

УДК 523.92

О пространственной фильтрации глобальных колебаний Солнца низкой степени l

А. Л. Баландин, В. М. Григорьев, М. Л. Демидов

Расчитаны функции чувствительности (функции пространственного отклика) пространственных фильтров Крымского и Станфордского (США) телескопов, а также телескопа университета в Ницце (Франция), с которым проводились наблюдения Солнца как звезды в Антарктиде, к глобальным колебаниям Солнца для степеней $l=0\div 21$. Приведены результаты вычислений для радиальной и горизонтальной составляющих колебаний, кратко описана методика расчетов. На основании таких расчетов обсуждается возможность отождествления мод глобальных колебаний, отмечаются возникающие при этом трудности. Исходя из наблюдаемых на трех вышеназванных инструментах амплитуд 160-минутных колебаний Солнца, сделана попытка определения типа этого загадочного явления. Наиболее вероятно значение $l=2$, но для более уверенного вывода необходимы дальнейшие исследования.

ON A SPATIAL FILTERING OF LOW-DEGREE GLOBAL OSCILLATIONS OF THE SUN, by Balandin A. L., Grigor'ev V. M., Demidov M. L.—For the spatial filters of three telescopes we have computed the sensitivity functions (functions of spatial response) to global solar oscillations for degrees $l=0\div 21$. The results of computations are given for both radial and horizontal oscillation components. The procedure for computation is described briefly. A possibility to identify the global oscillation modes is discussed. An attempt is made to determine the type of this puzzling phenomenon on the basis of the amplitudes of 160-min oscillations of the Sun observed with three instruments. The value $l=2$ may be the most probable one, but to make more confident conclusion we need the further investigations.

Очень важное значение в бурно развивающейся новой отрасли исследований Солнца (гелиосейсмологии) имеет проблема отождествления мод глобальных колебаний, поскольку различные моды несут информацию о физических свойствах разных слоев недр Солнца [17]. Напомним, что каждая мода характеризуется собственной частотой колебаний ν и пространственными параметрами n , l и m , где n — порядок моды (число узлов вдоль радиуса от центра Солнца до его поверхности), а l и m — степень и азимутальный порядок сферических гармоник, описывающих распределение амплитуд колебаний по поверхности [3, 7]. Индекс m может принимать значения от $-l$ до l . Моды с $n < 0$ называются, следуя классификации Каулинга [15], гравитационными g -модами, с $n > 0$ — акустическими p -модами, а с $n = 0$ — фундаментальными f -модами.

Если задача определения собственных частот колебаний сравнительно легко решается применением разнообразных методов анализа временных рядов, то отождествление их с конкретными модами представляет значительные трудности. В данной работе обсуждается возможность определения горизонтальных масштабов колебаний, характеризуемых величиной l , по наблюдениям, выполненным на телескопах с различными геометриями входных апертур. Такая возможность основывается на том факте, что наблюдения с детектором определенной пространственной конфигурации по-разному чувствительны к колебаниям различных масштабов. Например, при наблюдениях Солнца как звезды мелкомасштабные движения скомпенсируются, и основной вклад в сигнал дадут крупномасштабные осцилляции с размерами порядка радиуса Солнца [9, 13].

Таким образом, каждый детектор может рассматриваться как некий пространственный фильтр, чувствительность которого к колебаниям разных масштабов можно описать соответствующей функцией S_l . Предложено называть ее функцией пространственной фильтрации [20]; однако более корректным представляется новое определение — функция пространственного отклика [11]. Ранее [6, 8—10, 12, 13, 16, 18, 20] уже проводились расчеты таких функций для нескольких конкретных инструментов. Однако они либо ограничивались областью малых значений l [16, 18], либо проводились лишь для радиальных колебаний [10, 20], поскольку привлекались для интерпретации 5-минутных p -мод. Наиболее полное исследование вопроса приведено в [13], но там не

учтены особенности калибровки крымских наблюдений [5]. А именно, не учитывалось то обстоятельство, что крымские измерения прокалиброваны таким образом, что они эквивалентны наблюдениям по схеме «центр минус лимб». При расчете чувствительности способа к различным колебаниям это приводит, относительно схемы «лимб минус весь диск», к значительным отличиям. Эти обстоятельства и побудили авторов провести новые вычисления.

