

УДК 523.942

Пространственные вариации конвективных движений в реальной фотосфере Солнца

А.А. Баран, М.И. Стодилка

Астрономическая обсерватория Львовского национального университета имени Ивана Франко,
ул. Кирилла и Мефодия, 8, г. Львов, Украина, 79005
lesiaab@gmail.com

Поступила в редакцию 28 октября 2013 г.

Аннотация. Конвективные движения в солнечной фотосфере исследованы с использованием данных наблюдений в линии нейтрального железа $\lambda \approx 639.3$ нм, полученных на 70-см немецком башенном вакуумном телескопе VTT (Канарские острова, Испания) вблизи центра солнечного диска в спокойной области. Проанализированы высотные изменения спектров мощности вариаций вертикальных скоростей и температурных вариаций фотосферной конвекции. Исследованы пространственные распределения вариаций вертикальных скоростей и температуры на разных пространственных масштабах: грануляционных ($0.5 \div 5.0$ Мм), мезогрануляционных ($5 \div 12$ Мм) и супергрануляционных ($20 \div 30$ Мм). В фотосферных слоях существенные отличия между конвективными ячейками на грануляционных и мезогрануляционных масштабах не выявлены – вариации вертикальных скоростей и температуры на этих масштабах с высотой уменьшаются. Поле вертикальных скоростей на супергрануляционных масштабах хорошо сохраняется при проникновении в верхние слои фотосферы.

SPATIAL VARIATIONS OF THE CONVECTIVE MOTIONS IN THE REAL SOLAR PHOTOSPHERE, *by A.A. Baran, M.I. Stodilka.* Convective motions in the solar photosphere are investigated by using observational data of neutral iron line $\lambda \approx 639.3$ nm obtained with the 70-cm German Vacuum Tower Telescope (Canary Islands, Spain) around the center of the solar disc in the non-perturbed region. The altitude changes of power spectra of the vertical velocity and temperature variations in the photospheric convection are analyzed. Spatial distributions of variations of the vertical velocity and temperature are investigated at different spatial scales: granular ($0.5 \div 5.0$ Mm), mesogranular ($5 \div 12$ Mm) and supergranular ($20 \div 30$ Mm) ones. In the photospheric layers the significant differences between the convective cells at granular and mesogranular scales are not identified – at these scales variations of the vertical velocity and temperature decrease with height. The vertical velocity field at supergranular scales is well conserved at penetration into the upper layers of the photosphere.

Ключевые слова: солнечная фотосфера, спектр мощности, грануляция, мезогрануляция, супергрануляция

1 Введение

Структура солнечной фотосферы определяется конвективными и волновыми движениями. Поэтому при детальном изучении структуры и динамики атмосферы Солнца наблюдаемые пространственно-временные вариации разлагают на отдельные компоненты. В фотосфере Солнца наблюдаются конвективные образования на малых, средних и больших пространственно-временных масштабах – грануляция ($\lambda \approx 0.5 \div 2.0$ Мм), мезогрануляция ($\lambda \approx 5 \div 12$ Мм) и супергрануляция ($\lambda \approx 20 \div 30$ Мм) (Нордлунд и др., 2009; Реторд, Ринкон, 2010).

Исследования фотосферной конвекции проводились в основном на масштабах грануляции. При исследовании структуры и динамики солнечной грануляции анализируют, в основном, наблюдаемые флуктуации интенсивности, температуры и конвективных скоростей. Так, в работе Эспагнет и др. (1995) представлены результаты детального изучения вертикальной структуры фотосферы: если в нижних слоях фотосферы наблюдается высокая корреляция между температурой и вертикальной скоростью (за счет действия сил плавучести), то в верхних слоях, куда гранулы попадают по инерции, обнаружено: конвективные потоки для всех гранул с размером больше $1''.4$ достигают верхних слоев фотосферы, в то время как высота проникновения гранул с размером меньше $1''.4$ – уменьшается. В работе (Пушман и др., 2003) обнаружено, что в верхние слои фотосферы проникают гранулы, размеры которых больше, чем $1''.0$. Что же касается флуктуаций температуры, то автор дает минимальный размер ячейки $2''.0$, когда еще возможно проникновение в верхние слои и возникновение инверсии. Согласно (Пушман и др., 2005) на высотах $h \approx 370$ км можно обнаружить потоки порядка $4''.0$. В работе (Стодилка и др., 2006) большие гранулы (размером не меньше $1''.5$) достигают к моменту максимального развития высот температурного минимума; правда, встречаются гранулы меньших размеров (порядка $1''.0$), которые также попадают в эти слои. Позже в работе (Костык и др., 2009) предложена 16-колончатая модель, которая воспроизводит все основные особенности конвективных полей интенсивности и скорости в фотосфере и нижней хромосфере. Найдено, что приблизительно 40 % всех конвективных образований, обнаруженных в континууме, достигают высот $h = 650$ км, причем средний размер грануляционных ячеек увеличивается с высотой – 80 % структур размером больше 1500 км в континууме достигает этих высот.

