

УДК 523.9

Р. И. Костык¹, Н. Г. Щукина¹, Н. И. Кобанов², В. А. Пуляев²¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680²Институт солнечно-земной физики СО РАН,
ул. Лермонтова 126а, Иркутск, Россия, 664033**Влияние магнитного поля на распространение
5-минутных колебаний в атмосфере Солнца:
сдвиги фаз**

По результатам спектральных (в линии $Va\ II$ 455.4 нм) и спектрополяриметрических (в линиях $Fe\ I$ 1564.3—1565.8 нм) наблюдений активной области (изолированный флоккул в центре солнечного диска) на германском вакуумном башенном телескопе VTT Института астрофизики на Канарах исследуются особенности распространения 5-мин колебаний от основания фотосферы ($h = 0$ км) до нижней хромосферы ($h = 650$ км). На высоте образования континуума ($h = 0$ км) характер распространения волн в активной и спокойной областях не сильно отличаются: 80—90 % поверхности исследуемых площадок занимают волны, движущиеся вверх и вниз. В нижней хромосфере ($h = 650$ км) различия поведения волн носят принципиальный характер. В спокойной области в 90 % случаях волны становятся стоячими. В противоположность этому при наличии средних и сильных магнитных полей ($B = 30...180$ мТл) в 47 % случаях волны являются бегущими вверх, что дает принципиальную возможность нагревать активную область. Исследования показали наличие в активной области волн, сдвиг фаз $\Phi_{T,V}$ колебаний температуры и скорости которых лежит в пределах $90...0$. В спокойной атмосфере такие волны распространяться не могут.

ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПОШИРЕННЯ 5-ХВИЛИННИХ КОЛИВАНЬ В АТМОСФЕРІ СОНЦЯ: ЗСУВ ФАЗ, Костик Р. І., Щукіна Н. Г., Кобанов М. І., Пуляєв В. О. — За результатами спектральних (в лінії $Va\ II$ 455.4 нм) та спектрополяриметричних (в лініях $Fe\ I$ 1564.3—1565.8 нм) спостережень активної ділянки (ізолюваний флоккул в центрі сонячного диска) на німецькому вакуумному баштовому телескопі VTT Інституту астрофізики на Канарах, дослід-

жено особливості поширення 5-хв коливань від рівня фотосфери ($h = 0$ км) до нижньої хромосфери ($h = 650$ км). На висоті утворення континууму ($h = 0$ км) характер поширення хвиль в активній та спокійній ділянках не дуже відрізняються: 80—90 % поверхні досліджуваних ділянок займають хвилі, що рухаються вгору та вниз. У нижній хромосфері ($h = 650$ км) різниця поведінки хвиль має принциповий характер. У спокійній ділянці в 90 % випадків хвилі перетворюються у стоячі. Натомість при наявності середніх та сильних магнітних полів ($B = 30 \dots 180$ мТл) у 47 % випадків хвилі поширюються вгору, що дає принципову можливість нагрівати активну ділянку. Дослідження показали наявність в активній ділянці хвиль, зсув фаз $\Phi_{T,V}$ коливань температури та швидкості яких лежить у межах $90 \dots 0$. У спокійній атмосфері такі хвилі поширюватись не можуть.

THE INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON THE PROPAGATION OF FIVE-MINUTE OSCILLATIONS IN THE SOLAR ATMOSPHERE: THE PHASE SHIFTS, by Kostik R. I., Shchukina N. G., Kobanov N. I., Pulyaev V. A. — Using some results of spectral (in Ba II 455.4 nm line) and spectropolarimetric (in Fe I 1564.3—1565.8 nm lines) observations of the active region (isolated faculae in the solar disk center) with the German Vacuum Tower Telescope (VTT) at the Canaries Institute of Astrophysics, we investigated some properties of the propagation of five-minute oscillations from the base of the photosphere ($h = 0$ km) to the bottom of the chromosphere ($h = 650$ km). At the height of the continuum formation ($h = 0$ km) the nature of wave propagation in active and quiet regions are not much different: from 80 % to 90 % of the investigated areas are occupied by waves moving up and down. In the lower chromosphere ($h = 650$ km), the differences in the behavior of the waves are fundamental. In a quiet area, the waves become standing for 90 % of the cases. In contrast to this, in the presence of moderate and strong magnetic fields ($B = 30—180$ nT), for 47 % of the cases, the waves are running up, giving the principal possibility to heat the active region. Our investigation revealed the presence of the waves in the active region, $\Phi_{T,V}$ phase shift of which is between -90° and 0° . The waves with such $\Phi_{T,V}$ phase shifts can not propagate in a quiet atmosphere.