В данной работе приводятся результаты расчетов для трех видов наблюдений глобальных осцилляций Солнца: в Крыму (Кр), в Станфорде (Ст) и на Южном полюсе (Ю. п.) Земли (Солнце как звезда). Подробное описание методик наблюдений можно найти в работах [19, 20, 21]. Основываясь на наблюдаемых на этих трех инструментах амплитудах 160-минутных колебаний, мы предприняли попытку определить тип этого загадочного феномена. Вполне уверенного вывода получить не удалось, но некоторые факты позволяют полагать, что данное колебание является квадрупольным ($l=2$).

Расчет функций чувствительности пространственных фильтров. Расчет чувствительности пространственных фильтров к различным колебаниям основывается на известном положении теории звездных пульсаций [2, 3], согласно которому поле скоростей для каждой моды колебаний в сферической системе координат описывается уравнением:

$$V_{nl}^m(r, \theta, \varphi) = e_r A_{nl}(r) Y_l^m(\theta, \varphi) + e_\theta A_{nl}(h) \frac{\partial}{\partial \theta} Y_l^m(\theta, \varphi) + e_\varphi A_{nl}(h) \frac{1}{\sin \theta} \times \\ \times \frac{\partial}{\partial \varphi} Y_l^m(\theta, \varphi), \quad (1)$$

где e_r, e_θ, e_φ — единичные орты, $Y_l^m(\theta, \varphi)$ — сферические гармоники, $A_{nl}(r)$ и $A_{nl}(h)$ — амплитуды радиальной и горизонтальной составляющих смещений; зависимость от времени опущена.

Если считать, что наблюдаемый сигнал вызван исключительно доплеровским смещением спектральной линии, и пренебречь изменением величины возмущения в атмосфере с высотой в области формирования использованного участка профиля линии, а также вариациями контура с положением на диске Солнца, то вычисление наблюдаемой от конкретной моды колебаний скорости сводится к интегрированию по соответствующей апертуре сферической гармоники Y_l^m (для радиальной компоненты) или ее производных по θ и по φ (для тангенциальной):

$$V_{lm} = \int_A V_{lm}^D(\theta, \varphi) \gamma(\theta, \varphi) dA = S_{lm} A_{lm}, \quad (2)$$

где $V_{lm}^D(\theta, \varphi)$ — проекция скорости на луч зрения, $\gamma(\theta, \varphi)$ — весовая функция, A_{lm} — амплитуда колебания, S_{lm} — искомая функция чувствительности пространственного фильтра.

В качестве весовой функции используется функция потемнения диска к краю в близлежащем континууме. Интегрирование удобнее проводить в полярной системе координат (ρ, ψ), выполнив соответствующие преобразования. В этой системе координат весовая функция имеет вид:

$$\gamma(\rho) = 1 - u_2 (1 - (1 - \rho^2)^{1/2}) - v_2 \rho^2. \quad (3)$$

Значения параметров u_2 и v_2 в зависимости от длины волны приведены в [1].

Таким образом, для определения сигнала при наблюдениях Солнца как звезды необходимо выполнить интегрирование по ρ от 0 до 1, а при определении дифференциальных сигналов $V_{\text{центр}} - V_{\text{край}}$ крымского и станфордского детекторов необходимо вычислить и затем вычесть интегралы от 0 до 0.66 и от 0.66 до 1.0 для Крыма и соответственно от 0 до 0.50 и от 0.55 до 0.80 для Станфорда.

Для этих трех фильтров в табл. 1 (для вертикальной составляющей) и в табл. 2 (для горизонтальной) приведены функции пространственного отклика для сферических гармоник до $l=10$. Параметры в (3) принимались при расчетах равными $u_2=0.96$; $v_2=-0.22$ для Крыма и Станфорда (наблюдения проводятся в линии λ 512.4 нм (FeI) и $u_2=0.89$, $v_2=-0.23$ для наблюдений на Южном полюсе (линия λ 589.6 нм Na I). Сферическая система координат ориентировалась таким образом, чтобы ось z находилась в картинной плоскости, а ось y была направлена вдоль луча зрения (углы Эйлера принимались: $\alpha=\pi/2$, $\beta=\gamma=0$). При такой ориентации сигналы для не приведенных в таблицах значений m равны нулю.