Большое количество работ посвящено анализу параметрических свойств супергрануляционных ячеек (Симон, Лейтон, 1964; Хесевей и др., 2000; Дель Моро и др., 2004; Меунье и др., 2007; Гирзбергер и др., 2008). Поскольку горизонтальные флуктуации интенсивности на масштабах супергрануляции слишком малы (Голдбаум и др., 2009), изучают в основном горизонтальные скорости на супергрануляционных масштабах (Баран, Стодилка, 2010). Только частично исследована вертикальная компонента скоростей внутри супергрануляционных ячеек (Реторд и др., 2010; Баран, 2012б). В работе (Новембер, 1989) автор отмечает проникновение конвективных движений больших масштабов намного выше в атмосферу Солнца, чем для малых образований, и допускает, что супергрануляция способна проникать по крайней мере в слои средней хромосферы и что движения в хромосфере хорошо коррелируют с соответствующей структурой в фотосфере.

В работе (Новембер и др., 1981) впервые обнаружены конвективные образования в солнечной фотосфере на промежуточных масштабах – мезогранулы. Большинство дальнейших исследований этого явления основывается на анализе специфических особенностей отдельных гранул – расширяться до больших (мезогрануляционных) масштабов (Раст, 1995; Гирзбергер и др., 1999; Роудье и др., 2003). Согласно (Реторд и др., 2000) стало известно, что структурные образования, больше грануляционных, могут возникать вследствие пространственного и временного усреднения данных. Таким образом, мезогрануляция не является отдельной составляющей конвекции. Во многих из последующих работ сделаны аналогичные заключения (Раст, 2003; Роудье, Мюллер, 2004; Матлох и др., 2009). Также обнаружены конвективные образования на мезомасштабах в слоях верхней хромосферы (Карияппа и др., 2001).

Таким образом, возникает необходимость еще раз пересмотреть структуру фотосферной конвекции на определенных пространственно-временных масштабах. Анализ спектров мощности вариаций вертикальной скорости (кинетическая энергия) и температуры (тепловая энергия) дает информацию об энергетических затратах и взаимопревращении энергии на разных масштабах (Реторд и

др., 2010). Поэтому целесообразным является исследование энергетики конвективных движений в солнечной атмосфере.

Цель настоящей работы – изучить особенности фотосферной конвекции на разных пространственно-временных масштабах путем анализа высотных изменений спектра мощности вариаций вертикальных скоростей и температуры в солнечной фотосфере и исследования пространственных распределений этих вариаций на грануляционных, мезогрануляционных и супергрануляционных масштабах.

2 Экспериментальные данные

В исследовании мы использовали результаты наблюдений Н.Г. Щукиной на 70-см вакуумном баббленом телескопе VTT на Канарских островах, которые проводились в линии нейтрального железа $\lambda \approx 639.3$ нм вблизи центра солнечного диска в спокойной области с пространственным разрешением $\approx 0''.5$ (Костык, Щукина, 2004). Протяженность области наблюдения вдоль поверхности Солнца – 64 Мм, исследуемые глубины находятся в пределах от -25 км до 550 км (в рамках модели спокойной атмосферы Солнца VAL-80 (Вернацца и др., 1981).

