

УДК 523.9

Фазовые характеристики акустических р-мод низких степеней осцилляций яркости Солнца по данным космических экспериментов “Дифос-Коронас-Ф” и “SOHO-Virgo/SPM”

С.Н. Осипов

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680, Киев-127, ул. Академика Заболотного, 27

Поступила в редакцию 27 февраля 2007 г.

Аннотация. Приводятся результаты исследований фазовых сдвигов 5-минутных колебаний яркости всего диска Солнца между различными спектральными каналами орбитального фотометра ДИФОС, установленного на борту космического аппарата Коронас-Ф. Проведено сравнение результатов с данными миссии SOHO-Virgo/SPM. Показано, что данные ДИФОС-Ф и Virgo/SPM хорошо согласуются в номинально одинаковых каналах. Обнаружено, что на монотонном ходе изменений фаз колебаний с длиной волны спектрального канала существуют фазовые изломы в спектральных участках 350–400 нм и 1100–1500 нм. Анализируются возможные причины такого поведения фаз.

PHASE CHARACTERISTICS OF ACOUSTIC LOW-DEGREE P-MODES OF SOLAR BRIGHTNESS OSCILLATIONS MEASURED ABOARD SPACE PHOTOMETERS “DIFOS-CORONAS-F” AND “SOHO-VIRGO/SPM”, *by S.N. Osipov*. The results of investigations of phase shifts of 5-minute brightness oscillations of the whole solar disk between spectral channels of space photometer “DIFOS-CORONAS-F” are given. The comparison of the results with SOHO-Virgo/SPM mission data is fulfilled. It is shown, that DIFOS-F and Virgo/SPM data agree in nominal identical channels. The presence of phase breaks at 350–400 nm and 1100–1500 nm in monotonous phase course is revealed. The possible reasons of such a phase behavior are analyzed.

Ключевые слова: Солнце, гелиосейсмология, р-моды, фазы

1 Введение

6 декабря 2005 года закончилась миссия космической исследовательской платформы Коронас-Ф, которая длилась 1 588 суток. Орбитальный фотометр ДИФОС-Ф (Костык, 2003), установленный на этой платформе и являющийся общим проектом Главной астрономической обсерватории НАН Украины и ИЗМИР Российской академии наук, успешно функционировал все это время. На Землю передавались данные колебаний яркости всего диска Солнца в шести спектральных каналах (от 350 нм до 1.5 мкм). Расчетная орбита спутника – квазисинхронная с высотой 500–550 км и периодом вращения вокруг Земли 94.86 минуты.

Исследование изменений фаз пятиминутных колебаний Солнца в зависимости от высоты его атмосферы важно для понимания условий прохождения таких волн через атмосферу. Причем, если колебания р-мод высоких степеней l доступны с помощью наземных

наблюдений, то колебания р-мод низких степеней, вследствие низкой мощности, доступны наземными методами только для исследований осцилляций скорости. Осцилляции яркости для мод низких степеней l имеют амплитуду всего лишь 10^{-4} – 10^{-5} , поэтому даже наиболее тщательные попытки исследования фазовых зависимостей для таких колебаний с помощью наземных телескопов (Хименес и др., 1988) можно считать неудачными, т. к. они не выявили каких-либо фазовых сдвигов между колебаниями яркости, измеренными в разных диапазонах спектра Солнца.

Измерения колебаний яркости всего диска Солнца внеатмосферными методами проводились на борту межпланетной станции ФОБОС в эксперименте IPHIR (1988–1989 гг.) в областях спектра 335, 500 и 865 нм (Брунс, Шумко, 1990; Фрелих, 1990). В работе (Шрайвер и др., 1991), на основе рядов данных длиной 155 суток, удалось изучить сдвиги фаз между каналами 500 и 865 нм, т. е. только для нижней фотосферы. Выявлена зависимость сдвига фаз от частоты. С 1995 г. по настоящее время в точке Лагранжа функционирует и международная солнечная космическая обсерватория SOHO, на борту которой работает телескоп Virgo/SPM (Фрелих и др., 1999), измеряющий осцилляции яркости всего диска Солнца в трех спектральных участках (402, 500 и 862 нм). Исследования фазовых соотношений между этими каналами на основе обработки рядов данных длиной 29 суток выполнены в работе (Хименес и др., 1999), и обнаружена зависимость сдвигов фаз не только от частоты, но и от степени р-мод. Как оказалось, в нижней фотосфере (862 и 500 нм) сдвиги фаз между модами значительно превышают сдвиги фаз при переходе от нижней к средней фотосфере (500 и 402 нм). Эксперимент ДИФОС-Ф, благодаря измерениям в очень широком спектральном диапазоне, предоставляет уникальную возможность наиболее полно исследовать ход фазовых зависимостей колебаний для большого диапазона высот атмосферы Солнца.