Таблица 1. Функция пространственного отклика S_{lm}^r к радиальным колебаниям для наблюдений в Крыму, в Станфорде и Солнца как звезды (соответственно первое, второе и третье число для каждого l)

l	m											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	0.351 0.212 0.708											
1		-0.474 -0.349 -0.549										
2			0.594 0.546 0.319									
3				-0.571 -0.691 -0.124								
4					0.381 0.697 0.019							
5						-0.119 -0.542 0.008						
6							-0.008 0.281 -0.003					
7								0.160 -0.011 -0.002				
8									-0.127 -0.178 0.001			
9										0.045 0.242		
10											0.031 -0.196	

Таблица 2. Функции пространственного отклика S_{lm}^r к горизонтальным колебаниям для наблюдений в Крыму, в Станфорде и Солнца как звезды (соответственно первое, второе и третье число для каждого l)

l	m													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1		0.470 0.349 -0.449												
2	0.244 0.334 -0.389		-0.487 -0.667 0.777											
3		0.103 -0.126 0.150		-0.413 0.505 -0.601										
4	0.563 0.107 0.060		-0.250 -0.048 -0.027		1.501 0.286 0.161									
5		-0.218 -0.172 0.012		0.218 0.172 -0.012		-1.745 -1.377 0.093								
6	-0.301 -0.673 0.018		0.061 0.135 -0.004		-0.098 -0.215 0.006		0.985 2.153 -0.058							
7		-0.006 0.165 0.003		0.003 -0.079 -0.001		-0.007 0.176 0.003		0.084 -2.112 -0.040						
8	-0.213 0.331 0.010		0.024 -0.038 -0.001		-0.019 0.030 0.001		0.056 -0.086 -0.002		-0.779 1.210 0.036					
9		0.051 0.005 0.001		-0.015 -0.002		0.017 0.002		-0.058 -0.006 -0.001		0.935 0.101 0.023				
10	0.174 0.286 0.008		-0.013 -0.021		0.006 0.010		-0.009 -0.015		0.039 0.064 0.002				-0.708 -1.161 -0.032	

Из рассмотрения таблиц ясно видно, что детекторы по-разному чувствительны к различным гармоникам. Причем сигнал скорости тем меньше, чем сложнее распределение поля скоростей по поверхности. Поскольку по мере вращения Солнца вклад в сигнал от каждой гармоники (если $m \neq 0$) будет меняться, то для расчета чувствительности детекторов независимо от m , вращения и ориентации системы координат необходимо привлечь дополнительные допущения. Первое — предполагается, что при дан-

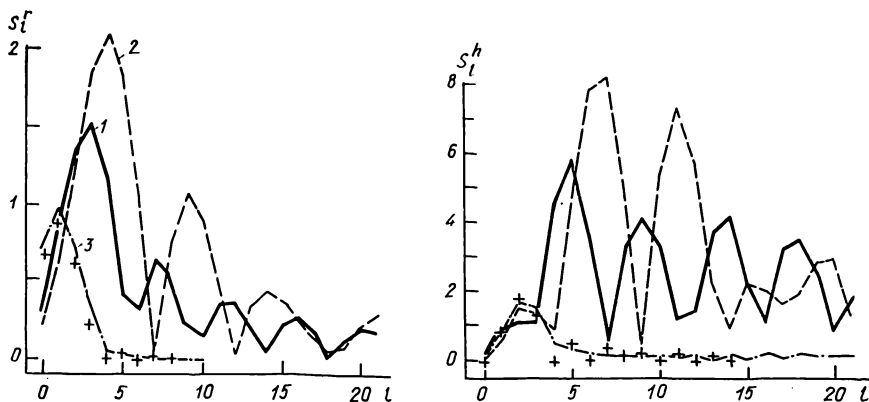


Рис. 1. Функции пространственного отклика S_l^r к радиальным колебаниям для наблюдений в Крыму (1), Станфорде (2), а также наблюдений Солнца как звезды (3). Для последнего случая выполнены дополнительно расчеты в предположении отсутствия потемнения диска к краю (текст). Соответствующие результаты показаны крестиками
Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для горизонтальных колебаний

ном l возбуждается $2l+1$ мод одинаковой частоты, с равными амплитудами и случайными фазами. Второе — ориентация мод колебаний носит случайный характер. Третье — вращательным расщеплением можно пренебречь.

