

УДК 523.942

М. И. Стодилка

Астрономическая обсерватория
Львовского национального университета имени Ивана Франко
79005 Львов, Кирилла и Мефодия 8
sun@astro.franko.lviv.ua

Глобальные изотермические колебания в фотосфере Солнца

По данным наблюдений на космических аппаратах VIRGO (SOHO) и ДИФОС-Ф (КОРОНАС-Ф) осцилляций яркости Солнца получены стратификации возмущений концентрации водорода, порождающие изотермические колебания фотосферных слоев Солнца. Выявлены соответствующие узлы и пучности колебаний в слоях солнечной фотосферы. Воспроизведение по данным прибора ДИФОС долгопериодических колебаний в изотермическом режиме выявляет сдвиг узлов и пучностей n/n в сторону нижних слоев фотосферы при уменьшении частоты колебаний.

ГЛОБАЛЬНІ ІЗОТЕРМІЧНІ КОЛИВАННЯ У ФОТОСФЕРІ СОНЦЯ, Стодилка М. І. — За даними спостережень на космічних апаратах VIRGO (SOHO) и ДИФОС-Ф (КОРОНАС-Ф) осциляцій яскравості Сонця отримано стратифікації збурень концентрації водню, які породжують ізотермічні коливання фотосферних шарів Сонця. Виявлено відповідні вузли та пучності коливань у шарах сонячної фотосфери. Відтворення за даними приладу ДИФОС довгоперіодичних коливань в ізотермічному режимі виявляє зсув вузлів і пучностей n/n у бік нижніх шарів фотосфери при зменшенні частоти коливань.

GLOBAL ISOTHERMAL OSCILLATIONS IN THE SOLAR PHOTOSPHERE, by Stodilka M. I. — Using observational data on solar brightness oscillations from the space satellites VIRGO (SOHO) and DIFOS-F (KORONAS-F) we obtained stratifications of perturbed hydrogen concentrations, that give rise to isothermal oscillations in solar photosphere lay-

ers. We revealed proper knots and antinodes of oscillations in the solar photosphere layers. The reconstruction of isothermal oscillations of long periods from the DIFOS observations showed the shift of knots and antinodes n/n sideward lower photosphere layers when the frequency of oscillations decreases.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование выполнено по данным наблюдений осцилляций яркости Солнца с космических аппаратов. Колебания яркости Солнца были впервые выявлены во время эксперимента ACRIM на спутнике SMM [13], позже — во время миссии PNOBOS (эксперимент IPHIR [6]), а также во время недавних экспериментов на спутниках CORONAS и SOHO.

Глобальным (резонансным) осцилляциям яркости Солнца соответствуют акустические p -моды, которые описываются сферическими гармониками разного порядка l . Акустические осцилляции формируют сложный набор стоячих волн, которые можно наблюдать на поверхности Солнца. Распространяющиеся вверх акустические волны достигают слоев, где длина волны превышает шкалу высот, и отражаются от них. В этих более высоких слоях соответствующие волны становятся эванесцентными — газовая среда под воздействием колебательного возмущения смещается почти синфазно на разных высотах. В солнечной фотосфере флуктуации температуры, вызванные прохождением волн, сглаживаются переносом излучения между более горячими и холодными областями, т. е. осуществляется радиационная релаксация, которая есть основным механизмом диссипации волн в фотосфере Солнца. Правда, в оценках эффектов радиационного затухания наблюдаются значительные расхождения. В условиях атмосферы Солнца время радиационной релаксации сильно изменяется с высотой: от 1 с в глубоких фотосферных слоях до 500 с чуть выше температурного минимума и снова до 90 с в хромосфере [11]. Если период колебаний существенно меньше времени радиационного затухания, то осуществляется адиабатический режим колебаний. В солнечной атмосфере адиабатический режим для пятиминутных и короткопериодических колебаний имеет место только на больших высотах ($h > 250$ км) [12]. В случае адиабатического режима колебаний фазовый сдвиг между излучением и скоростью составляет примерно 90°.