2 Обработка данных

Из всех наблюдений, полученных фотометром ДИФОС для анализа, был отобран ряд данных с наибольшим участком свободным от телеметрических сбоев. Выбранный период (с 15^h34^m UT 19.02.2002 г. до 3^h44^m UT 1.03.2002 г., итого около 228 часов) соответствует непрерывной фазе освещения фотометра Солнцем, т. е. космический аппарат в это время не заходил в тень от Земли. Предварительная обработка данных начиналась с удаления линейных трендов. После этого сигнал очищался от помех, возникающих вследствие изменений прозрачности земной атмосферы и бликов от поверхности Земли, и облаков. Это выполнялось путем вычитания некоего среднего сигнала, определенного по восьми соседним виткам в точках, имеющих одинаковую фазу витка. Такой подход не является идеальным, так как величина бликов может отличаться даже для соседних витков. Кроме того, при такой обработке искусственно подавлялись мощности мод, периоды которых являлись кратными периоду вращения спутника вокруг Земли. В дальнейшем такие моды исключались из наших анализов, и на приведенных ниже рисунках для данных ДИФОС-Ф они отсутствуют.

Фурье-анализ предварительно обработанных рядов данных позволил построить спектры мощности с разрешающей способностью ~ 1.2 мкГц. Идентификация мод проводилась на основе табличных данных, взятых из работы (Гуртовенко, 1992).

3 Исследования фазовых сдвигов колебаний между разными спектральными каналами.

По стандартной процедуре сдвиги фаз $\Delta\varphi$ между рядами данных $A(n)$ и $B(n)$ для колебаний частоты ν определяются так:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_A &= \text{FFT}^{-1}(A(n) \cdot W(n)), \\ \mathbf{P}_{AB} &= \mathbf{P}_A \cdot \mathbf{P}_B^*, \\ \Delta\varphi(\nu) &= \arctg(\text{Im}(\mathbf{P}_{AB}(\nu))/\text{Re}(\mathbf{P}_{AB}(\nu))), \end{aligned}$$

где FFT^{-1} – обратное преобразование Фурье, $W(n)$ – косинусное аподизирующее окно. Жирным шрифтом обозначены комплексные числа, * – комплексное сопряженное. Мнимое и действительное значения комплексного числа обозначены соответственно Im и Re .

Однако ситуация усложняется тем, что мощность моды, ее спектральный профиль и ее точное положение изменяются со временем. Причем между модами измеренная мощность не только мала по величине, но и содержит шумы разной природы. Поэтому для повышения точности фазовые характеристики каждой моды определялись для спектральной области $h = \pm 4$ мкГц вокруг среднего положения моды, причем при усреднении значений внутри этой области рассчитывалась средневзвешенная величина:

$$\Delta\varphi_{\text{mode}} = \sum_i (|\mathbf{P}_{ABi}| \cdot \Delta\varphi(\nu_i)) / \sum_i (|\mathbf{P}_{ABi}|).$$

Таким образом, небольшие изменения положения моды со временем (1–2 мкГц) не оказывали негативного влияния на полученные результаты.

Для оценки надежности полученных результатов мы решили сравнить их с данными эксперимента VIRGO/SPM, обработанными по такой же методике и для того же самого 228-часового ряда данных. Данные VIRGO/SPM, вследствие особенностей орбиты, не подвержены влиянию колебаний прозрачности земной атмосферы и поэтому имеют лучшее отношение сигнал/шум. Поэтому их предварительная обработка заключалась в удалении только линейных трендов и исправлений за телеметрические сбои.

В эксперименте VIRGO/SPM два из трех фотоприемных каналов номинально практически совпадают с каналами ДИФОС-Ф, но в отличие от узкополосности фильтров Virgo/SPM фотометр ДИФОС-Ф имеет фильтры с широкой полосой пропускания. На рис. 1 для этих двух каналов сравниваются рассчитанные нами спектры мощности в области двух мод ($n = 20, l = 2$ и $n = 21, l = 0$) по данным, одновременно измеренным станциями КОРОНАС и SOHO. Вертикальными штриховыми линиями показаны положения р-мод по данным (Гуртовенко, 1992). Видно, что, несмотря на существенную разность спектральных профилей пропускания фильтров, результаты согласуются очень хорошо.

