

УДК 523.942

ГУРТОВЕНКО Э. А., ШЕМИНОВА В. А., РУТТЕН Р. Дж.

ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ОБЩЕГО ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ

Амплитуда общего поля скоростей в средних и верхних слоях фотосферы изучалась путем анализа слабых фраунгоферовых линий, наблюдающихся в близких крыльях линий H, K Ca II. Использовались записи спектра Солнца с высоким спектральным разрешением, полученные с фурье-спектрометром обсерватории Кит-Пик для четырех положений на диске Солнца. Результаты подтверждают основные общеизвестные данные об амплитуде поля скоростей в средних слоях фотосферы, выведенные ранее в других работах. Установлено также, что радиальная и тангенциальная компоненты этой амплитуды продолжают уменьшаться с высотой также и в верхней фотосфере, вплоть до высот $\lg \tau_5 \leq -3,0$ ($h \approx 450$ км) и $\lg \tau_5 \leq -4,0$ ($h \approx 560$ км) соответственно. Эти данные указывают на то, что конвективные движения проникают в область температурного минимума и доминируют там по крайней мере до указанных выше высот.

VELOCITY FIELD IN THE TEMPERATURE MINIMUM REGION OF THE SOLAR ATMOSPHERE, by *Gurtovenko E. A., Sheminova V. A., Rutten R. J.*— The weak Fraunhofer lines in the near wings of H, K, Ca II lines have been analysed to study a velocity amplitude of the general motion field in the middle and outer photospheric layers. The high-resolution tracings of the solar spectrum taken at four positions on the solar disk with the Fourier spectrometer of the Kitt Peak National Observatory were used in the study. The results confirm the basic well-known data on the velocity amplitude in the middle photospheric layers, that had been obtained before in other works. Besides, it is shown that the radial and tangential components of the velocity amplitude continue to decrease with height also in the outer photosphere down to the depths $\lg \tau_5 \leq -3,0$ ($h \approx 450$ km) and $\lg \tau_5 \leq -4,0$ ($h \approx 560$ km) respectively. This result shows that the convective motions penetrate into the temperature minimum region and dominate there, at least to the depths mentioned above.

1. Введение

Поле нетепловых скоростей, или так называемая турбулентность, является важнейшей характеристикой строения солнечной и звездных фотосфер. «Турбулентность» определяет величину и характер нерадиативного переноса энергии из конвективной зоны в верхние слои фотосферы, ее тонкую структуру. Она влияет на эквивалентную ширину и форму профилей фраунгоферовых линий, которые являются важнейшим источником информации о физических условиях в звездных фотосферах.

Поле скоростей в солнечной фотосфере (по крайней мере в рамках однородной фотосферной модели и концепции микро-, макротурбулентности) изучено уже достаточно хорошо [1–5]. Однако в верхней фотосфере и области температурного минимума эти данные скудны, так как контуры сильных линий, образующихся высоко, малочувствительны к полю скоростей. К тому же центральные интенсивности сильных линий могут существенно подвергаться влиянию отклонения от ЛТР.

Тангенциальная составляющая амплитуды общего поля скоростей ~ 2 км/с выведена Кэнфилдом [6] по слабым эмиссионным линиям в крыльях линий H, K Ca II. Такого же порядка амплитуды «турбулентной» скорости в верхних слоях фотосферы по молекулярным линиям CN получили Маунт и Линский [7]. Однако Порфирьева [8] по слабым линиям той же молекулы получила величину, в среднем близкую к 3,5 км/с. Определение радиальной компоненты общего поля скоростей в верхней фотосфере выполнил также Айрес [9], используя ряд слабых линий поглощения в крыльях линий H, K Ca II. Им получена амплитуда $V^{\text{rad}} \approx 1,6$ км·с⁻¹, не изменяющаяся заметно с глубиной. Более уверенных данных об ампли-