3 Методика расчета

В нашей работе мы анализируем результаты воспроизведения пространственно-временных вариаций температуры и вертикальной скорости в фотосфере Солнца, полученных с использованием профилей наблюдаемой линии путем решения неравновесной инверсной задачи переноса излучения (Стодилка, 2002).

Поскольку мы будем исследовать исключительно конвективные движения в солнечной фотосфере, то с помощью $k - \omega$ фильтрации мы удалили волновую компоненту вариаций температуры и вертикальной скорости. Мы также отдельно будем анализировать конвективные движения с периодом $T > 20$ мин, то есть исключим грануляцию с малым и средним временем жизни, что, в свою очередь, дает возможность лучше исследовать большие пространственно-временные масштабы – мезогрануляцию и супергрануляцию.

4 Полученные результаты

4.1 Спектры мощности

Мы рассчитали спектры мощности конвективной компоненты вертикальных скоростей и температурных вариаций на разных высотах в солнечной фотосфере и соответствующие спектры для движений с периодом $T > 20$ мин в координатах $\omega - k_x$, просуммированные по временной частоте:

$$P(k_x) = \int d\omega \cdot P(\omega, k_x).$$

Поскольку для спокойной атмосферы Солнца все направления в горизонтальной плоскости равноправны, спектр мощности для 2D-имиджей $P_2(k)$ получим из спектра для одномерных имиджей $P_1(k)$ с помощью коррекции (Чоу и др., 1992):

$$P_2(k) = 2\pi k P_1(k).$$

Для сравнения спектров конвекции всех пространственно-временных масштабов и спектров долгопериодических вариаций их нормировано на общий максимум спектра для всей конвекции на высоте $h = -25$ км. Ограниченное время и область наблюдений приводят к мелким пикам в спектральных зависимостях. Чтобы лучше увидеть общие изменения спектров с высотой, мы провели аппроксимацию полученных нами кривых функцией $P(k) = Ak^\alpha e^{-\beta k}$ (зависимость подобрана с

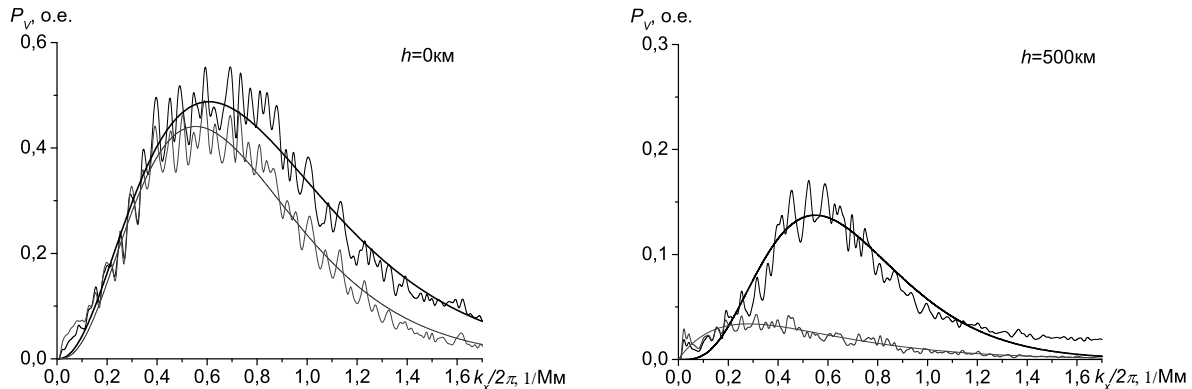


Рис. 1. Спектры мощности вариаций вертикальных скоростей в солнечной фотосфере на высотах 0 км (слева) и 500 км (справа): черная линия – для конвекции всех пространственно-временных масштабов, серая линия – для движений с периодом $T > 20$ мин

учетом зависимостей, приведенных в работах Эспагнета и др., 1993; Реторда и др., 2010), причем коэффициенты A , α , β для каждого спектра подбирались индивидуально.