Для того чтобы оценить достоверность короткого 228-часового ряда, мы обработали и более длинный (85-дневный) ряд данных Virgo/SPM, зарегистрированный с 9 февраля по 4 мая 2002 г. Разрешение спектра такого “длинного” ряда ~ 0.14 мкГц. Из рис. 2а-б видно, что основные закономерности фазовых сдвигов для короткой (228 часов) и длинной (85 дня) выборки совпадают, т. е. “короткий” 228-часовой ряд является репрезентативным для такого рода исследований.

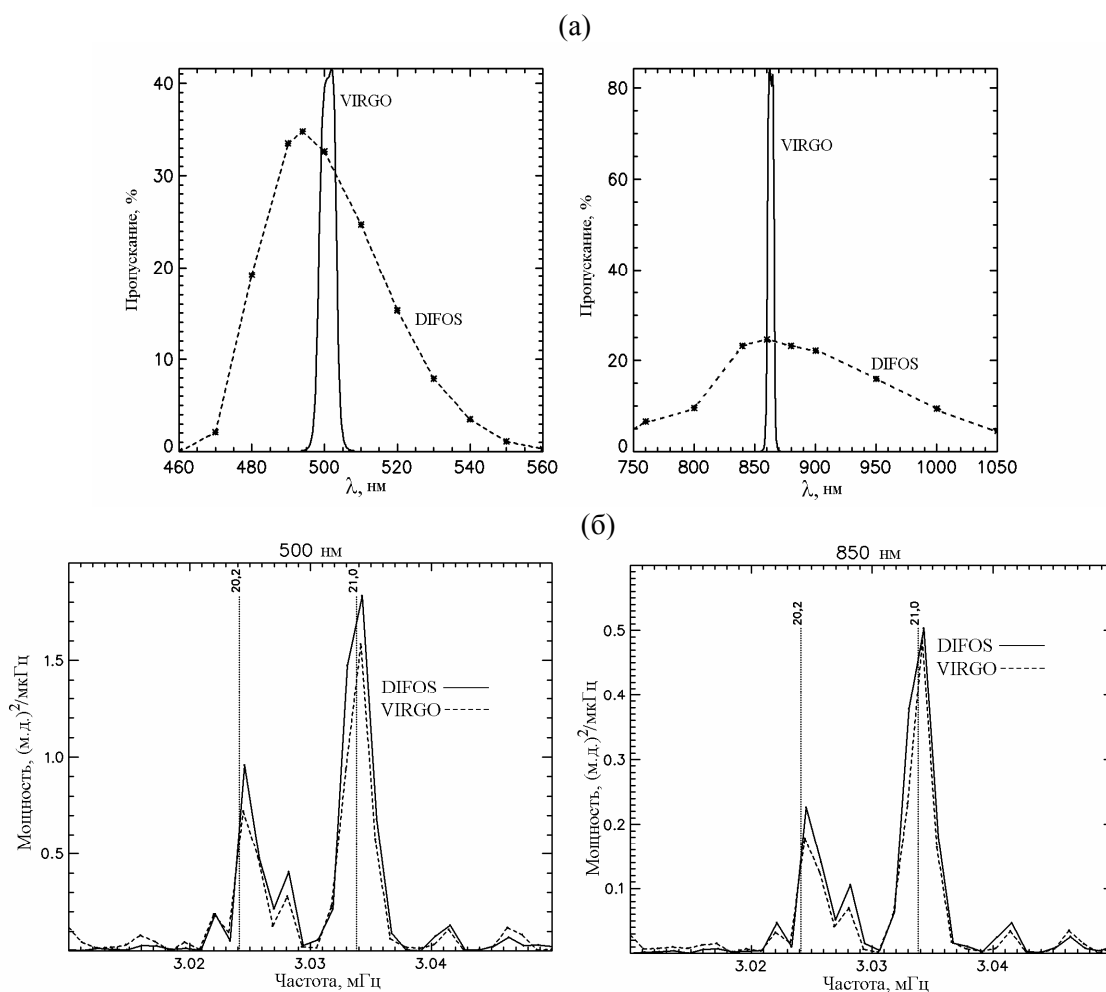
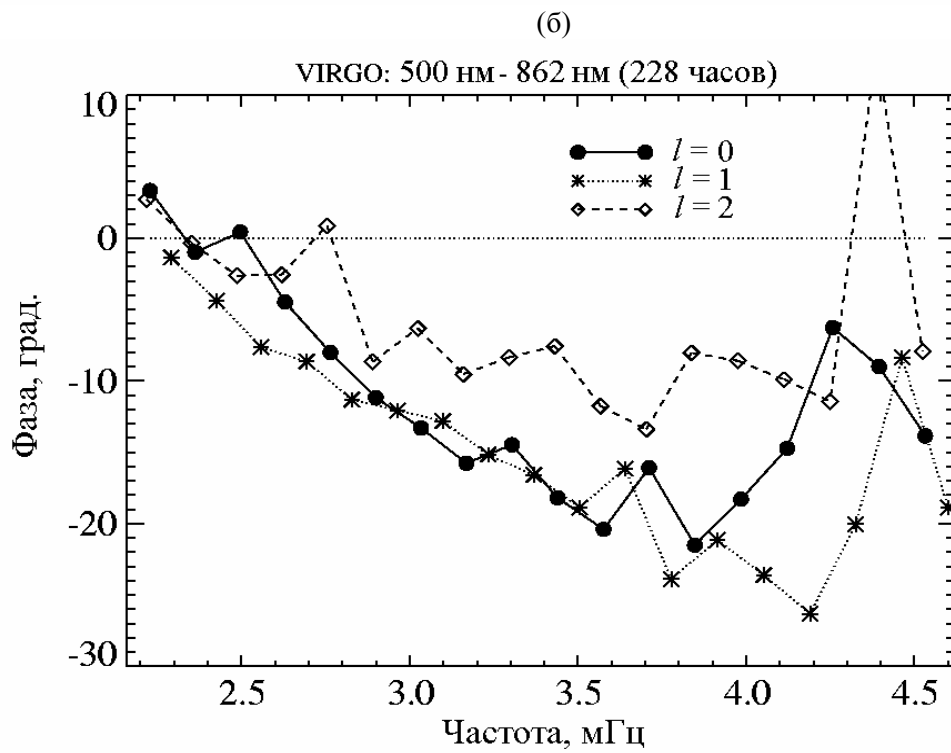
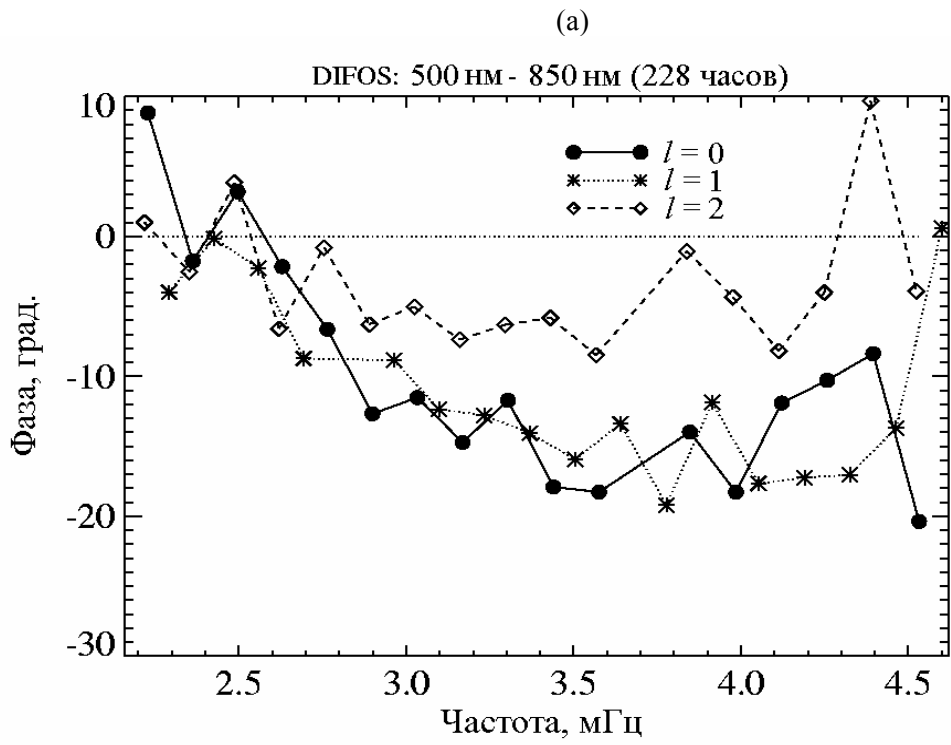