туда общего поля скоростей в области температурного минимума нет. Важность исследования поля скоростей в переходной области между фотосферой и хромосферой определяется еще и другими обстоятельствами. В области температурного минимума нарушается условие равновесного образования фраунгоферовых линий, затухают конвективные движения и получают развитие осцилляционные движения. Из этой зоны начинается непосредственный перенос механической энергии в хромосферу и корону. Поэтому сведения о поле скоростей в этой области могут дать дополнительную информацию о взаимосвязи конвекции и осцилляций и о механизме нагрева верхних слоев солнечной атмосферы. Изменяются и более конкретные вопросы. В частности, неясно, почему амплитуда общего поля скоростей на этой высоте все еще так велика? Скорости конвективных движений должны быть там близки к нулю, а скорости осцилляционных движений не достигают величины 2 км/с даже в хромосфере.

В настоящей работе получены предварительные результаты изучения амплитуды общего поля скоростей в верхней фотосфере.

2. Наблюдательный материал, метод исследования

В работе использовался спектр Солнца в области линий H, K Ca II для четырех положений на диске: $\cos \theta = 1,0; 0,67; 0,45$ и $0,20$. Спектр Солнца, записанный на магнитную ленту с интервалом $\Delta \lambda \approx 2 m\text{Å}$, получен с фурье-спектрометром обсерватории Кит-Пик Р. Руттенем. Фурье-спектрометр обсерватории Кит-Пик обеспечивает наблюдения практически идеального солнечного спектра. На рис. 1 приведен в качестве образца участок спектра близ линий $\lambda 3969,641 \text{ FeI}$ и $\lambda 3969,755 \text{ CrI}$ для $\cos \theta = 0,45$.

В настоящем исследовании выполнен упрощенный анализ наблюдательного материала по методике, в общем близкой к методике Айреса [9], а именно: 1) использовались только слабые фраунгоферовы линии (мы выбрали линии с центральной глубиной не более 30% от интенсивности смежной эмиссии в крыльях линий H, K Ca II); 2) предполагалось, что глубина образования слабых линий равна глубине образования близлежащей эмиссии в крыле H, K (предположение Айреса). Таким образом, слабые линии, находящиеся на разных расстояниях от центра линий H, K, дают информацию о поле скоростей на соответствующих глубинах в фотосфере; 3) контур рассматриваемых линий — доплеровский с полушириной $\Delta \lambda_D =$

$$= \frac{h}{1,66} = \frac{\lambda}{c} \sqrt{2RT/\mu + V^2}, \text{ где } h \text{ — наблюдаемая полная полуширина слабых}$$

линий, а V — искомая «турбулентная» скорость. В отличие от Айреса, мы не использовали для описания крыльев H, K (на расстояниях от центра линий $\Delta \lambda > 0,5 \text{ Å}$) сложный механизм частичного когерентного рассеяния. Крылья линий достаточно хорошо описываются условием ЛТР и гарвард-смитсоновской моделью фотосферы с температурой возбуждения, близкой к температуре модели Холвегера — Мюллер. Подобное приближение не вызывает существенных ошибок в рассчитываемой средней глубине образования эмиссии в крыльях H, K.

В табл. 1 приведены результаты таких расчетов, выполненных по эмиссионной функции вклада [10]. По данным этой таблицы строились графики, из которых по величине $\Delta \lambda$ снимались глубины образования для различных расстояний $\Delta \lambda$ от центра линий. Это позволяло по данным фотосферной модели найти температуру и по измеренной полуширине h элементарным путем определить амплитуду общего поля скоростей.

Предположение Айреса [9] о равенстве глубины образования слабых фраунгоферовых линий и глубин образования близлежащей эмиссии в крыльях H, K неверно. Оно может давать близкие к истине результаты лишь постольку, поскольку глубины образования эмиссии и депрессии в очень интенсивных линиях близки [10]. Однако даже и в этом случае слабые линии поглощения в крыльях H, K образуются выше уровня образования крыльев этих линий. Поэтому шкала глубин Айреса определяет нижний предел соответствующих величин. В связи с этим мы выполняли