Наблюдаемые флуктуации интенсивности являются результатом наложения вариаций температуры, плотности и коэффициента поглощения. В то же время взаимный обмен излучением горячих и холодных слоев приводит к отклонению от адиабатического режима колебаний. В случае низких частот или малого времени радиационной релаксации (по сравнению с периодом колебаний) обмен излучением сглаживает температурные флуктуации в газовой среде (осуществляется

радиационная релаксация), и акустические волны распространяются изотермически. Влияние радиационного затухания на распространение волн резко уменьшается с высотой. В случае изотермического режима колебаний фазовый сдвиг между излучением и скоростью составляет около 180° . В реальной атмосфере этот сдвиг принимает промежуточные значения $90^\circ < \phi < 180^\circ$. Кроме того, при колебаниях температуры и плотности вещества происходит постепенное высвечивание. Это особенно касается верхних оптически тонких слоев, из которых излучение достаточно легко выходит наружу, а не поглощается в области возмущения. Коэффициент поглощения также зависит от локальных значений температуры и плотности; он изменяется во время осцилляций, что обуславливает дополнительное блокирование и последующее освобождение потока излучения, а следовательно, возникают дополнительные фазовые сдвиги между интенсивностью и скоростью. На отклонения от адиабатичности также влияет конвективная динамика.

Шрайвер и др. [11] исследовали солнечные колебания интенсивности и скорости низких сферических гармоник в диапазоне частот 1.8—4.6 мГц; показано, что даже для этого квазипятиминутного диапазона колебаний в условиях солнечной фотосферы имеет место существенное отклонение от адиабатического режима колебаний. В работе [8] получены аналогичные данные об неадиабатических эффектах в солнечной атмосфере, использованы результаты измерений флуктуаций излучения и скорости с помощью инструментов на SOHO. Авторы полагают, что расхождение между теорией и результатами наблюдений вызвано влиянием фотосферного волнового фона. Результаты наблюдений флуктуаций излучения Солнца с помощью прибора ДИФОС во время первой короткой миссии CORONAS приведены в работах [7, 10]: с помощью фурье- и вейвлет-анализа временных рядов отождествлены моды глобальных колебаний, их тонкая структура.

Солнечные вариации исследуют преимущественно с помощью фурье- или вейвлет-анализа; в работе [4] автором предложен инверсный подход воспроизведения (путем решения обратной задачи переноса излучения) стратификации температурных вариаций, порождающих наблюдаемые вариации яркости Солнца. Данная методика была применена нами к результатам наблюдений вариаций излучения Солнца с помощью приборов VIRGO на SOHO и ДИФОС-Ф на КОРОНАС-Ф [2, 5]. Получены модели глобальных возмущений температуры в фотосфере Солнца, порождающих пятиминутные осцилляции излучения Солнца, предложен механизм их генерации, согласно которому пятиминутные осцилляции яркости Солнца возникают в результате рассеяния p -мод низких сферических гармоник на солнечной грануляции с последующей конструктивной интерференцией, порождающей температурные возмущения в виде глобальных стоячих волн. Однако этот цикл исследований выполнен в адиабатическом

приближении колебаний. В условиях нижних слоев фотосферы, а тем более для низких частот адиабатическое приближение неприменимо. Поэтому интересны результаты данного исследования осцилляций яркости Солнца в изотермическом приближении.

В работе по данным наблюдений излучения Солнца воспроизведена фотосферная стратификация вариаций концентрации атомов водорода, порождающих долгопериодические колебания яркости Солнца. Так как излучение в непрерывном спектре зарождается в фотосферных слоях Солнца, то исследование вариаций яркости Солнца позволяет изучать глобальные возмущения этих фотосферных слоев, что впоследствии может дать ответ о природе осцилляций яркости, механизмах их возбуждения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В этом исследовании мы обработали данные со спектрофотометров VIRGO (SPM) и ДИФОС-Ф. Спектрофотометр VIRGO (SPM) (размещен на космической обсерватории SOHO) имеет три спектральных диапазона: 802, 500 и 402 нм, точность измерений 10^{-6} от полной интенсивности излучения Солнца, временная дискретность отсчета интенсивности 60 с.