Рис. 1. а) Сравнение спектральных профилей пропускания каналов 500 нм и 850 (862) нм фотометров ДИФОС-Ф и Virgo/SPM; б) Сравнение профилей спектра мощности мод (20,2) и (21,0), полученных по 228-часовым рядам данных фотометров ДИФОС-Ф и Virgo/SPM (м. д. – миллионная доля)

Кроме того, результаты фотометров ДИФОС и Virgo/SPM, полученные из обработки “коротких” рядов данных в каналах 500 нм и 850 нм также хорошо согласуются (рис. 2б-в). Это означает, что мы можем с уверенностью доверять результатам обработки **всех** каналов ДИФОС с “короткими” рядами.

Из рис. 2 видно, что фазовые сдвиги пятиминутных осцилляций яркости между каналами 500 нм и 850 (862) нм отличаются для разных мод и достигают максимума на частотах 3.5–4.2 мГц ($\Delta\phi \approx -20^\circ$, моды $l = 0$ и 1, $\Delta\phi \approx -10^\circ$, мода $l = 2$) и 3–3.5 мГц ($\Delta\phi \approx +10^\circ$, мода $l = 3$). Похожие результаты получены в работе (Хименес и др., 1999) при обработке данных Virgo/SPM, измеренных в 1996 г. Но почему колебания разных мод l демонстрируют разный сдвиг фаз? В работе (Хименес и др., 1999) выдвигается предположение, что это может быть следствием наличия отраженных волн, изменений постоянной затухания на разных высотах либо влиянием фоновых колебаний.

Фоновые колебания, существующие между р-модами, характеризуют волны, сгенерированные в подфотосферных слоях (предположительно в межгранульных промежутках).