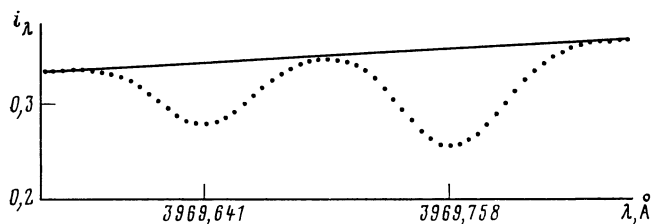


Рис. 1. Участок крыла линии Н (наклонная прямая) с линиями $\lambda 3969,641 \text{ Fe I}$ и $\lambda 3969,758 \text{ Cr I}$ по наблюдениям с фурье-спектрометром обсерватории Кит-Пик. $\cos \theta = 0,45$, точки нанесены с интервалом $\sim 4 \text{ m\AA}$, i_λ — интенсивность в усл. ед.

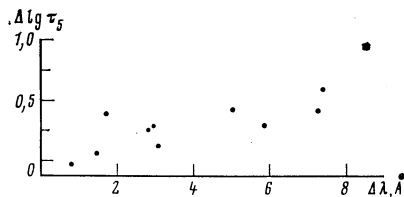


Рис. 2. Зависимость разности глубин образования $\Delta \lg \tau_5 = \lg \tau_{5E} - \lg \tau_{5D}$ (см. табл. 2) от расстояния $\Delta \lambda$ от центра линии К; $\cos \theta = 1$

более точный (и принципиально верный) расчет глубин образования тех же слабых линий по депрессионной функции вклада [10]. При этом использовался метод синтеза блендирующихся фраунгоферовых линий, т. е.

в выражении для депрессионной функции вклада $F_D = g \frac{\kappa_l}{\kappa_c} e^{-\tau_l}$ коэффици-

ент селективного поглощения κ_l и селективная оптическая глубина τ_l определялись суммой коэффициентов поглощения в центре соответствующей слабой линии и линии Н (или К).

Для исследования в близких крыльях Н и К были выбраны практически все слабые линии (согласно указанному выше критерию), полуширины которых можно было определить достаточно надежно. Исключены линии Co I из-за возможного уширения их сверхтонкой структурой. Перечень линий, их атомные параметры и центральная глубина (по отношению к крылу Н или К) приведены в первых четырех столбцах табл. 2. Длины волн и потенциалы возбуждения взяты из каталога Мур и др. [11]. Для четырех линий Fe I и линии Nd II потенциалы возбуждения в каталоге не приведены. Для линий Fe I в расчетах глубины образования по депрессионной функции вклада их потенциалы возбуждения принимались равными 3,0 эВ, что близко к потенциалу возбуждения всех остальных линий Fe I в нашем списке. Глубина образования линии Nd II определялась косвенным путем из графиков зависимости разности $\Delta \lg \tau_5 = \lg \tau_{5E} - \lg \tau_{5D}$ (столбцы 5–6, 8–9, 11–12 и 14–15 табл. 2) от расстояния $\Delta \lambda$ до центра линии К. Пример такой зависимости для $\cos \theta = 1$ приведен на рис. 2.

Произведение содержания элемента на силу осцилляторов для слабых линий определялось в расчетах путем согласия наблюдаемой и рассчитываемой остаточной интенсивности в линии. Для линий Н, К Ca II силы осцилляторов, содержание элемента и постоянная затухания принимались по данным Т. Айреса [12].

3. Обсуждение результатов

Полученные результаты — глубины образования линий, выведенные двумя способами ($\lg \tau_{5E}$ и $\lg \tau_{5D}$) и соответствующие «турбулентные» скорости (V) приведены в 5–16-м столбцах табл. 2. Графически данные представлены на рис. 3–6. Различие указанных выше глубин (из-за мед-

Глубины образования эмиссии в крыльях Н и К на разных расстояниях от центра линий ($\Delta\lambda$) и от центра диска Солнца ($\cos \theta$) Таблица 1