Одним из приборов, размещенных на платформе спутника КОРОНАС-Ф, является спектрофотометр ДИФОС-Ф, сконструированный для измерения флуктуаций интенсивности солнечного излучения в интегральном спектре в шести спектральных диапазонах ($\Delta\lambda = 350, 500, 650, 850, 1100$ и 1500 нм) с шириной полосы пропускания 10—20 % от центральной длины волны; временная разрешающая способность 35.55 с, относительная погрешность измерений интенсивности составляет одну миллионную от полной интенсивности излучения Солнца. Данные прибора ДИФОС-Ф получены из базы данных coronas.izmiran.ru/F/archive, данные VIRGO — из базы данных sohodata.nascom.nasa.gov.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

При наблюдении Солнца как звезды происходит наибольшее пространственное усреднение его излучения и достигается высокое отношение сигнала к шуму. При этом полученные результаты относятся к наибольшим пространственным масштабам.

Атмосферу звезды будем рассматривать как однородную в рамках плоской геометрии. В атмосфере происходят незначительные возмущения плотности, давления и температуры. Под воздействием этих возмущений газ начинает двигаться, рассматриваемое возмущение также распространяется с соответствующей скоростью. Такая моду-

ления термодинамических параметров среды отображается на интенсивности излучения, которое проходит через атмосферу, в результате чего возникают небольшие флуктуации излучения, расшифровка которых позволяет получить информацию о локальных и глобальных процессах в атмосфере звезды.

Если вектор x задает стратификацию параметров по глубине атмосферы, а вектор \dot{x} описывает их вариации, то уравнение переноса для вариации излучения I имеет вид [4]

$$\frac{d I}{d} = I - S^{ef},$$

где $S^{ef} = S - I$. Поскольку $S = B - I$, то

$$S^{ef} = B - 2I.$$

Здесь B — функция Планка, κ — коэффициент излучения, μ — коэффициент поглощения.

Если известны вариации параметров среды, то путем решения уравнения переноса легко получить вариации излучения на поверхности звезды.

Вариацию S^{ef} можно выразить через вариации двух независимых параметров: температуры и концентрации атомов водорода. Поскольку в нашей задаче мы имеем дело с незначительным числом исходных данных, то следует рассмотреть возможность использования некоторых приближений, которые позволяют свести задачу к вариациям только одного параметра. Рассмотрим изотермическое приближение: время релаксации системы намного меньше полупериода колебаний. В таком случае $T/T \approx 0$ — изотермический режим колебаний, следовательно, $\dot{I} = \dot{p}/p$ — флуктуации излучения определяются только сжатием вещества (долгопериодические колебания в нижней фотосфере).

Таким образом,

$$S^{ef} = \frac{(B - I)}{n_H} \frac{f}{1 - n_H f_{n_e}} n_H.$$

Используя метод коротких характеристик для формального решения уравнения переноса [4], получаем соотношение для вариации интенсивности на поверхности звезды:

$$I_{1,i} = \sum_{n=1}^N R_{n,i} x_n,$$

где $R_{n,i}$ — функции отклика к параметру x на n -й глубине при $\mu = \mu_i$, причем

$$R_{n,i} = S_n^{ef} / x_n (a_n \exp(-\tau_{n,1}) - b_n \exp(-\tau_{n,1,1})).$$

Коэффициенты a_n, b_n определяются оптическими глубинами между точками $n + 1$ и n атмосферы, $\tau_{n,1}$ — оптическая глубина между точкой n и поверхностью звезды.

Введенные функции отклика дают связь между вариациями интенсивности излучения на поверхности звезды и вариациями параметров газовой среды; они существенно упрощают решение инверсной задачи.

Записанные соотношения дают интенсивность излучения для заданного положения на диске Солнца; интенсивность для заданных положений позволяет получить поток излучения со всего диска.

Возмущение концентрации атомов водорода n_H будем выбирать таким образом, чтобы теоретические потоки в разных спектральных диапазонах наилучшим образом совпадали с наблюдаемыми. Однако мы будем рассматривать относительные флуктуации потока излучения со всего диска, так как в таком случае отпадает потребность в абсолютных измерениях, и в случае ДИФОС-Ф исключается модуляция оптической глубины при прохождении сигнала через верхние слои земной атмосферы разной толщины.

