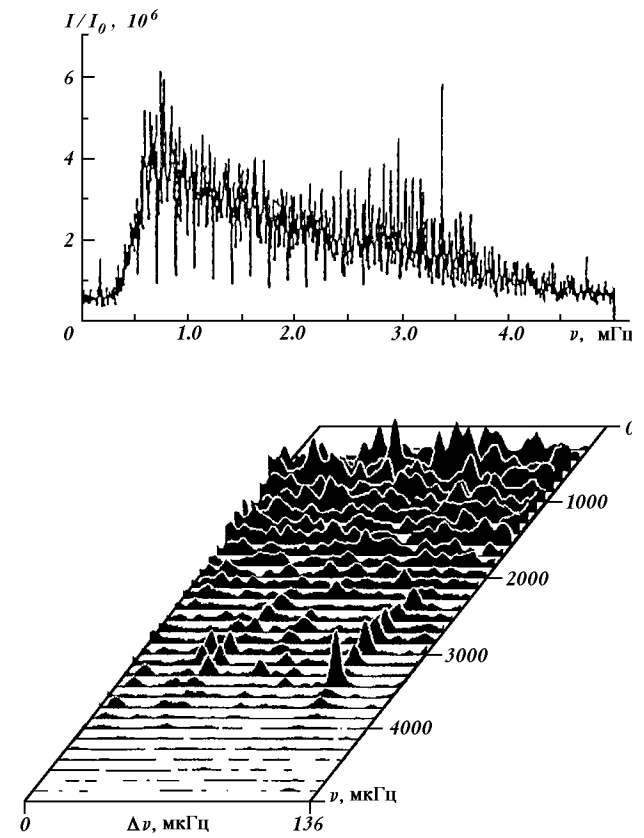


Рис. 8. Спектр мощности глобальных колебаний за общее время 15 сут (вверху) и эшель-диаграмма этого спектра ( $\lambda = 400\text{--}1100$  нм)

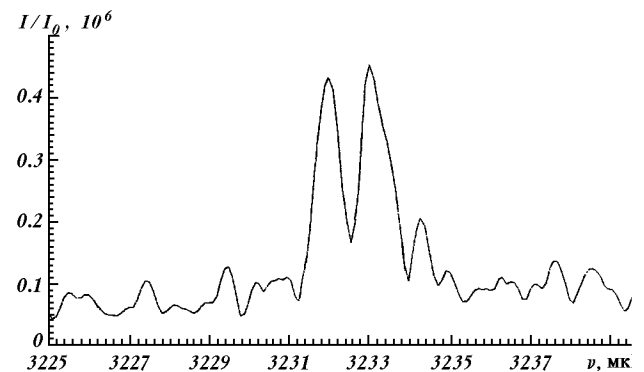


Рис. 9. Тонкая структура колебания с  $l = 1$ ,  $n = 22$ .  $\lambda = 400\text{--}1100$  нм

имеет зависимость приблизительно  $1/f$ , которая характерна для шумового сигнала. Увеличение амплитуды составляющих спектра в области 2.5—3.5 мГц обусловлено наличием р-мод собственных колебаний. Уменьшение уровня шума для частот  $\nu < 0.7$  мГц вызвано исключением из спектра низкочастотных трендов. На этом же рисунке внизу показана эшель-диаграмма верхнего спектра. На рис. 9 показана тонкая структура колебания с  $l = 1$  и  $n = 22$ . Расщепление колебания обусловлено вращением ядра Солнца. Обратим внимание на асимметричность профилей отдельных пиков.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительные результаты обработки наблюдательных данных показали, что относительная разрешающая способность телескопа равна  $2 \cdot 10^{-5}$ .

Получены высококачественные спектры р-мод глобальных колебаний яркости Солнца. Мы наде-

мся, что при последующих экспериментах серии КОРОНАС-ДИФОС будет полностью реализована программа, описанная в начале этой статьи.

Gurtovenko E. A., Keselman I. G., Kostik R. I., et al. Photometer DIFOS for the study of solar brightness variations // *Solar Phys.*—1994.—152, N 1.—P. 43—46.

Lebedev N. I., Oraevsky V. N., Zhugzhda Yu. D., et al. First results of the CORONAS-DIFOS experiment // *Astron. and Astrophys.*—1995.—296, N —P. L25—L28.

Oraevsky V.N., Zhugzhda Yu.D. Project CORONAS-I // *CORONAS Information* N 1.—1991.

---

#### HELIOSEISMOLOGICAL CORONAS—DIFOS EXPERIMENT

*R. I. Kostyk, I. G. Keselman, S. N. Osypov, N. I. Lebediev, V. N. Oraevsky, Y. D. Zhugzhda, I. M. Kopaiev*

The solar photometer DIFOS was developed for measurements of the irradiance fluctuations due to global solar oscillations. The photometer is installed on the orbital observatory CORONAS launched on March 2, 1994. Preliminary results of the DIFOS experiment are presented.