$\Delta\lambda, \text{ \AA}$	Линия К						Линия Н									
	$\cos \theta = 1,0$		$\cos \theta = 0,67$		$\cos \theta = 0,2$		$\cos \theta = 1,0$		$\cos \theta = 0,67$		$\cos \theta = 0,2$					
	Элемент	Потенциал возбуждения (эВ)	Центральная глубина	$\lg \tau_{5E}$	$\lg \tau_{5D}$	V	$\lg \tau_{5E}$	$\lg \tau_{5D}$	V	$\lg \tau_{5E}$	$\lg \tau_{5D}$	V				
0,50	458	-3,20	492	-3,50	526	-3,75	601	-4,3	406	-2,85	437	-3,08	469	-3,30	538	-3,82
0,75	394	-2,77	426	-2,98	458	-3,22	526	-3,75	342	-2,40	374	-2,64	405	-2,84	469	-3,30
1,00	349	-2,45	381	-2,67	412	-2,90	477	-3,35	295	-2,07	328	-2,30	360	-2,52	423	-2,97
1,50	283	-1,97	316	-2,20	348	-2,44	413	-2,90	230	-1,57	262	-1,80	295	-2,08	361	-2,52
2,00	237	-1,64	260	-1,87	302	-2,10	368	-2,60	184	-1,28	217	-1,50	249	-1,74	316	-2,20
2,50	202	-1,40	234	-1,60	266	-1,85	333	-2,35	150	-1,05	183	-1,27	215	-1,48	281	-1,95
3,00	148	-1,03	182	-1,25	215	-1,48	280	-1,95	95	-0,70	132	-0,92	166	-1,15	232	-1,60
3,50	90	-0,65	128	-0,9	163	-1,14	228	-1,58	46	-0,35	81	-0,58	117	-0,82	185	-1,28

Примечания. В каждом столбце дается слева — геометрическая глубина в км, справа — оптическая глубина в логарифмах.

Таблица 2

Данные об использованных линиях и полученные результаты. Центральная глубина выражена в единицах интенсивности крыла линии Н или К

Длина волны (\AA)	Элемент	Потенциал возбуждения (эВ)	Центральная глубина	$\cos \theta = 1,0$						$\cos \theta = 0,67$						$\cos \theta = 0,2$					
				$\lg \tau_{5E}$		$\lg \tau_{5D}$		V		$\lg \tau_{5E}$		$\lg \tau_{5D}$		V		$\lg \tau_{5E}$		$\lg \tau_{5D}$		V	
				$\lg \tau_{5E}$	$\lg \tau_{5D}$	V	$\lg \tau_{5E}$	$\lg \tau_{5D}$	V	$\lg \tau_{5E}$	$\lg \tau_{5D}$	V	$\lg \tau_{5E}$	$\lg \tau_{5D}$	V	$\lg \tau_{5E}$	$\lg \tau_{5D}$	V			
3926,326	Ti I	2,58	0,20	-0,23	-0,80	2,42	-0,50	-0,94	2,58	-0,75	-1,41	2,80	-1,40	-1,50	3,08						
3926,639	Cr I	4,53	0,11	-0,30	-0,74	2,10	-0,55	-0,86	2,43	-0,80	-1,04	2,62	-1,20	-1,40	2,89						
3927,107	Nd II	—	0,08	-0,35	-0,88	1,71	-0,58	-1,00	2,21	-0,85	-1,20	2,33	-1,15	-1,55	2,62						
3930,663	Y II	0,41	0,09	-1,20	-1,40	1,69	-1,42	-1,59	2,23	-1,66	-1,82	2,31	-2,14	-2,27	2,53						
3930,889	Fe I	2,45	0,16	-1,29	-1,58	1,43	-1,50	-1,77	2,06	-1,74	-1,98	2,14	-2,23	-2,42	2,29						
3932,254	Fe I	—	0,11	-2,03	-2,18	1,44	-2,26	-2,38	1,80	-2,49	-2,60	1,88	-2,96	-3,03	2,17						
3932,915	Fe I	—	0,14	-2,72	-2,80	1,03	-2,95	-3,00	1,99	-3,20	-3,21	1,94	-3,20	-3,20	2,03						
3935,319	Fe I	2,84	0,31	-1,86	-2,27	1,42	-2,11	-2,46	1,94	-2,33	-2,67	1,88	-2,49	-2,40	2,29						
3936,557	Fe I	—	0,18	-1,25	-1,57	1,65	-1,47	-1,75	2,15	-1,70	-1,97	2,32	-2,19	-2,40	2,29						
3938,630	Fe I	—	0,42	-0,67	-1,40	2,03	-0,92	-1,19	2,47	-1,14	-1,39	2,38	-1,59	-1,80	2,29						
3939,518	Sc II	0,31	0,08	-0,50	-0,83	2,20	-0,76	-1,05	2,53	-0,90	-1,22	2,66	-1,38	-1,62	2,81						
3942,155	Ce II	0,0	0,29	-0,10	-0,96	1,84	-0,35	-1,00	2,45	-0,65	-1,16	2,41	-1,0	-1,55	2,71						
3965,845	Fe I	2,42	0,15	-0,99	-1,31	1,91	-1,22	-1,53	2,45	-1,42	-1,74	2,59	-1,89	-2,17	2,49						
3966,824	Fe I	3,30	0,24	-1,46	-1,97	1,39	-1,69	-2,14	2,03	-1,95	-2,36	2,41	-2,40	-2,78	2,19						
3967,975	Fe I	3,24	0,19	-2,79	-3,40	1,33	-3,03	-3,53	1,75	-3,29	-3,74	1,58	-3,77	-4,06	2,07						
3969,641	Fe I	3,25	0,27	-1,91	-2,29	1,50	-2,14	-2,52	1,86	-2,39	-2,75	1,84	-2,83	-3,14	2,29						
3970,495	Ni I	3,65	0,27	-1,30	-1,87	1,86	-1,50	-2,02	2,45	-1,73	-2,24	2,30	-2,20	-2,64	2,25						
3971,826	Fe I	2,76	0,27	-0,76	-1,35	1,86	-0,97	-1,53	2,28	-1,20	-1,75	2,27	-1,64	-2,16	2,31						
3972,916	Fe I	3,57	0,32	-0,48	-1,18	1,82	-0,71	-1,36	2,44	-0,94	-1,57	2,61	-1,38	-1,99	2,74						