Введение. Сдвиги фаз между колебаниями скорости ($\Phi_{V,V}$), интенсивности ($\Phi_{I,I}$) на разных высотах в атмосфере Солнца, а также между колебаниями интенсивности и скорости ($\Phi_{V,I}$) на одних и тех же высотах содержат важную информацию о направлении (вверх или вниз) и характере процесса распространения волны (адиабатическом, изотермическом или промежуточном). В спокойных площадках поверхности Солнца (где напряженность магнитного поля минимальна) характеристики волн исследовались неоднократно. Наблюдательные и теоретические итоги этих исследований можно найти в довольно полных обзорах [1, 5]. Мы вправе ожидать, что при наличии магнитного поля

колебания должны быть иными, чем в спокойной атмосфере, а также могут возникать новые типы волн, способные переносить энергию из фотосферы в хромосферу и корону.

Нам удалось найти лишь несколько публикаций, в которых приведены результаты измерений сдвигов фаз $\Phi_{V,V}$ и $\Phi_{V,I}$ в площадках солнечной поверхности с разной напряженностью магнитного поля: network и internetwork (мы не рассматриваем поведение волн в тени и полутени солнечных пятен). В работах [6, 13—15, 20] сделан вывод, что исследуемые сдвиги фаз в network- и internetwork-площадках различны, но в диапазоне 5-мин колебаний в этих структурных образованиях волны близки к стоячим, а процесс распространения волны — адиабатический. Исключение составляет работа [2], в которой на основании поведения разности фаз $\Phi_{I,I}$ центральных интенсивностей хромосферной линии K резонансного дублета Ca II и линии 849.8 нм инфракрасного дублета Ca II автор делает вывод о наличии распространяющихся волн на границе между «сеткой» и «ячейкой», т. е. на участке солнечной поверхности, где концентрируется магнитный поток. Во всех перечисленных работах не приводятся никакие зависимости от величины напряженности магнитного поля, поскольку последнее не измерялось.

Цель нашей работы — восполнить этот пробел и проследить трансформацию 5-мин колебаний от основания фотосферы ($h = 0$ км) до нижней хромосферы ($h = 650$ км) при наличии умеренных и сильных магнитных полей.

Наблюдения. Наблюдения проводились Е. В. Хоменко 13 ноября 2007 г. на германском вакуумном башенном телескопе VTT Института астрофизики на Канарских островах (о. Тенерифе, Испания) одновременно в трех участках длин волн: Fe I 1564.3—1565.8 нм, Ba II 455.4 нм, Ca II 396.8 нм. Для этого мы использовали два инструмента: TIR-II [4] и TESOS [19]. Для наблюдений мы выбрали изолированный флоккул вблизи центра солнечного диска, который не принадлежал ни к какой группе пятен. Поскольку процедура наблюдений и обработки наблюдательного материала подробно описана в работе [11], мы перечислим лишь данные, которые использовались в настоящей работе.

1. Пять последовательных во времени TIR-площадок размерами 5.5 18.5 с четырьмя профилями Стокса двух инфракрасных линий Fe I (1564.3—1565.8 нм) с временным разрешением 6 мин 50 с, пространственным (пиксельное) — 0.185 , спектральным — 1.473 пм и общей продолжительностью наблюдений 34 мин 41 с.

2. Временную TESOS-серию спектра линии Ba II для площадки размерами 5.5 18.5 с временным разрешением 25.6 с, пространственным (пиксельное) — 0.089 , спектральным — 1.6 пм и продолжительностью наблюдений 34 мин 41 с.