Тогда, если наблюдаемую скорость от одной моды записать в виде

$$V_{lm}^{obs} = S_{lm} A_l, \tag{4}$$

то скорость от ансамбля $2l+1$ мод степени l можно представить следующим образом:

$$V_l^{obs} = S_l A_l, \tag{5}$$

где S_l — искомая функция пространственного отклика, рассчитанная по формуле

$$S_l = \left(\frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l S_{lm}^2 \right)^{1/2}. \tag{6}$$

Для определения функций S_l^r и S_l^h для каждого фильтра достаточно, таким образом, с использованием табл. 1 и 2 произвести по формуле (6) соответствующие вычисления. Однако, поскольку из теории сферических функций известно, что $(2l+1)$ -мерное множество гармоник степени l инвариантно относительно любого вращения системы координат, то с целью упрощения расчетов целесообразно систему координат сориентировать таким образом, чтобы ось z совпадала с лучом зрения. В этом случае $S_{lm} = 0$, если $m \neq 0$ и, следовательно, вычисления функции чувствительности выполняются по очень простой формуле

$$S_l = (2l+1)^{1/2} S_{l0}. \tag{7}$$

Вычисленные по этой формуле функции пространственного отклика телескопов в Крыму, Станфорде и на Южном полюсе приведены на рис. 1 (для вертикальной составляющей) и 2 (для горизонтальной). Отметим, что графики на рис. 1 для последних двух фильтров полностью совпадают с соответствующими графиками первого рисунка из [9], где расчеты проведены до $l=13$. Крестиками на рисунках показаны значения функции S_l^r и S_l^h , рассчитанные для наблюдений Солнца как звезды, но без потемнения диска к краю ($\gamma(\rho)=1$). Мы попытались оценить, насколько значимо отличие чувствительностей при наблюдениях в спектральных линиях, имеющих различные функ-

ции $\gamma(\rho)$. В случае достаточно сильного отличия можно было бы использовать наблюдения в разных линиях для фильтрации колебаний на звездах. Однако расчеты показывают, что отличие незначительно, и следовательно, такой метод сложно реализовать практически.

Из рассмотрения рисунков видно, что при наблюдениях Солнца как звезды основной вклад в сигнал дают гармоники с $l=0 \div 3$, а вклад остальных гармоник пренебрежимо мал. Дифференциальные же фильтры Крыма и Станфорда обладают достаточно

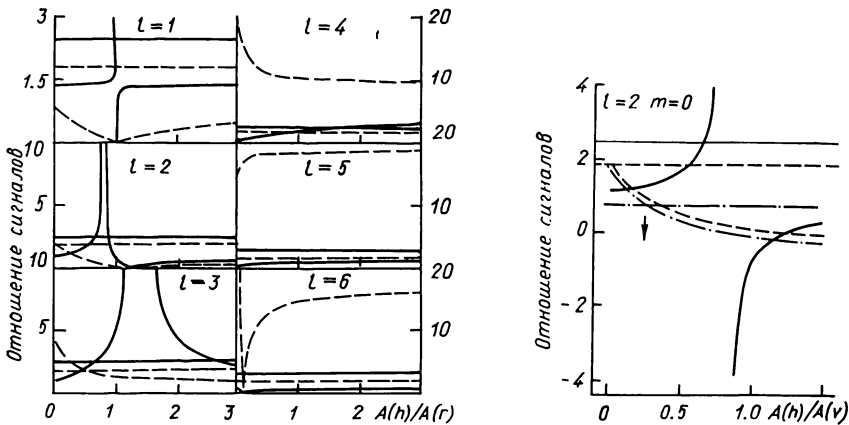


Рис. 3. Зависимость теоретических отношений сигналов Кр/Ст (1) и Кр/Ю. п. (2) от соотношения амплитуд радиальной и горизонтальной составляющих солнечных колебаний. Горизонтальными линиями отмечены соответствующие отношения наблюдаемых амплитуд

Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для квадрупольной моды колебаний. Ось колебаний совпадает с осью вращения Солнца, т. е. лежит в картинной плоскости. Штрихпунктирные линии соответствуют отношению Ст/Ю. п. Стрелкой показано значение $A(h)/A(r)=0.25$, при котором отношения наблюдаемых амплитуд сигналов (при коррекции в 2 раза крымских данных) пересекаются с соответствующими теоретическими кривыми

высокой, но все же убывающей с ростом l чувствительностью в широком интервале значений l , причем она имеет циклический характер. Положения максимальной и минимальной чувствительности для вертикальной и горизонтальной составляющих не совпадают, максимальная чувствительность для разных фильтров приходится на разные значения l .