Очень слаба

ленного изменения температуры в высоких слоях фотосферы) практически не влияет на определяемую амплитуду (V) общего поля скоростей. Поэтому в таблице приведено одно значение этой величины.

Отметим следующие явно выраженные особенности полученных результатов.

1. Данные, полученные в результате оценки глубины образования линий двумя способами, в общем различаются несущественно. Прямой расчет глубин по депрессионной функции вклада дает шкалу, смещенную в более высокие слои фотосферы, с различной величиной сдвига, зависящей от расстояния от центра линий Н, К (см., например, рис. 2). Эта, а также

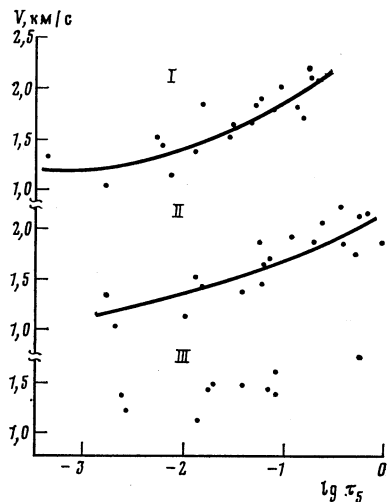


Рис. 3. Радиальная составляющая ($\cos \theta=1$) общего поля скоростей: I — глубины образования линий рассчитаны по депрессионной функции вклада; II — глубины образования линий оценены по глубине образования эмиссии в крыле линий Н, К (метод Айреса); III — результаты Айреса [9]

другие особенности разности $\lg \tau_{\text{вк}} - \lg \tau_{\text{сд}}$ для конкретной линии полностью объясняются особенностями глубин образования эмиссии и депрессии, дискутирующимися в работе [10].

В дальнейшем обсуждении результатов мы будем рассматривать более точные данные, полученные путем расчета глубины образования линий по депрессионной функции вклада.