Для оценки близости теоретических и наблюдаемых потоков введем целевую функцию:

$$S(\mathbf{x}) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (f_i^{obs} - f_i)^2 / \sigma_i^2$$

где M — число спектральных диапазонов, σ_i — некоторые весовые множители, f_i^{obs} — наблюдаемые относительные флуктуации, S — стабилизатор, λ — регуляризирующий множитель. Стабилизатор выберем из условия, что изменение возмущения параметра \mathbf{x} с высотой можно описать полиномом n -го порядка, т. е. $S(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x}$, матрица \mathbf{H} задает порядок полинома; выбранный таким образом стабилизатор позволяет получать решения из класса гладких функций.

Вариации параметров будем искать из соотношения, полученного путем линеаризации целевой функции:

$$\mathbf{x} = \frac{2 \mathbf{H} \mathbf{x}_0}{\mathbf{D} + 2 \mathbf{H}}$$

где \mathbf{D} — матрица Гессе.

Найдя \mathbf{x} , уточняем возмущение: $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{x}$, по новым \mathbf{x} рассчитывается f (путем решения уравнения переноса для вариации излучения), а затем опять \mathbf{x} и \mathbf{x} , пока не будет выполняться условие сходимости итерационной процедуры.

Мы определили нижнюю оценку погрешности воспроизведения вариаций параметров солнечной атмосферы по данным из шести спектральных каналов прибора ДИФОС. Согласно полученным результатам вариации надежно воспроизводятся на высотах $-75 \text{ км} < h < 250 \text{ км}$. При $h > 250 \text{ км}$ точность воссоздания резко падает. Наилуч-

шим образом воспроизводятся вариации в нижней фотосфере, здесь относительная погрешность достигает 2 %, а на высотах $-75 \text{ км} < h < 250 \text{ км}$ не превышает 14 %. Так как регистрация излучения осуществляется в более широком спектральном диапазоне, то точность воспроизведения в два-три раза лучше, и диапазон высот значительно шире, чем в случае VIRGO.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Так как данные, получаемые с прибора ДИФОС, позволяют гораздо точнее (по сравнению с VIRGO) воспроизводить вариации в солнечной фотосфере, в нашем исследовании сделан акцент на данных ДИФОС. Поскольку период вращения спутника около 95 мин, то данные наблюдений в концах таких временных интервалов засорены отраженными от Земли сигналами, что вызывает существенные всплески исследуемого сигнала, особенно в ИК-каналах [1]. Это порождает низкочастотную модуляцию излучения Солнца. Кроме того, со временем снижается прозрачность фильтров прибора, особенно работающих в УФ-области. Поэтому для исследования мы выбрали данные за один из первых циклов незатеняемой видимости спутника (19.02.02—01.03.02 гг.); во время таких циклов наблюдений вклад отраженных от Земли сигналов минимален. Однако периодичность вращения спутника 95 мин проявляется в данных фотометра ДИФОС в виде фоновых наводок на кратных гармониках даже в периоды непрерывного освещения Солнцем. В частности, в спектре мощности вариаций яркости Солнца по данным ДИФОС на периодах $T = 45 \dots 50$ мин возникает высокий пик, отсутствующий в одновременных наблюдениях на VIRGO. Поэтому при соответствующей фильтрации мы выделяли только общие для данных ДИФОС и VIRGO пики. Упомянутая низкочастотная модуляция отсутствует в наблюдениях с VIRGO, поэтому данные VIRGO предпочтительнее при использовании фурье- или вейвлет-анализа. Вариации на заданных частотах мы получали путем фильтрации временных рядов с помощью фильтров Ланцоша. Полученные таким образом временные ряды подавались на вход инверсного кода для воспроизведения глобальной стратификации температуры в фотосфере Солнца.