Процессом наблюдений управляла TIR-камера, входная щель которой сканировала участок поверхности Солнца. Высота щели состав-

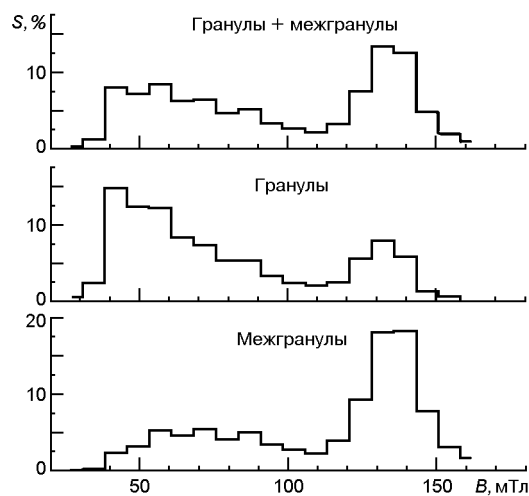


Рис. 1. Гистограммы магнитного поля для всей исследуемой области, только для гранул и только для межгранульных промежутков

ляла 84 , а ширина — 0.35 . В течение серии делалось 15 сканов, затем щель возвращалась в исходное положение. Продолжительность одного скана составляла 27.3 с, во время которого регистриро-

вались все четыре параметра Стокса, а серии — 6 мин 50 с. Регистрация велась на ПЗС-матрице размерами 452 1009 пкл.

Линия Ва II регистрировалась узкополосным фильтром в непрерывном спектре и 37 длинах волн на ПЗС-камеру размером 512 512 пкл. При передвижении ТИР-щели регистрируемая область не выходила за пределы зрения TESOS-камеры, а только смещалась на 0.35 , т. е. в течение всего времени наблюдений в поле зрения TESOS-камеры находился один и тот же участок поверхности Солнца размерами 45.6 45.6 . Во время наблюдений дрожание изображения на входной щели спектрографа, обусловленное нестабильностью земной атмосферы, было близко к 0.5 .

С использованием target-снимков оба вида наблюдений были совмещены по пространству с погрешностью, не превышающей один пиксел. Эта процедура оказалась совсем не тривиальной.

Спектрополяриметрические наблюдения (ТИР-камера) мы дополнительно исправляли за инструментальную поляризацию, калибровали и получили I -, Q -, U - и V -профили Стокса. Затем, используя инверсный код SIR [17], мы нашли напряженность и наклон магнитного поля в каждом пикселе всех пяти серий в предположении, что оно постоянно по высоте. На рис. 1 мы приводим общую гистограмму распределения напряженности магнитного поля (верхняя панель), а также отдельно для гранул (средняя панель) и отдельно для межгранульных промежутков. Обращает на себя внимание относительно большой процент высоких значений поля B для этого активного образования. Два максимума обусловлены спецификой распределения магнитного поля в гранулах и межгранульных промежутках активной области. Как и следовало ожидать, максимальные поля сконцентрированы в межгранульных промежутках. Однако и в гранулах количество образований немонотонно убывает с увеличением поля B , а в отдельных гранулах значения магнитного поля близки к максимальным значениям в межгранулах. Отметим, что похожее двухвершинное распреде-

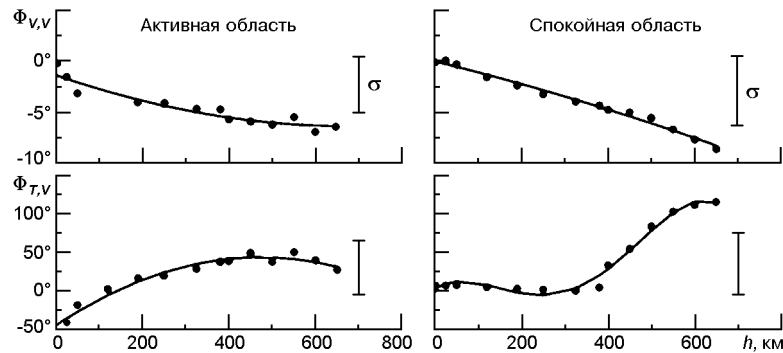


Рис. 2. Сдвиги фаз $\Phi_{V,V}$ между колебаниями скорости на $h = 0$ км и всеми другими высотами для активной и спокойной областей, а также сдвиги фаз $\Phi_{T,V}$ между колебаниями температуры и скорости на одних и тех же высотах, извлеченные из линии Ва II

ление напряженности магнитного поля в активной области приводится и в работах [3,7].