2. При переходе центр — край амплитуда поля скоростей возрастает. Тангенциальная компонента ($\cos \theta=0,2$) существенно больше радиальной ($\cos \theta=1$).

3. Наблюдается явно выраженное уменьшение амплитуды общего поля скоростей с высотой.

4. Не намечается (или намечается неуверенно) ожидаемое прекращение спада амплитуды общего поля скоростей на больших высотах ($\lg \tau_s \leq -3,0$).

Перейдем к более подробной дискуссии результатов. Особенности, отмеченные в п. 1 и 2, не являются неожиданными и полностью согласуются с многочисленными данными исследований общего поля скоростей, полученными другими методами. Более того, амплитуда общего поля практически совпадает с другими основными результатами в диапазоне глубин, где эти результаты получены наиболее надежно. Например, на глубине $\lg \tau_s = -1,5$ имеем для радиальной компоненты: $V^{\text{rad}}=1,6$ км/с, [1]; $V^{\text{rad}}=1,7$ км/с, [2]; $V^{\text{rad}}=1,75$ км/с, [3]; $V^{\text{rad}}=1,7$ км/с, [5] и $V^{\text{rad}}=1,7$ км/с в настоящей работе. На этой же глубине для тангенциальной компоненты имеем соответственно: 2,6; 2,6; 2,5; 2,7 и 2,8 км/с.

Обратимся теперь к детальным особенностям полученных результатов. Факт уменьшения «турбулентной» скорости с высотой объясняется затуханием конвективных движений, которые, по-видимому, вносят основной вклад в поле нетепловых движений в фотосфере. Однако известно, что в

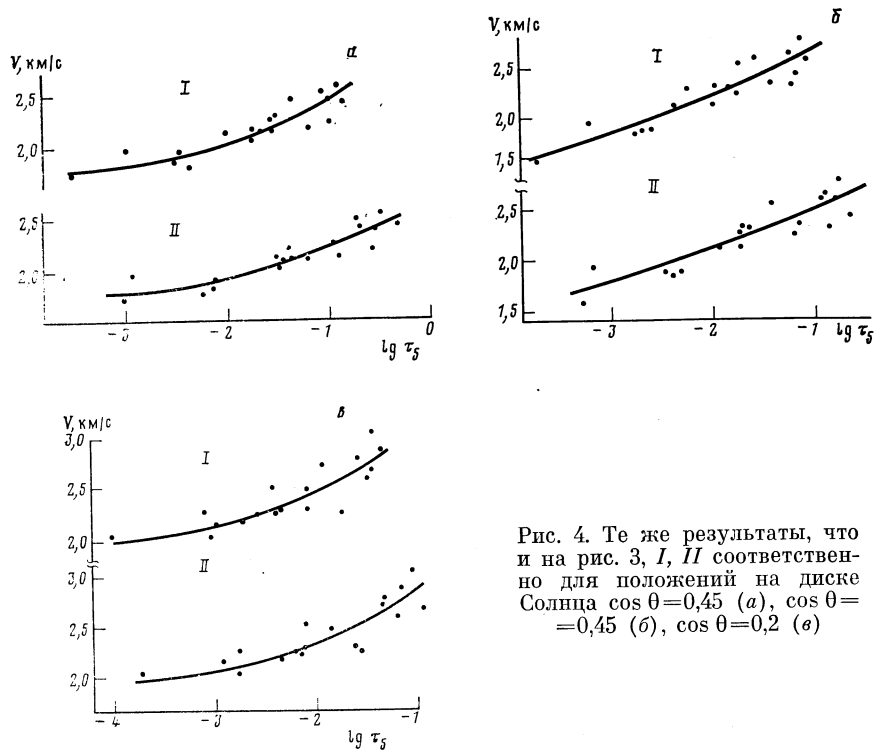


Рис. 4. Те же результаты, что и на рис. 3, I, II соответственно для положений на диске Солнца $\cos \theta = 0,45$ (а), $\cos \theta = -0,45$ (б), $\cos \theta = 0,2$ (в)