Спектры мощности вариаций яркости Солнца указывают на наличие долгопериодического компонента глобальных колебаний излучения Солнца. На рис. 1 показан спектр вариаций яркости Солнца в синем канале спектрофотометра VIRGO, время наблюдений — 1 сут. Спектральная мощность нормирована к единице.

Наибольшая мощность сосредоточена в области пятиминутных колебаний, но все-таки хорошо выделяются пики долгопериодических колебаний: $T = 10$ мин. Поэтому мы сочли целесообразным исследовать эти долгопериодические колебания в изотермическом прибли-

Рис. 1. Спектры мощности вариаций яркости Солнца (синий канал VIRGO)

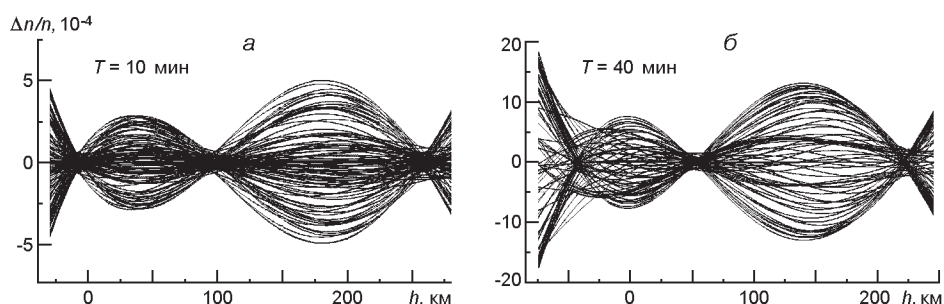
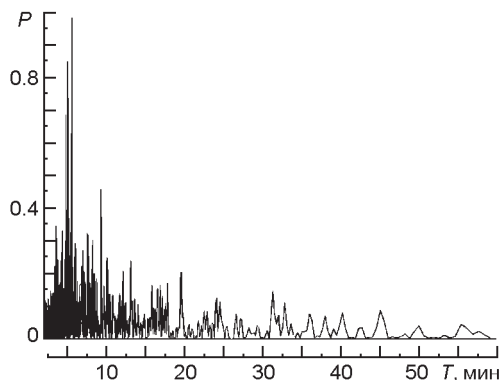


Рис. 2. Воспроизведенные стратификации относительных вариаций концентрации атомов водорода n/n для разных периодов колебаний яркости Солнца: *a* — $T = 10$ мин, *б* — $T = 40$ мин; данные ДИФОС-Ф

жении, так как адиабатическое приближение в слоях нижней фотосферы даже для пятиминутных осцилляций не выполняется.

Пятиминутные осцилляции в адиабатическом приближении уже рассмотрены нами в работах [2, 5]. Здесь же мы исследуем долгопериодические колебания периодов 9...10 мин, 19...20 мин, 30...32 мин и 39...41 мин. Этим периодам соответствуют пики спектральной мощности вариаций яркости Солнца по наблюдениям на VIRGO (рис. 1).

На рис. 2 показаны полученные по наблюдениям ДИФОС-Ф результаты воспроизведения глобальной стратификации относительных вариаций концентрации атомов водорода n/n для двух разных периодов колебаний яркости в солнечной фотосфере.

Колебания, полученные в разные моменты времени, наложены друг на друга, и в результате получаем глобальную стоячую волну в фотосфере Солнца. Поскольку ошибка воспроизведения вариаций с высотой увеличивается [5], мы рассматриваем только нижние фотосферные слои ($h < 275$ км). Амплитуда колебаний увеличивается как в верхних, так и в нижних слоях. На рассматриваемые нами фотосферные слои приходится три узла и две пучности. В узлах фаза колебаний изменяется на π , что говорит в пользу наличия стоячих волн. Размывание положения узлов возникает за счет погрешностей воспроизведе-

ния вариаций; упомянутое размывание может быть обусловлено также колебаниями других мод, которые хорошо просматриваются в узлах. Как следует из рис. 2, долгопериодические колебания яркости Солнца порождены глобальными стоячими волнами возмущений концентрации атомов водорода в фотосфере. Аналогичные стоячие волны температурных возмущений получены в работах [2, 5] при исследовании пятиминутных колебаний в адиабатическом приближении, причем один из узлов находится в начале переходной области к проникающей конвекции ($h = 90 \dots 100$ км), положение второго узла размыто ($h = -10 \dots -40$ км).