На рис. 1 показаны спектры мощности вариаций вертикальных скоростей фотосферной конвекции на всех пространственно-временных масштабах на высотах $h = 0$ и 500 км (черная линия) и аналогичные спектры для движений с периодом $T > 20$ мин (серая линия). Как видно из рис. 1, слева, на высоте $h = 0$ км, то есть в слоях нижней фотосферы, максимальная мощность вариаций вертикальных скоростей сосредоточена в диапазоне пространственных частот $k/2\pi = 1/\lambda \approx 0.5 \div 0.6$ 1/Мм, что соответствует пространственным масштабам $\lambda \approx 1.5 \div 2.0$ Мм. В высших слоях фотосферы (рис. 1, справа) мощность вариаций вертикальных скоростей на грануляционных масштабах уменьшается: максимальное значение мощности вариаций вертикальных скоростей для долгопериодических вариаций уменьшается с высот $h = 0$ км до $h = 500$ км практически на порядок, максимальное значение мощности для всей конвекции уменьшается медленнее. Максимальные значения мощности вариаций вертикальных скоростей на этих масштабах с высотой несколько смещаются на спектре в сторону меньших пространственных частот: максимум мощности на спектре для всей конвекции на высоте $h = 500$ км (рис. 1, справа, черная линия) сосредоточен в окрестности пространственных частот $k/2\pi \approx 0.55$ ($\lambda \approx 1.8$ Мм); максимум мощности на спектре, соответствующий движениям с периодом $T > 20$ мин, на высоте $h = 500$ км (рис. 1, справа, серая линия) соответствует пространственным частотам $k/2\pi \approx 0.28$ ($\lambda \approx 3.6$ Мм). Следовательно, для долгопериодических вариаций эти смещения значительно существеннее, чем в случае всей конвекции, – максимум мощности смещается в сторону больших пространственных масштабов на $\Delta\lambda \approx 2$ Мм на высоте $h = 500$ км по сравнению с положением максимума мощности на $h = 0$ км. Следует также отметить, что мощность скоростей на супергрануляционных масштабах практически не меняется на всех исследуемых высотах: она составляет малую часть мощности фотосферной конвекции на высоте $h = 0$ км, но на высоте $h = 500$ км становится более заметной на пространственных частотах $k/2\pi = 1/\lambda < 0.08$ 1/Мм ($\lambda > 12$ Мм) по сравнению с остальным участком спектра и лучше наблюдается на спектре мощности для долгопериодических вариаций с $T > 20$ мин на рис. 1, справа (серая линия).

На рис. 2 представлены спектры мощности температурных вариаций фотосферной конвекции на всех пространственно-временных масштабах на высотах $h = 0$ и 500 км (черная линия) и спектры мощности температурных вариаций для движений с периодом $T > 20$ мин на соответствующих высотах (серая линия). В обоих случаях максимальная мощность температурных вариаций

опять же сосредоточена в нижней фотосфере (рис. 2, слева) в диапазоне пространственных частот $k/2\pi = 1/\lambda \approx 0.5 \div 0.6$ 1/Мм, соответствующих грануляционным масштабам $\lambda \approx 1.5 \div 2.0$ Мм. С высотой (рис. 2, справа) мощность температурных вариаций уменьшается, причем, аналогично мощности вариаций вертикальных скоростей, для долгопериодических вариаций это уменьшение более существенно. В верхних слоях фотосферы максимальные значения мощности смещаются в сторону меньших пространственных частот, аналогично спектрам мощности вариаций вертикальных скоростей: максимум спектра для всей конвекции на высоте $h = 500$ км (рис. 2, справа, черная линия) сосредоточен в окрестности пространственных частот $k/2\pi \approx 0.45$ ($\lambda \approx 2.2$ Мм); максимум спектра, соответствующий движениям с периодом $T > 20$ мин, на высоте $h = 500$ км (рис. 2, справа, серая линия) соответствует пространственным частотам $k/2\pi \approx 0.35$ ($\lambda \approx 2.8$ Мм). Следовательно, для долгопериодических вариаций эти смещения в верхних слоях фотосферы по сравнению с $h = 0$ км опять-таки значительно больше, чем в случае всей конвекции. В то же время, максимальное значение мощности вариаций вертикальных скоростей для долгопериодических вариаций уменьшается с высот $h = 0$ км до $h = 500$ км практически на порядок, максимальное значение мощности для всей конвекции уменьшается медленнее.