хромосфере турбулентная скорость больше, чем в фотосфере. Амплитуда ее возрастает с высотой. Поэтому на определенных высотах должен наблюдаться минимум амплитуды общего поля скоростей. Такого минимума мы не наблюдаем уверенно, он только четко намечается для радиальной компоненты. Отметим, что характер уменьшения близкий к линейному, особенно для $\cos \theta = 0,45$. Нелинейность наиболее отчетливо проявляется в центре диска, для $\cos \theta = 0,67$ и $0,20$ и имеет одинаковый характер. Спад радиальной компоненты ($\cos \theta = 1$) резко замедляется на глубине $\lg \tau_5 = -3,0$. По-видимому, можно ожидать возрастания амплитуды радиальной компоненты на высотах $\lg \tau_5 < -3,0$, т. е. с этой высоты вертикально распространяющиеся звуковые волны или другие процессы, обуславливающие неоднородность нижней хромосферы, вносят уже существенный вклад в радиальную компоненту общего поля скоростей. Глубина минимума амплитуды тангенциальной компоненты намечается менее уверенно из-за недостаточности наблюдательного материала. Можно лишь утверждать, что этот минимум наступает на высотах $\lg \tau_5 \leq -4,0$.

Отмеченные особенности поведения амплитуды общего поля скоростей в верхней фотосфере несомненно отражают природу фотосферного поля нетепловых движений, связь конвекции и осцилляций и, возможно, наличие также в поле нетепловых движений хаотической (турбулентной) компоненты. Для более основательного обсуждения этого вопроса потребуются дополнительные данные о поле скоростей на еще больших высотах, вплоть до $\lg \tau_5 = -5,0 \div -6,0$. Предполагается такие данные получить путем прецизионного синтеза ряда интенсивных линий, расположенных очень близко к ядрам линий H, K Ca II. На основании полученного материала можно сделать пока единственный уверенный вывод: конвективные движения простираются высоко в фотосферу и доминируют в общем поле скоростей в радиальном направлении до высот $\lg \tau_5 \leq -3,0$ ($h \approx 450$ км) и в тангенциальном направлении до высот $\lg \tau_5 \leq -4,0$ ($h \approx 560$ км).

В заключение обратимся к результатам Т. Айреса [9]. На рис. 3, IV мы привели результаты, взятые по данным табл. 1 в его работе для линий, общих с линиями нашей таблицы. Как видно, с учетом меньшего числа линий, использованных Айресом, а также дисперсии точек на графиках,

Сравнение оптических глубин ($\lg \tau_5$) и амплитуды общего поля скоростей (V), выведенных в центре диска Айресом (А) и в настоящем исследовании Гуртовенко, Шеминова, Рутена (ГШР)

$\lambda, \text{Å}$	Элемент	$\lg \tau_{5A}$	$\lg \tau_{5ГШР}$	V_A	$V_{ГШР}$
3927,107	Nd II	-0,30	-0,35	1,79	1,71
3930,665	Y II	-1,15	-1,20	1,41	1,69
3930,881	Ti II	-1,22	-1,29	1,46	1,43
* 3932,017	Fe II	-1,78	-1,84	1,65	1,67
3932,250	Fe I	-1,90	-2,03	1,13	1,14
* 3932,635	Fe I	-2,20	-2,40	1,65	1,65
3932,923	Fe I	-2,60	-2,72	1,23	1,03
3935,314	Fe I	-1,78	-1,86	1,52	1,42
3936,547	Fe I	-1,14	-1,25	1,63	1,65
3966,819	Fe I	-1,45	-1,46	1,50	1,39
3967,972	Fe I	-2,65	-2,79	1,38	1,33
3969,635	Fe I	-1,78	-1,91	1,44	1,50
* 3969,751	Cr I	-1,70	-1,79	1,65	1,78

Примечание. Звездочками обозначены линии, дополнительно обработанные нами с целью увеличить общее число сравниваемых линий. Длины волн линий даны по Айресу.