На рис. 2 отчетливо виден сдвиг узлов и пучностей в нижние слои при увеличении периода долгопериодических колебаний. Положения узлов для разных периодов приведены в таблице.

Итак, при изменении периода колебаний от 10 до 40 мин смещение первого узла (нижнего) составляет 40 км, второго — 50 км, третьего (верхнего) — 40 км. Зависимости положения узлов от периода колебаний представлены на рис. 3.

Согласно полученным результатам ход зависимостей почти параллелен, т. е. при уменьшении частоты колебаний от 1.75 до 0.42 мГц структура стоячей волны изменяется слабо, а происходит только сдвиг узлов и пучностей стоячей волны в более низкие слои. В то же время структура стоячей волны, как и в случае пятиминутных осцилляций, нестабильна: согласно полученным результатам узлы в некоторые моменты времени исчезают (один или несколько), а затем появляются опять; они исчезают преимущественно во время уменьшения амплитуды колебаний яркости. Временные вариации глобальных p -мод были выявлены в работе [7].

Высоты положения узлов относительного изменения концентрации атомов водорода в солнечной фотосфере (данные ДИФОС)

T , мин	Положение узлов, км		
9.5	-10	100	260
19.5	-15	80	240
31	-30	65	225
40	-50	50	220

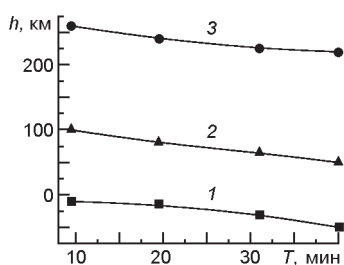


Рис. 3. Положение узлов n/n для разных периодов колебаний

Общеизвестно [14], что при уменьшении частоты колебаний предельная акустическая частота сдвигается в более низкие слои солнечной атмосферы. Изменение условий отражения акустических волн при увеличении периода колебаний приводит к соответствующему сдвигу в нижние слои фотосферы узлов и пучностей долгопериодических колебаний относительного изменения концентрации атомов водорода.

В то же время в условиях неоднородной атмосферы Солнца температурный градиент оказывает существенное влияние на предельную акустическую частоту: грануляционная структура осуществляет горизонтальную модуляцию температурного градиента [14], что приводит к размыванию переходного (отражающего) слоя в режим эванесцентных колебаний. А мелкомасштабные магнитные трубки дополнительно уменьшают предельную акустическую частоту [9]. Таким образом, неоднородная структура солнечной атмосферы существенно изменяет условия распространения акустических волн, за счет чего пятиминутные осцилляции могут просачиваться в хромосферные слои [3, 9], а акустические десятиминутные волны проникают в эванесцентные слои фотосферы вплоть до температурного минимума [3]. Вхождение падающей волны в эванесцентные слои порождает отраженную волну. Таким образом, долгопериодические колебания могут проникать в слои средней и верхней фотосферы и давать при наложении с отраженной волной воспроизведенную волновую структуру. Поэтому по результатам воспроизведения мы получаем долгопериодические колебания в слоях не только нижней, но и средней фотосферы.

Результаты воспроизведения долгопериодических колебаний по данным прибора VIRGO выявляют только тенденцию к смещению узлов и пучностей долгопериодических колебаний в нижние слои фотосферы при уменьшении частоты колебаний, так как положение узлов и пучностей в данном случае менее чувствительно к изменению частоты колебаний, чем в случае данных ДИФОС-Ф. А согласно результатам исследования пятиминутных осцилляций в адиабатическом приближении положение узлов и пучностей почти не зависит от частоты.

В данном исследовании речь идет об одновременном наложении волн по всему диску Солнца; следовательно, такие глобальные стоячие волны порождены прохождением колебаний низких l через атмосферные слои Солнца.

Таким образом, изотермическое приближение при изучении долгопериодических колебаний дает более адекватное воспроизведение вариаций в солнечной фотосфере, порождающих соответствующие осцилляции излучения Солнца.