Поскольку истинные амплитуды колебаний неизвестны, то приведенные графики, вообще говоря, прямой информации о вкладе в сигнал каждой гармоники не несут. Поэтому по наблюдениям с одним фильтром использование его функции пространственного отклика для отождествления мод представляется необоснованным. При наблюдениях же с разными фильтрами, сравнивая отношения амплитуд колебаний одинаковой частоты (которые, естественно, не зависят от истинной амплитуды) с теоретически рассчитанными отношениями, можно получить достаточно однозначную оценку величины l . В общем случае, однако, необходимо учитывать вклад в сигнал как вертикальной, так и горизонтальной составляющих (например, для гравитационных g -мод), относительные амплитуды которых для разных мод сильно отличаются. Поэтому для анализируемых трех пространственных фильтров мы произвели расчет отношений обобщенных функций чувствительности

$$S'_i = S_i^r + S_i^h A(h)/A(r) \quad (8)$$

в широком интервале возможных значений отношения амплитуд горизонтальной и радиальной составляющих колебаний, от чисто радиальных до чисто горизонтальных. Полученные результаты приведены в табл. 3 и на рис. 3. Расчеты проводились с использованием табл. 1 и 2 и формулы (6). Для чисто радиальных пульсаций с $l=0$ отношение сигналов не зависит, естественно, от $A(h)/A(r)$ и составляет для Крыма и Станфорда 1.65, для Крыма и Южного полюса — 0.49.

Таким образом, сравнивая отношения наблюдаемых с несколькими фильтрами (в данном случае тремя) амплитуд с теоретически рассчитанными для разных гармоник

отношениями функций S'_l , ту степень l , при которой эти отношения совпадают при одном и том же значении $A(h)/A(r)$ или близких значениях, и следует принять за степень моды наблюдаемого колебания. Величина отношения $A(h)/A(r)$ при этом может послужить основой для определения, уже из модельных расчетов, порядка n моды. Мы попытались использовать этот прием для отождествления хорошо известных 160-минутных колебаний.

Таблица 3. Теоретические отношения сигналов для разных пространственных фильтров в зависимости от соотношения вертикальной и горизонтальной составляющих скорости колебаний

$A(h)/A(r)$	l								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1.36 0.86	1.09 1.86	0.83 4.62	0.55 19.75	0.22 14.91	0.30 26.08	14.78 99.88	0.71 208.5	0.19 55.97
0.2	1.36 0.59	1.20 1.15	1.11 2.68	0.90 13.21	0.57 17.64	0.16 7.66	0.43 18.26	4.41 36.29	0.89 43.12
0.4	1.36 0.39	1.43 0.71	1.51 2.02	1.21 11.71	0.75 18.13	0.27 11.74	0.27 10.90	1.43 29.29	1.48 42.07
0.6	1.38 0.23	2.07 0.43	2.11 1.69	1.48 11.04	0.85 18.33	0.32 13.33	0.17 8.14	1.08 26.82	2.00 41.67
0.8	1.40 0.11	17.23 0.24	3.14 1.49	1.71 10.66	0.92 18.44	0.35 14.18	0.13 6.69	0.95 25.57	2.45 41.47
1.0	0.05	0.87 0.11	5.28 1.36	1.91 10.42	0.97 18.61	0.37 14.70	0.12 5.80	0.88 24.81	2.85 41.35
1.2	1.29 0.08	0.03 0.01	12.49 1.26	2.10 10.25	1.01 18.56	0.38 15.06	0.10 5.20	0.83 24.29	3.21 41.26
1.4	1.32 0.16	0.23 0.07	73.78 1.19	2.26 10.13	1.04 18.60	0.39 15.32	0.09 4.77	0.80 23.93	3.53 41.20
1.6	1.33 0.22	0.36 0.13	10.57 1.13	2.41 10.03	1.06 18.62	0.40 15.52	0.09 24.44	0.78 3.65	3.81 41.15
1.8	1.33 0.27	0.43 0.18	6.04 1.09	2.55 9.96	1.08 18.64	0.41 15.67	0.08 4.18	0.76 24.43	4.07 41.12
2.0	1.33 0.32	0.48 0.22	4.39 1.05	2.67 9.89	1.09 18.66	0.41 15.79	0.08 3.98	0.75 23.26	4.31 41.09
3.0	1.34 0.49	0.60 0.35	2.20 0.94	3.14 9.70	1.15 18.71	0.43 16.17	0.06 3.35	0.71 22.74	5.22 41.00
4.0	1.34 0.60	0.64 0.41	1.67 0.88	3.47 9.61	1.17 18.74	0.43 16.36	0.06 3.03	0.69 22.48	5.85 40.96
∞	1.35 1.01	0.73 0.61	0.85 0.70	5.10 9.32	1.26 18.82	0.46 16.91	0.04 2.13	0.65 21.74	8.94 40.83

Примечание. В первой строке при каждом значении $A(h)/A(r)$ приведены отношения сигналов Кр/Ст, а во второй — отношения сигналов Кр/Ю. п.