его результаты практически совпадают с нашими (рис. 3, 16). Для более детального сравнения результатов мы привели в табл. 3 оптические глубины и турбулентные скорости, выведенные нами и Айресом для линий, общих в его и нашей работах. Чтобы использовать все его данные, мы выполнили в центре диска дополнительную обработку линий $\lambda\lambda$ 3932,017 TiI, 3932,635 FeI и 3969,751 CrI (длины волн по Айресу), которые не включали в наш список (табл. 2) из-за их большой интенсивности.

Как видно, результаты практически совпадают. Можно отметить лишь небольшое различие в шкале глубин: в нашей шкале глубины образования линий в среднем немного меньше. Возникает вопрос: почему же Айрес пришел к неправильному выводу об отсутствии изменения радиальной компоненты поля скоростей с высотой? По нашему мнению, этому выводу способствовало включение трех указанных выше сильных линий в общее сравнительно небольшое число всех используемых автором линий. Сильные линии, вследствие насыщения, имеют большие полуширины и дают завышенные значения турбулентных скоростей. Далее, основываясь на этом выводе, Айрес делает второй ошибочный вывод, что линии железа $\lambda\lambda$ 3932,250, 3232,923 и 3967,972 Å (отметим, что эти линии образуются наиболее высоко) отождествлены в каталоге Мур и др. [11] неверно, так как выведенная по ним «турбулентная» скорость оказывается меньше, чем по всем остальным линиям. На основании этого он выполняет их «переотождествление», подбирая подходящий атомный вес так, чтобы согласовать их расчетную и наблюдаемую полуширину при турбулентной скорости средней для группы всех остальных линий.

Таким образом, результаты Т. Айреса хорошо согласуются с результатами настоящих исследований и подтверждают все особенности радиальной компоненты общего фотосферного поля скоростей, полученные раньше другими исследователями.

4. Выводы

1. Амплитуда общего поля скоростей в средней и верхней фотосфере хорошо согласуются с результатами исследований, выполненных ранее другими надежными методами [1-3, 5].

2. Уменьшение амплитуды радиальной и тангенциальной компонент общего поля скоростей прекращается на глубинах $\lg \tau_5 \approx -3,0$ (450 км) и $\lg \tau_5 \approx -4,0$ (560 км) соответственно. Это свидетельствует о том, что конвективные движения проникают высоко (в область температурного минимума) и их скорости доминируют по крайней мере до указанных высот в фотосфере.

Авторы выражают глубокую признательность Т. В. Орловой за помощь в вычислениях. Р. Руттен благодарит Л. Тестермана за помощь в наблюдениях, О. Намба за перевод русского текста статьи, и Академию наук УССР за приглашение в Киев, в Главную астрономическую обсерваторию АН УССР.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gurtovenko E. A.* Solar Phys., 1975, v. 45, p. 25.
2. *Canfield R. C., Beckers J. M.* Colloq. Intern. CNRS. Paris, 1976, № 250, 291.
3. *Kostik R. I.* Solar Phys., 1982, v. 78, p. 39.
4. *Шеминова В. А.* Астрометрия и астрофизика, 1984, т. 53, с. 15.
5. *Кондрашова Н. Н.* Астрометрия и астрофизика, 1982, т. 47, с. 27.
6. *Canfield R. C.* Solar Phys., 1974, v. 20, p. 275.
7. *Mount G. H., Linsky J. L.* Solar Phys., 1974, v. 35, p. 259.
8. *Порфирьева Г. А.* Астрон. журн., 1971, т. 48, с. 1227.
9. *Ayres T. R.* Astrophys. J., 1977, v. 214, p. 905.
10. *Гуртовенко Э. А., Шеминова В. А.* Астрон. журн., 1983, т. 60, с. 982.
11. *Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The Solar Spectrum 2935 to 8770 Å. Washington: U. S. Gov. Publ. Office, 1966. 345 p.
12. *Ayres T. R.* Astrophys. J., 1977, v. 213, p. 296.

Главная астрономическая обсерватория
Академии наук УССР

Поступила в редакцию
24.VIII.1983

Утрехтский астрономический ин-т