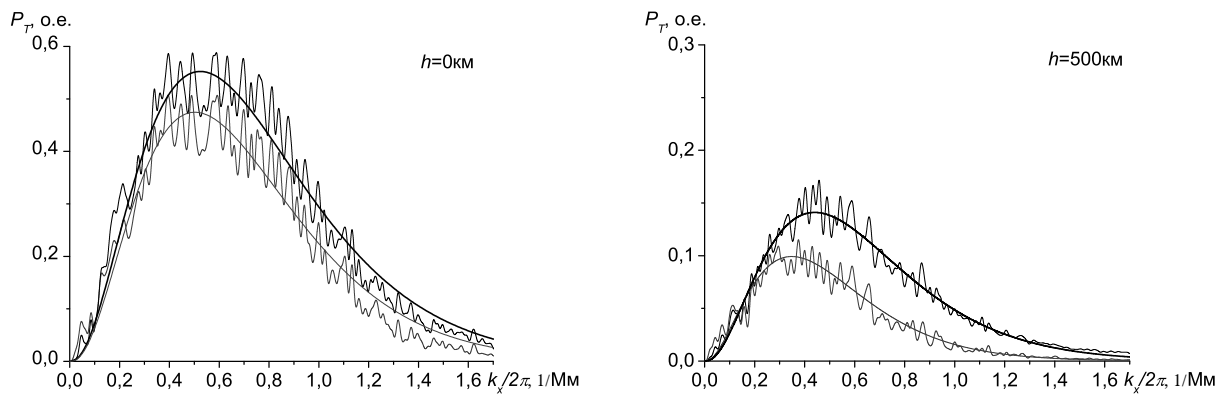


Рис. 2. Спектры мощности температурных вариаций в солнечной фотосфере на высотах 0 км (слева) и 500 км (справа): черная линия – для конвекции всех пространственно-временных масштабов, серая линия – для движений с периодом $T > 20$ мин

Высотные изменения спектров мощности, в особенности смещения максимумов спектров в сторону меньших частот, свидетельствуют о том, что при проникновении в верхние слои солнечной фотосферы уменьшается количество мелких ячеек, а также возможно их расширение в верхних слоях фотосферы. Резкое уменьшение и смещение спектров для долгопериодических вариаций, скорее всего, свидетельствует о том, что долгоживущие ячейки в верхних слоях фотосферы расширяются, делятся и, соответственно, дают вклад в спектр мощности на меньших пространственных масштабах. Особенности спектра мощности вертикальных скоростей в диапазоне малых частот (супергрануляционных масштабов) указывают на то, что конвективные потоки супергрануляции хорошо сохраняются при проникновении в верхние слои фотосферы. Заметим, что на спектре мощности температурных вариаций супергрануляция подобным образом не проявляется, поскольку, как упоминалось ранее, температурные вариации на супергрануляционных масштабах весьма незначительны (Голдбаум и др., 2009).