ВЫВОДЫ

По данным наблюдений на космических аппаратах VIRGO (SOHO) и ДИФОС-Ф (КОРОНАС-Ф) осцилляций яркости Солнца получены

стратификации возмущений концентрации водорода, порождающих изотермические колебания фотосферных слоев Солнца.

Воспроизведенные стратификации относительного изменения концентрации атомов водорода n/n выявляют соответствующие узлы и пучности колебаний в слоях солнечной фотосферы, которые вызывают долгопериодические колебания яркости Солнца.

Воспроизведение по данным прибора ДИФОС долгопериодических колебаний в изотермическом режиме выявляет сдвиг узлов и пучностей n/n в сторону нижних слоев фотосферы при уменьшении частоты колебаний.

Исследование долгопериодических колебаний по данным VIRGO выявляет менее существенный сдвиг (чем в случае данных с ДИФОС-Ф) сдвиг узлов и пучностей n/n при уменьшении частоты колебаний.

Изотермическое приближение при изучении долгопериодических колебаний дает более адекватное (по сравнению с адиабатическим приближением) воспроизведение вариаций в солнечной фотосфере, порождающих соответствующие осцилляции излучения Солнца.

1. Костик Р. И., Осин С. М., Лебедев М. И. Перші результати експерименту ДИФОС-Ф // Космічна наука і технологія.—2003.—**9**, № 2/3.—С. 10—12.
2. Стодилка М. И. О природе пятиминутных колебаний яркости Солнца // Космічна наука і технологія.—2007.—**13**, № 3.—С. 67—81.
3. Стодилка М. И. Отражение акустических волн в реальной атмосфере Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—2010.—**26**, № 2.—С. 50—58.
4. Стодилка М. И. Застосування інверсних методів при дослідженні коливань яскравості Сонця // Журн. фіз. досліджень.—2004.—**8**, № 2.—С. 192—198.
5. Стодилка М. И. Дослідження п'ятихвилинних коливань яскравості Сонця: експеримент ДИФОС-Ф // Космічна наука і технологія.—2005.—**11**, № 1/2.—С. 30—36.
6. Froehlich C., Bonnert R. M., Bruns A. V., et al. IPHIR: The helioseismology experiment on the PHOBOS mission // Seismology of the Sun and Sun-like stars.—1988.—ESA SP-286.—P. 359—362.
7. Hasler K.-H., Zhugzhda Y. D., Lebedev N. L., et al. Observation of solar low-l p-modes by the CORONAS-DIFOS experiment // Astron. and Astrophys.—1997.—**322**.—P. L41—L44.
8. Jime'nez A., Roca Corte's T., Severino G., et al. Phase differences and gains between intensity and velocity in low-degree acoustic modes measured by SOHO // Astrophys. J.—1999.—**525**, N 2.—P. 1042—1055.
9. Khomenko E., Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. Channeling 5 minute photospheric oscillations into the solar outer atmosphere through small-scale vertical magnetic flux tubes // Astrophys. J.—2008.—**676**, N 1.—P. L85—L88.
10. Lebedev N. I., Oraevsky V. N., Zhugzhda Y. D., et al. First results of the CORONAS-DIFOS experiment. Space observations of solar irradiance oscillations // Astron. and Astrophys.—1995.—**296**.—P. L25—L28.

11. *Schrijver C., Dappen W., Jimenez A.* Observations of the phase differences between irradiances and velocity for low-degree solar acoustic modes // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**251**, N 1.—P. 655—668.
12. *Spiegel E.* The smoothing of temperature fluctuations by radiative transfer // *Astrophys. J.*—1957.—**126**.—P. 202—207.
13. *Woodard M., Hudson H.* Solar oscillations observed in total irradiance // *Solar Phys.*—1983.—**82**, N 1.—P. 67—73.
14. *Worrall G.* Oscillations in the solar atmosphere — The 5-min peak as a consequence of wave reflection at the photosphere // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* —1991.—**251**, N 1.—P. 427—437.

Поступила в редакцию 06.01.10