Об идентификации колебаний Солнца с периодом 160 минут. Как известно [6], наблюдения 160-минутных колебаний в Крыму, Станфорде и на Южном полюсе показали соответственно амплитуды: 54, 22 и 33 см/с. Следовательно, отношения амплитуд

$$A(\text{Кр})/A(\text{Ст}) = 2.45; \quad A(\text{Кр})/A(\text{Ю.п.}) = 1.64. \quad (9)$$

Эти значения показаны на рис. 3 горизонтальными линиями — сплошной для первого отношения и пунктирной — для второго. Видно, что с соответствующими кривыми теоретических отношений эти линии пересекаются при одном значении $A(h)/A(r) = 0.6$, для $l=3$, и при сравнительно близких значениях — для $l=2$. Для всех остальных l наблюдаемые отношения пересекаются с теоретическими либо при очень далеких значениях отношения $A(h)/A(r)$, либо вообще не пересекаются с ними. Для больших l

это очевидно, поскольку при наблюдениях Солнца как звезды вклад гармоник с $l \geq 4$ становится пренебрежимо мал.

При анализе вероятных значений $l=2$ и $l=3$ и выборе между ними необходимо учесть, что приведенные на рис. 3 и в табл. 3 данные рассчитаны в предположениях, отнюдь не очевидных для случая 160-минутных колебаний. А именно, указанные значения амплитуд получены из когерентных спектров мощности длительных рядов наблюдений, а не из средних спектров мощности однодневных записей, что имело место при обработке пятиминутных колебаний, [14], когда применимость вышеназванных предположений не вызывает значительных сомнений.

Таким образом, есть основания полагать, что полюс 160-минутных колебаний занимает достаточно фиксированное положение. Представляется разумным рассмотреть вариант, когда он находится на оси вращения Солнца, то есть когда ось z сферической системы координат, в которой описываются колебания, лежит в картинной плоскости. При этом достаточно анализировать лишь гармоники с $m=0$. Тогда гармоника $l=3$ сразу отпадает, поскольку при таком выборе ориентации системы координат она не дает никакого вклада в сигнал, и остается вариант $l=2$.

Рассмотрим его подробней. На рис. 4 для этой гармоники в интервале значений $A(h)/A(r)$ от 0 до 1.5 показаны теоретические отношения сигналов Кр/Ст, Кр/Ю. п. и Ст/Ю. п., а также (горизонтальными линиями) соответствующие наблюдаемые отношения. Видно, что для разных комбинаций фильтров они пересекаются при различных значениях $A(h)/A(r)$.

Одной из возможных причин такого положения может быть то обстоятельство, что используемые данные получены на разнотипных инструментах, индивидуальные особенности которых могут приводить к систематическому различию результатов измерений. Например, если уменьшить крымское значение амплитуды в 2 раза, то окажется, что все три отношения экспериментальных амплитуд пересекутся с соответствующими теоретическими кривыми при $A(h)/A(r)=0.26$ с удивительной точностью. На рис. 4 это значение отмечено стрелкой. Тем самым удастся согласовать наблюдательные данные с теоретическим описанием 160-минутных колебаний квадрупольной модой.

Нужно отметить, что использованный при этом поправочный коэффициент не является совершенно произвольным. Дело в том, что из наблюдений магнитного поля Солнца как звезды известно [4], что крымские данные превышают станфордские ровно в 2 раза, т. е. точно на такой коэффициент, который был использован нами для коррекции амплитуд (идея учета поправочного множителя принадлежит В. А. Котову). Причиной такого систематического различия наблюдений могут быть различия в процедурах калибровки и в оптических схемах инструментов. Для полного анализа вопроса необходимы дальнейшие исследования.

Дискуссия. Полученные в данной работе результаты можно использовать для отождествления мод глобальных осцилляций Солнца, основываясь не на теоретических соотношениях, а на сравнении амплитуд колебаний, наблюдаемых с помощью различных пространственных фильтров. Впрочем, необходимо подчеркнуть, что сравнение данных, полученных на разнотипных инструментах, является довольно некорректной операцией из-за трудноучитываемых индивидуальных особенностей конструкции и методики наблюдений. Необходимы наблюдения на однотипных инструментах, желательны одновременные и в одной и той же спектральной линии.

Из-за названных и других трудностей полученный в данной работе результат о квадрупольном характере 160-минутных колебаний ($l=2$) нельзя считать строго доказанным. Можно отметить следующие проблематичные моменты примененного анализа.