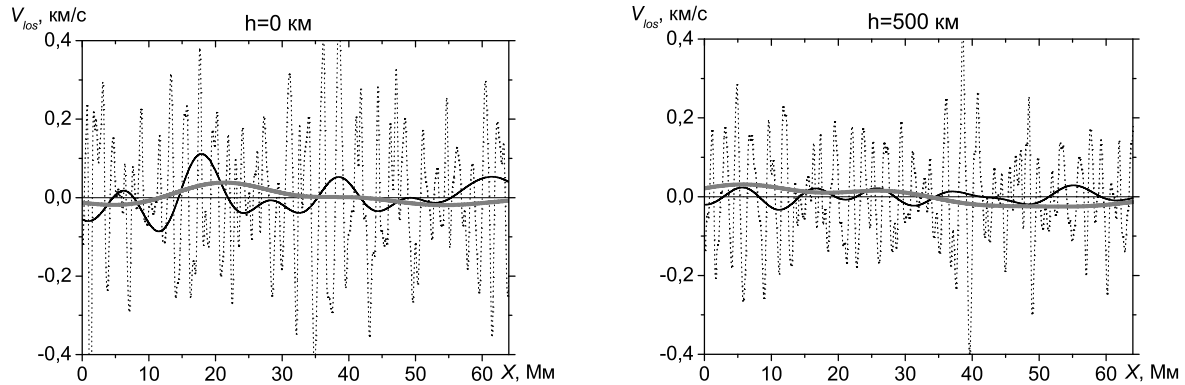


Рис. 3. Пространственное распределение вариаций вертикальных скоростей в солнечной фотосфере на высотах 0 км (слева) и 500 км (справа) на масштабах грануляции (точки), мезогрануляции (черная линия) и супергрануляции (серая линия)

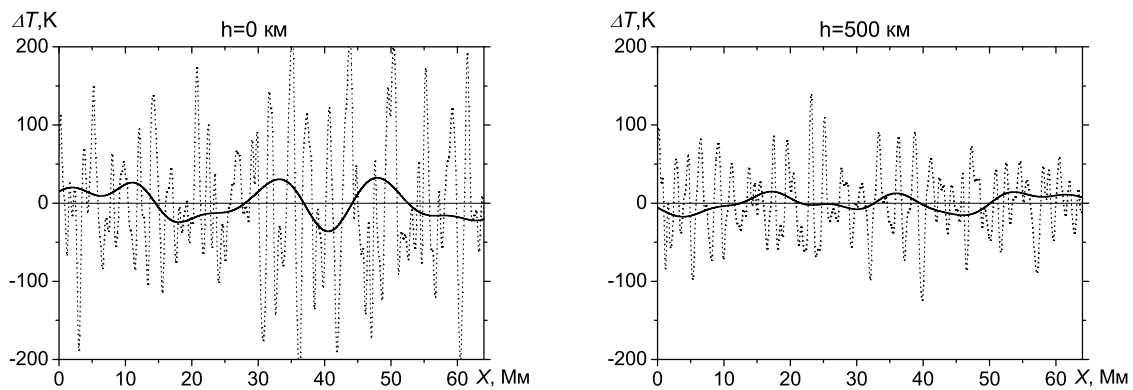


Рис. 4. Пространственное распределение температурных вариаций в солнечной фотосфере на высотах 0 км (слева) и 500 км (справа) на масштабах грануляции (точки) и мезогрануляции (черная линия)

4.2 Особенности температурной структуры и поля вертикальных скоростей солнечной конвекции

Далее мы проводим анализ особенностей поведения распределений вариаций физических параметров солнечной конвекции по высоте. Методом фильтрации пространственных и временных частот мы выделили пространственные распределения вариаций температуры и вертикальной скорости на грануляционных ($0.5 \div 5.0$ Мм) и мезогрануляционных ($5 \div 12$ Мм) масштабах. Для выделения конвективных движений супергрануляции ($20 \div 30$ Мм) мы подавляли движения с горизонтальными скоростями больше 0.5 км/с (согласно работам Симон, Лейтон, 1964; Реторд и др., 2010) с последующим усреднением их за время наблюдения – 2.6 часа. В результате мы получили усредненное во времени пространственное распределение вариаций вертикальных скоростей на супергрануляционных масштабах.

Для сравнения пространственных распределений вариаций на грануляционных, мезогрануляционных и супергрануляционных масштабах мы привели их в одном графике. Распределения верти-

кальных скоростей разных пространственных масштабов на высотах $h = 0$ и 500 км представлены на рис. 3. Как видно из рисунка, вариации вертикальных скоростей на грануляционных масштабах (рис. 3, точки) существенно уменьшаются в верхних слоях фотосферы по сравнению с нижними слоями. На мезогрануляционных масштабах (рис. 3, черная линия) вариации вертикальных скоростей тоже уменьшаются в верхних слоях фотосферы. В обоих случаях встречается инверсия вертикальных скоростей – меняется направление движения на противоположное (Костык и др., 2009), происходит горизонтальное смещение пространственных распределений этих вариаций на высоте $h = 500$ км по сравнению с распределением на высоте $h = 0$ км (Стодилка и др., 2006); вариации вертикальной скорости на супергрануляционных масштабах (рис. 3, серая линия) во всех слоях фотосферы остаются в тех же пределах – супергрануляционные ячейки проходят через всю фотосферу до высот температурного минимума и, скорее всего, выше.