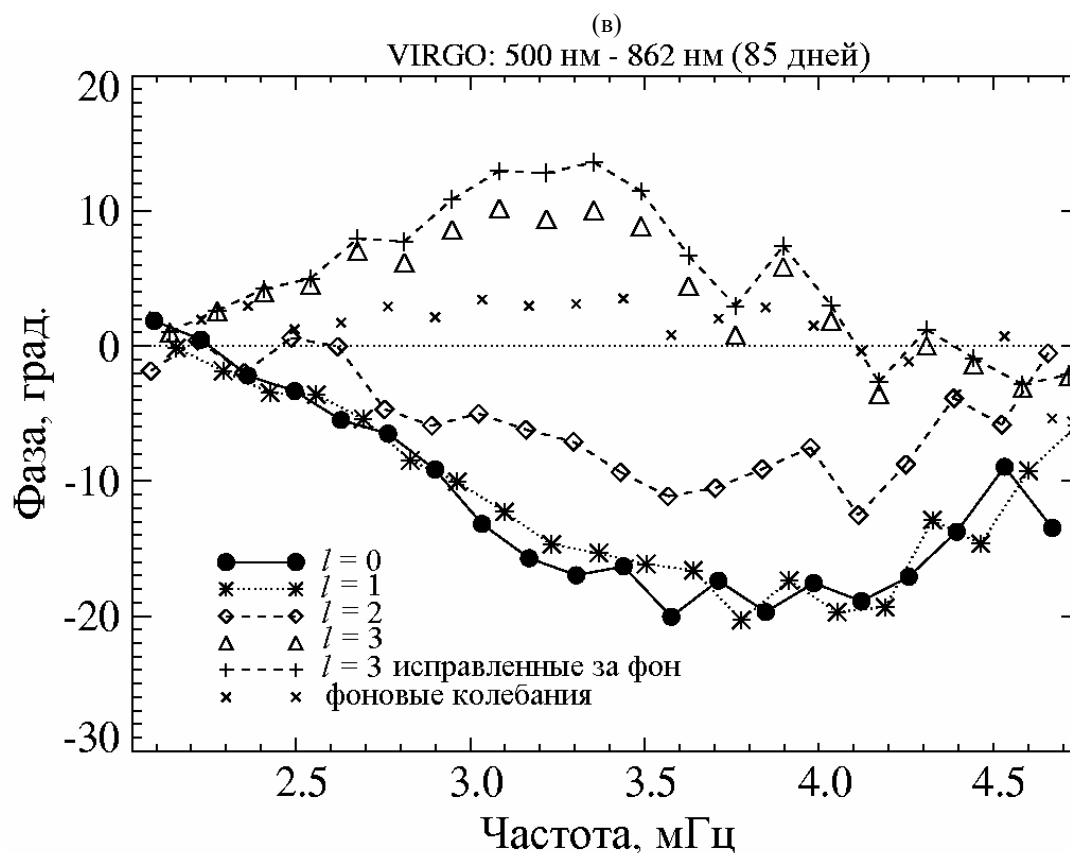


Рис. 2. Сравнение сдвигов фаз колебаний яркости между каналами 500 нм и 850 (862) нм, полученных на основе 228-часового ряда данных фотометра ДИФОС-Ф (а), а также 228-часового (б) и 85-дневного (в) рядов данных фотометра Virgo/SPM

Кроме того, вклад в такие колебания дают и резонансные волны после рассеяния, отражения и рефракции. Для исследования фоновых колебаний мы измерили сдвиги фаз для полосы $h = \pm 4$ мкГц в участках между р-модами в середине интервалов большого расщепления. Фоновые колебания демонстрируют небольшой положительный сдвиг фаз ($+2-3^\circ$) для широкой области частот. Для частот больше 4 мГц фазовый сдвиг медленно спадает к нулю. Для того, чтобы оценить величину влияния фоновых колебаний на измеряемые фазовые сдвиги резонансных мод, мы измерили фазовые сдвиги в модах с разными параметрами h (± 2 мкГц, ± 4 мкГц, ± 8 мкГц), т. е. с разной добавкой доли фоновых колебаний. Предполагая, что эта добавка прямо пропорциональна h , мы оценили ее величину при $h = 0$ и посчитали, что это соответствует сдвигам при отсутствии фоновых колебаний. Как оказалось, фоновые колебания оказывают заметное влияние только лишь на фазовые сдвиги слабых мод $l = 3$. После корректировки влияний можно увидеть, что фазовые сдвиги в этих модах увеличивают свое положительное смещение и достигают $+13^\circ$ (рис. 2в). Очевидно, что фоновые колебания никак не могут объяснить различие сдвигов фаз для разных мод l . Нам кажется, что такое отличие можно объяснить частичной компенсацией колебаний с модами $l = 2$ и 3 при усреднении по диску. Принципиальной особенностью такой компенсации является суммирование колебаний в

центре и на краю диска Солнца, т. е. на разных высотах фотосферы, а значит и с разной фазой колебаний. Конечным итогом является искажение измеряемых фаз мод $l = 2$ и 3.