Поскольку наблюдения на Южном полюсе выполнены в течение сравнительно непродолжительного промежутка времени ($\sim 5^d$), в отличие от многолетних наблюдений в Крыму и в Станфорде, а амплитуда 160-минутных колебаний, как известно [6], со временем меняется, то полученные значения отношений амплитуд, включающие A (Ю. п.), содержат значительную неопределенность.

Далее, хотя мы ставили целью сопоставление только экспериментальных данных трех рядов наблюдений, тем не менее интересно отметить, что полученные нами соотношения радиальной и горизонтальной компонент $A(h)/A(r)=0.65$ для комбинации Крым — Станфорд и $A(h)/A(r)=0.26$ для комбинации всех трех амплитуд (с коррекцией крымских данных), отличаются от значения $A(h)/A(r)=0.9$, даваемого для 160-

минутного периода теорией [3] и использованного в [9]. (Отметим, что, как это видно из рис. 4, при таком значении $A(h)/A(r)$ Крым и Станфорд от квадрупольного колебания зарегистрировали бы сигналы в противофазе).

Наконец, В. А. Котов высказал предположение, что если скорректировать наблюдаемые в Крыму и Станфорде амплитуды (множитель 2, вытекающий из сравнения наблюдений общего магнитного поля Солнца в этих обсерваториях), то полученное отношение $A(\text{Кр})/A(\text{Ст})=1.23$ будет несильно отличаться от того, которое должно быть при радиальных ($l=0$) колебаниях.

Таким образом, одним из основных выводов данной работы следует признать большую сложность сравнения разнородных рядов наблюдений, выполненных на разнотипных инструментах.

Тем не менее, имея в виду 160-минутные колебания, безусловно, заслуживает внимания тот факт, что при определенных допущениях наблюдения в Крыму, Станфорде и на Южном полюсе дают удивительно точное согласие для $l=2$.

Заключение. В работе рассчитаны чувствительности телескопов в Крыму, Станфорде и Ницце к описываемым сферическими функциями глобальным колебаниям Солнца. Функции пространственного отклика для дифференциальных фильтров обладают некоторой циклическостью и с ростом l уменьшаются. При наблюдениях Солнца как звезды максимальное значение функции пространственного отклика приходится на $l=1$ для радиальной компоненты и на $l=2+3$ для горизонтальной, а для крымского и станфордского фильтров соответственно на $l=3$ и на $l=5$ для радиальной, на $l=5$ и на $l=7$ для горизонтальной. Для устранения неопределенности, связанной с незнанием истинных амплитуд колебаний, необходимы наблюдения с разными пространственными фильтрами, причем чем больше число фильтров, тем с большей уверенностью возможно отождествление мод колебаний. Желательны одновременные наблюдения в одной спектральной линии и на однотипных инструментах.

Предпринята попытка отождествить, исходя из наблюдаемых в Крыму, Станфорде и на Южном полюсе амплитуд, моду 160-минутных колебаний Солнца. Наиболее вероятно значение $l=2$, однако этот результат считать окончательным нельзя, и необходимы дальнейшие исследования.

В целом, итоги данной работы доказывают, по мнению авторов, перспективность метода пространственной фильтрации для задач диагностики глобальных колебаний Солнца.

Авторы благодарны В. А. Котову за обсуждение некоторых вопросов работы и полезные советы, а также Г. В. Куклину за плодотворную дискуссию.