Распределения температурных вариаций на грануляционных и мезогрануляционных масштабах на высотах $h = 0$ и 500 км представлены на рис. 4. Как видно, вариации вертикальных скоростей на грануляционных (рис. 3, точки) и мезогрануляционных масштабах (рис. 3, черная линия) уменьшаются в верхних слоях фотосферы по сравнению с нижними слоями, происходит инверсия температурных вариаций (Костык и др., 2009; Баран, 2012а), происходит также горизонтальное смещение пространственных распределений этих вариаций на высоте $h = 500$ км по сравнению с распределением на высоте $h = 0$ км (Стодилка и др., 2006).

Следовательно, существенные отличия между конвективными структурами солнечной фотосферы на грануляционных и мезогрануляционных масштабах не выявлены – указанные выше вариации максимальны в нижних слоях фотосферы и уменьшаются при проникновении в верхние слои. Супергрануляция ведет себя иным образом – поле вертикальных скоростей на супергрануляционных масштабах хорошо сохраняется при проникновении в верхние слои фотосферы.

5 Выводы

По данным VTT-наблюдений в линии $\lambda \approx 639.3$ нм FeI с высоким пространственным и временным разрешением исследованы пространственные вариации конвективных движений в реальной фотосфере Солнца.

Расчитаны и проанализированы спектры мощности (с 2D-коррекцией) вариаций вертикальных скоростей и температуры фотосферной конвекции Солнца. Для лучшего выделения мощности на больших пространственно-временных масштабах рассчитаны также спектры мощности для долгопериодических вариаций ($T > 20$ мин), то есть исключена грануляция с малым и средним временем жизни.

- Высотные изменения спектров мощности, в особенности смещения максимумов спектров в сторону меньших частот, свидетельствуют о том, что при проникновении в верхние слои солнечной фотосферы уменьшается количество мелких ячеек, а также возможно их расширение в верхних слоях фотосферы.
- Резкое уменьшение и смещение спектров для долгопериодических вариаций, скорее всего, свидетельствует о том, что долгоживущие ячейки в верхних слоях фотосферы расширяются, делятся и, соответственно, дают вклад в спектр мощности на меньших пространственных масштабах.
- Особенности спектра мощности вертикальных скоростей в диапазоне малых частот указывают на то, что конвективные потоки супергрануляции хорошо сохраняются при проникновении в верхние слои фотосферы, на спектре мощности температурных вариаций супергрануляция подобным образом не проявляется.

Исследованы высотные изменения вариаций температуры и вертикальных скоростей на грануляционных ($0.5 \div 5.0$ Мм) и мезогрануляционных ($5 \div 12$ Мм) масштабах и вариаций вертикальных скоростей на супергрануляционных масштабах ($20 \div 30$ Мм).

- В фотосферных слоях существенные отличия между конвективными ячейками на грануляционных и мезогрануляционных масштабах не выявлены – вариации вертикальных скоростей и

температуры на этих масштабах максимальны в нижних слоях фотосферы и уменьшаются с высотой.

- Супергрануляционные ячейки проходят через всю фотосферу до высот температурного минимума – вариации вертикальной скорости на супергрануляционных масштабах во всех слоях фотосферы остаются в тех же пределах.

Мы искренне благодарны Н.Г. Щукиной и Р.И. Костыку за предоставленные результаты наблюдений.