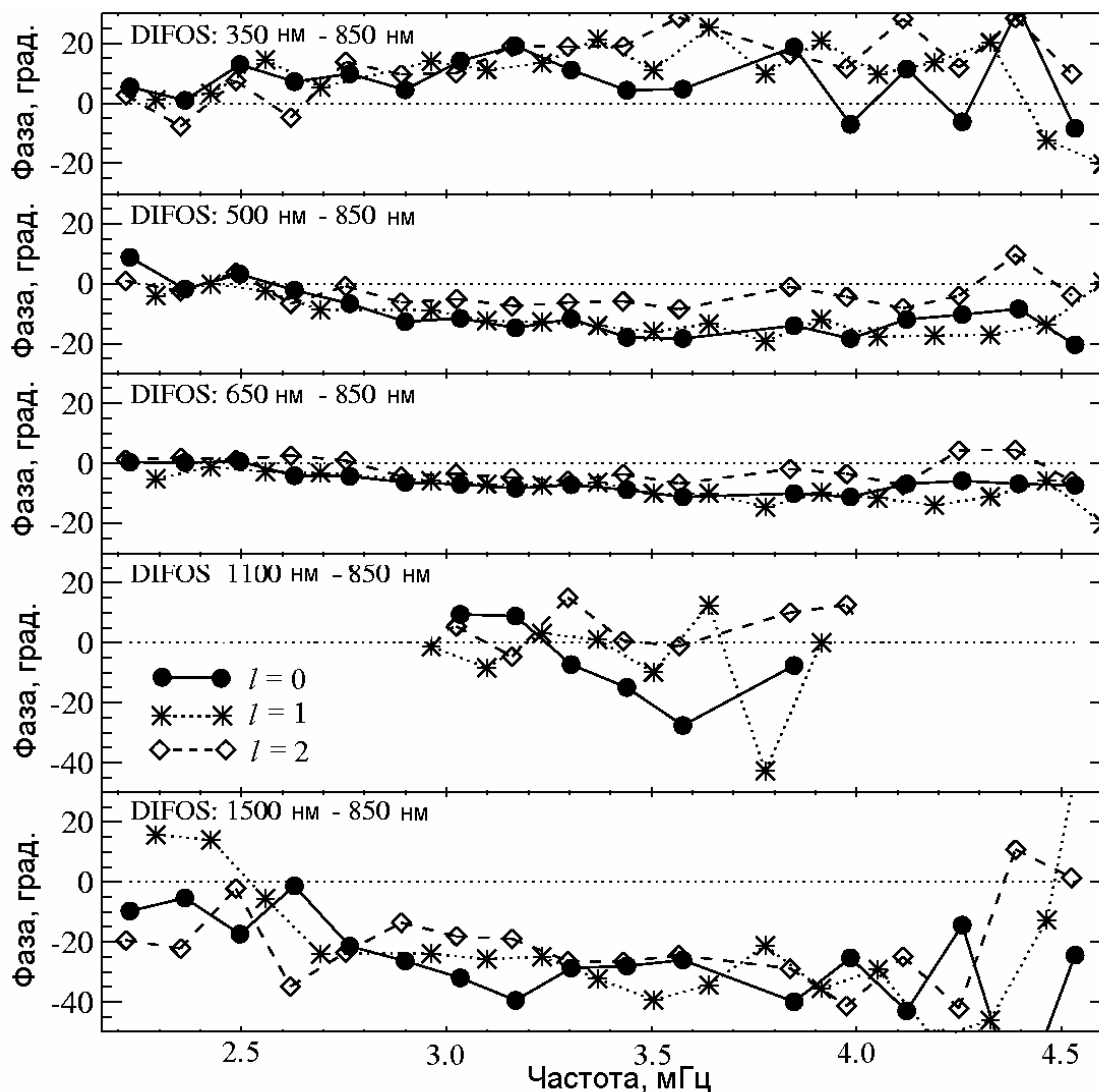


Рис. 3. Сдвиги фаз колебаний яркости в разных каналах фотометра ДИФОС-Ф относительно канала 850 нм

Сдвиги фаз между разными каналами фотометра ДИФОС-Ф сильно отличаются (рис. 3). Данные в канале 1100 нм показывают сильный разброс вследствие очень большой величины паразитного рассеянного света в этом канале. Поэтому на рисунке приводятся данные только для интервала частот 3–4 МГц.

На рис. 4 мы привели сводные данные изменений фаз в диапазоне 3–4 МГц, т. е. для частот, где происходят наибольшие изменения. На рисунке приводятся данные только для мод $l = 0$ и 1, в которых отсутствует какая-либо пространственная компенсация. Видно, что данные ДИФОС-Ф и Virgo/SPM хорошо согласуются между собой и взаимно дополняют друг друга. На монотонном ходе изменений фаз с длиной волны существуют фазовые изломы в спектральных участках 350–400 нм и 1100–1500 нм. Излучение в синей области спектра (350–

400 нм) формируется в средней фотосфере на высотах порядка 150–200 км. На этих высотах характер акустических волн меняется от бегущих к затухающим. Сложнее найти объяснение фазового излома в области 1 100–1 500 нм, излучение которой исходит из высот, соответствующих самым глубоким слоям фотосферы. Не исключено, что причина такого излома связана с сильным отражением акустических волн на границе конвективной зоны и фотосферы.