1. Аллен К. У. Астрофизические величины.— М.: Мир, 1977.—446 с.
2. Воронцов С. В., Жарков В. Н. Собственные колебания Солнца и планет-гигантов // Успехи физ. наук.—1981.—134, вып. 4.— С. 675—710.
3. Кокс Дж. П. Теория звездных пульсаций.— М.: Мир, 1983.—326 с.
4. Котов В. А., Северный А. Б. Общее магнитное поле Солнца как звезды: Каталог 1968—1976.— М., 1983.—24 с.— В надзаг.: Межведомств. геофиз. ком. при Президиуме АН СССР. Материалы мирового центра данных Б.
5. Котов В. А., Северный А. Б., Цап Т. Т. Исследование глобальных колебаний Солнца. I: Метод и инструмент // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1982.—65.— С. 3—34.
6. Котов В. А., Северный А. Б., Цап Т. Т. Исследование глобальных колебаний Солнца. II: Результаты наблюдений в 1974—1980 гг., их анализ и некоторые выводы // Там же.—1983.—66.— С. 3—71.
7. Тассуль Ж. Л. Теория вращающихся звезд.— М.: Мир, 1982.—472 с.
8. Brookes J. R., Isaak G. R., Raay H. B. van der. The observation of a rotating body using high-resolution spectroscopy // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1978.—185, N 1.— P. 19—22.
9. Christensen-Dalsgaard J. Solar oscillations: Theory // Proc. Fifth European regional meet. astronomy «Variability in stars and galaxies».—Liege, 1980.— P. A 1. 1.
10. Christensen-Dalsgaard J. Interpretation and comparison of observations of solar oscillations // Pulsations in classical and cataclysmic variable stars / Eds. J. P. Cox, C. J. Hansen.— JILA: Univ. Colorado, 1982.— P. 99—116.
11. Christensen-Dalsgaard J. Optimized response functions for two-dimensional observations of solar oscillations // Solar seismology from space / Ed. R. K. Ulrich.— JPL: Pasadena, 1984.— P. 209—244.
12. Christensen-Dalsgaard J., Gough D. Implications of the whole disk Doppler observations of the Sun // Nonradial and nonlinear stellar pulsation / Eds. H. A. Hill, W. A. Dziembowski.—1980.— P. 184—190 (Lecture notes in physics; Vol. 125).

13. *Christensen-Dalsgaard J., Gough D. O.* On the interpretation of five-minute oscillations in solar spectrum line shifts // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1982.—198, N 1.— P. 141—171.
14. *Claverie A., Isaak G. R., McLeod C. P. et al.* Solar structure from global studies of the 5-minute oscillation // *Nature.*—1979.—282.— P. 591—594.
15. *Cowling T. G.* The non-radial oscillations of polytropic stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1941.—101, N 5.— P. 367—373.
16. *Dittmer P. H.* Large scale periodic solar velocities: on observational study: Thesis / Stanford Univ. Instit. Plasma.—Stanford, 1977.—205 p.— (Res. Report; N 686).
17. *Duvall P. H., Harvey J. W.* Observations of solar oscillations of low and intermediate degree // *Nature.*—1983.—302, N 1.— P. 24—27.
18. *Dziembowski W.* Light and radial velocity variations in a nonradially oscillating star // *Acta Astron.*—1977.—27.— P. 203—212.
19. *Grec G., Fassat E., Pomerantz M.* Solar oscillations: full disk observations from the geographic South Pole // *Nature.*—1980.—288.— P. 541—544.
20. *Hill H. A.* Seismic sounding of the Sun // *The New Solar Physics* // Ed. J. A. Eddy; AAAS.—Washington, D. C.: Westview press, 1978.— P. 135—214.
21. *Kotov V. A., Severny A. B., Tsap T. T.* Observations of oscillations of the Sun // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1978.—183, N 1.— P. 61—78.

Сиб. ин-т зем. магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн СО АН СССР, Иркутск

Поступила в редакцию
15.10.85

РЕФЕРАТЫ ДЕПОНИРОВАННЫХ РУКОПИСЕЙ

УДК 520.254—13+523.9—323.2+523.4—323.2

СКЛОНЕНИЯ СОЛНЦА И БОЛЬШИХ ПЛАНЕТ, ПОЛУЧЕННЫЕ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ НА ВЕРТИКАЛЬНОМ КРУГЕ ВАНШАФФА В ГОЛОСЕЕВЕ В 1979—1983 гг. / Бахонский А. В., Лазоренко П. Ф., Миняйло Н. Ф., Ненахова Е. М., Харин А. С.

(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 2638-В86)

Приводятся геоцентрические склонения Солнца (160), Меркурия (12), Венеры (108), Марса (40), Юпитера (45), Сатурна (57), Урана (24) и Нептуна (5), полученные в системе FK4.

УДК 551.593.1

СРЕДНЕСЕЗОННЫЕ МОДЕЛИ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ УКРАИНЫ / Василенко Н. А., Падун Н. Н., Рукина А. Н., Шабельников А. В.

(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 3499-В86)

Приведены среднестатистические значения метеорологических элементов и коэффициентов преломления воздуха (в оптическом и радиодиапазонах) до высоты 30 км в ясную погоду по данным аэрологического зондирования атмосферы в 1971—1980 гг.

Проведен сравнительный анализ сезонных и суточных изменений градиентов температуры и коэффициентов преломления в 16 составленных моделях атмосферы.

Рекомендуется проводить рефракционные исследования и составлять местные модели атмосферы симметрично относительно астрономических дат весенне-осеннего равноденствий и летне-зимнего солнцестояний.