Литература

- Баран, Стодилка (Баран О.А., Стодилка М.И.) // Кинем. и физ. небесн. тел. 2010. Т. 26. С. 34.
- Баран (Баран О.А.) // ЖФД. 2012а. Т. 16. С. 3902.
- Баран (Баран О.А.) // Adv. Astron. Space Phys. 2012b. V. 2. P. 153.
- Вернацца и др. (Vernazza J.E., Avrett E.H., Loeser R.) // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1981. V. 45. P. 635.
- Гирзбергер и др. (Hirzberger J., Bonet J.A., Va'zquez M., Hanslmeier A.) // Astrophys. J. 1999. V. 527. P. 405.
- Гирзбергер и др. (Hirzberger J., Gizon, L., Solanki S.K., Duvall T.L.) // Solar Phys. 2008. V. 251. P. 417.
- Голдбаум и др. (Goldbaum N., Rast M.P., Ermolli I., Sands J.S., Berrilli F.) // Astrophys. J. 2009. V. 707. P. 67.
- Дель Моро и др. (Del Moro D., Berrilli F., Duvall T.L.Jr., Kosovichev A.G.) // Solar Phys. 2004. V. 221. P. 23.
- Карияппа и др. (Kariyappa R., Varghese B.A., Curdt W.) // Astron. Astrophys. 2001. V. 374. P. 691.
- Костык Р.И., Щукина Н.Г. // Астрон. журн. 2004. Т. 81. С. 846.
- Костык и др. (Kostik R., Khomenko E., Shchukina N.) // Astron. Astrophys. 2009. V. 506. P. 1405.
- Матлох и др. (Matloch L., Cameron R., Schmitt D., Schussler, M.) // Astron. Astrophys. 2009. V. 504. P. 1041.
- Меунье и др. (Meunier N., Tkaczuk R., Roudier Th., Rieutord M.) // Astron. Astrophys. 2007. V. 461. P. 1141.
- Нордлунд и др. (Nordlund A., Stein R.F., Asplund M.) // Liv. Rev. Solar Phys. 2009. V. 6.
- Новембер (November L.J.) // Astrophys. J. 1989. V. 344. P. 494.
- Новембер и др. (November L.J., Toomre J., Gebbie K.B., Simon G.W.) // Astrophys. J. 1981. V. 245. P. L123.
- Пушман и др. (Puschmann K., Vazquez M., Bonet J.A., Ruiz Cobo B., Hanslmeier A.) // Astron. Astrophys. 2003. V. 407. P. 363.
- Пушман и др. (Puschmann K., Ruiz Cobo B., Vazquez M., Bonet J.A., Hanslmeier A.) // Astron. Astrophys. 2005. V. 441. P. 1157.
- Раст (Rast M.P.) // Astrophys. J. 2003. V. 597. P. 1200.
- Раст (Rast M.P.) // Astrophys. J. 1995. V. 443. P. 863.
- Реторд и др. (Rieutord M., Roudier T., Malherbe J.M., Rincon F.) // Astron. Astrophys. 2000. V. 357. P. 1063.
- Реторд и др. (Rieutord M., Roudier T., Rincon F., Malherbe J.M., Meunier N., Berger T., Frank Z.) // Astron. Astrophys. 2010. V. 512. id. A4.
- Реторд, Ринкон (Rieutord M., Rincon F.) // Liv. Rev. Solar Phys. 2010. V. 7.
- Роудье и др. (Roudier Th., Lignie'res F., Rieutord M., Brandt P.N., Malherbe J.M.) // Astron. Astrophys. 2003. V. 409. P. 299.
- Роудье, Мюллер (Roudier Th., Muller R.) // Astron. Astrophys. 2004. V. 419. P. 757.
- Симон, Лейтон (Simon G.W., Leighton R.B.) // Astrophys. J. 1964. V. 140. P. 1120.
- Стодилка (Стодилка М.И.) // ЖФД. 2002. Т. 6. С. 435.
- Стодилка М.И., Баран А.А., Малинич С.З. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2006. Т. 22. С. 173.

Хесевай и др. (Hathaway D.H., Beck J.G., Bogart R.S., Bachmann K.T., Khatri G., Petitto J.M., Han S., Raymond J.) // Solar Phys. 2000. V. 193. P. 299.

Чоу и др. (Chou D.Y., Chen C.S., Ou K.T., Wang C.C.) // Astrophys. J. 1992. V. 396. P. 333.

Эспагнет и др. (Espagnet O., Muller R., Roudier T., Mein N.) // Astron. Astrophys. 1993. V. 271. P. 589.

Эспагнет и др. (Espagnet O., Muller R., Roudier T., Mein P., Mein N.) // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1995. V. 109. P. 79.