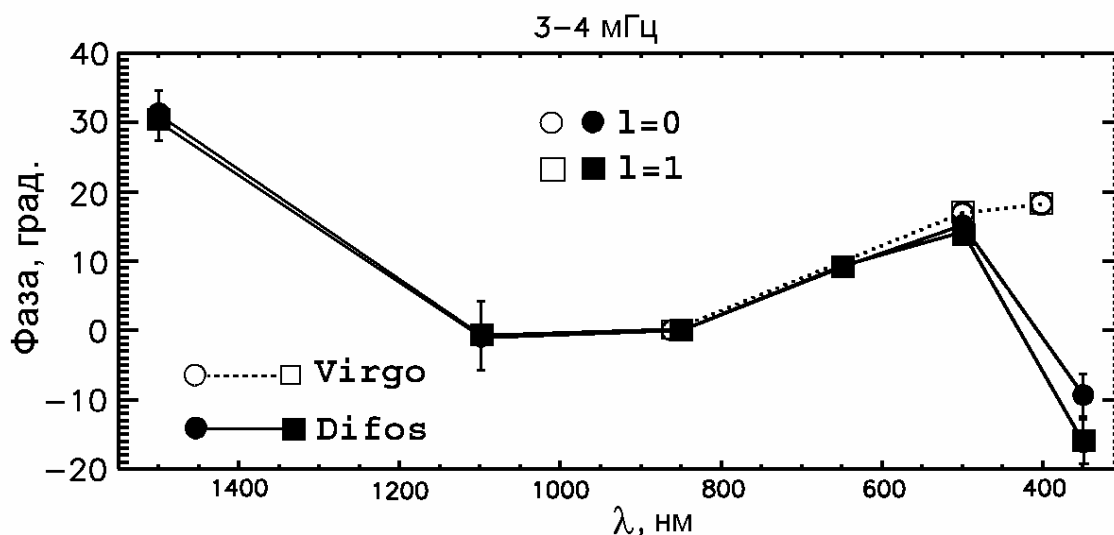


Рис. 4. Сводные данные изменений фаз колебаний яркости всего диска Солнца в диапазоне 3–4 мГц для мод $l = 0$ и 1 по данным фотометров ДИФОС-Ф и Virgo/SPM

4 Выводы

1. Данные ДИФОС-Ф и Virgo/SPM хорошо согласуются в номинально одинаковых каналах (500 нм и 850 (862) нм). Для решения ряда задач оптимально восполнять телеметрические потери данных в этих каналах данными, полученными с другого фотометра.

2. Фазовые сдвиги пятиминутных осцилляций яркости между каналами 500 нм и 862 нм отличаются для разных мод и достигают максимума на частотах 3.5–4.2 мГц ($\Delta\varphi \approx -20^\circ$, моды $l = 0$ и 1, $\Delta\varphi \approx -10^\circ$, мода $l = 2$), 3–3.5 мГц ($\Delta\varphi \approx +13^\circ$, мода $l = 3$). Фоновые колебания демонстрируют положительный сдвиг фаз ($+2-3^\circ$) для широкой полосы частот. Отличие поведения колебаний для мод разных l можно объяснить особенностями компенсации колебаний с модами $l = 2$ и 3 при усреднении по диску.

3. На монотонном ходе изменений фаз с высотой существуют фазовые изломы в спектральных участках 350–400 нм и 1 100–1 500 нм. Причиной фазового излома в области 350–400 нм, которая отвечает излучению с высот порядка 150–200 км, является изменение характера распространения волны (переход от бегущих к эванесцентным волнам). Фазовый излом в области 1 100–1 500 нм, соответствующий высотам разделяющих конвективную зону и фотосферу, является, скорее всего, следствием отражения волн.

Литература

- Брунс А.В., Шумко С.М. // Астрон. журн. 1990. Т. 67. Вып. 4. С. 829–836.
- Гуртовенко. Э.А. (ред.) // Вариации глобальных характеристик Солнца. Киев: Наукова думка. 1992. С. 304.
- Костик Р.І., Осипов С.М., Лебедев М.І. // Космічна наука і технологія. 2003. Т. 9. №. 2/3. С. 10.
- Фрелих К. и др. (Fröhlich C., et al.) // Inside the Sun. IAU Colloquium N 121. Versailles. France. 1990. P. 279.
- Фрелих К. и др. (Fröhlich C., Romero J., Roth H., Wehrli C., Andersen B.N., Appourchaux T., Domingo V., Telljohann U., Berthomieu G., Delache P., Provost J., Toutain T., Crommelynck, Chevalier A., Fichot A., Däppen W, Gough D., Hoeksema T., Jiménez A., Gomez D. M.F., Herreros J.M., Roca Cortés T., Jones A.R., Pap J.M., Wilson R.C.) // Solar Phys. 1995. V. 162. P. 101.
- Хименес А. и др. (Jiménez A., Pallé P.L., Roca Cortés T., Domingo V.) // Astron. and Astrophys. 1988. V. 193. P. 298.
- Хименес А. и др. (Jiménez A., Roca Cortés T., Severino G., Marmolino C.) // Astrophys. J. 1999. V. 525. P. 1042.
- Шрайвер К. и др. (Schrijver C.J., Jiménez A., Däppen W.) // Astron. and Astrophys. 1991. V. 251. P. 655.