Применяя методику «лямбда-метр» [18], мы нашли колебания интенсивности и скорости на 14 остаточных глубинах контуров линии Ва II (14 высотах в атмосфере Солнца), которые обусловлены в основном конвективными и волновыми движениями (положительные скорости направлены вверх). Чтобы разделить грануляционную и волновую составляющие полей интенсивности и скорости, мы использовали диагностическую k - диаграмму, т. е. зависимость мощности вариаций I и V от временной (ω) и пространственной (k) частот. Более подробно процедура разделения полей интенсивности и скорости на волновую и конвективную составляющие приведена в нашей работе [10]. В дальнейшем мы будем исследовать только волновую составляющую полей интенсивности и скорости.

Результаты и обсуждение. На левой верхней панели рис. 2 показаны сдвиги фаз между колебаниями скорости у основания фотосферы ($h = 0$ км) и всеми другими высотами вплоть до нижней хромосферы ($h = 650$ км). Абсолютные значения $\Phi_{V,V}$ не превышают 6-7 (волны близки к стоячим), а знак минус указывает на то, что колебания у основания фотосферы ($h = 0$ км) опережают колебания в нижней хромосфере ($h = 650$ км), т. е. волны распространяются в среднем вверх. Для того чтобы удобнее сравнивать полученные из наблюдений сдвиги $\Phi_{V,I}$ с модельными, мы превратили колебания интенсивности в колебания температуры, исходя из следующих качественных соображений. Поскольку мы имеем дело с линией ионизованного бария, то при увеличении температуры линия становится глубже (ее интенсивность уменьшается), т. е. колебания интенсивности и температуры находятся в противофазе в 180° . Принимая это во внимание, на левой нижней панели приведены сдвиги фаз $\Phi_{T,V}$ на всех 14 высотах от $h = 0$ км до $h = 650$ км. Положительные значения $\Phi_{T,V}$ указывают на то, что колебания температуры опережают колебания скорости. Нам кажется интересным сравнить полученные результаты о сдвигах в ак-

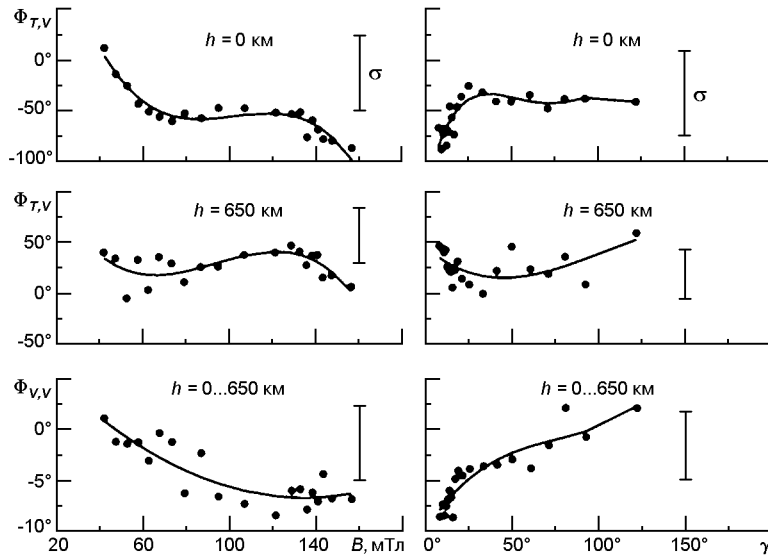


Рис. 3. Зависимость сдвигов фаз $\Phi_{T,V}$ в активной области (флоккул) поверхности Солнца от напряженности B магнитного поля и его наклона на высоте образования непрерывного спектра ($h = 0$) и в области нижней хромосферы ($h = 650$ км). Внизу — зависимость сдвигов фаз $\Phi_{V,V}$ от B для $h = 0...650$ км

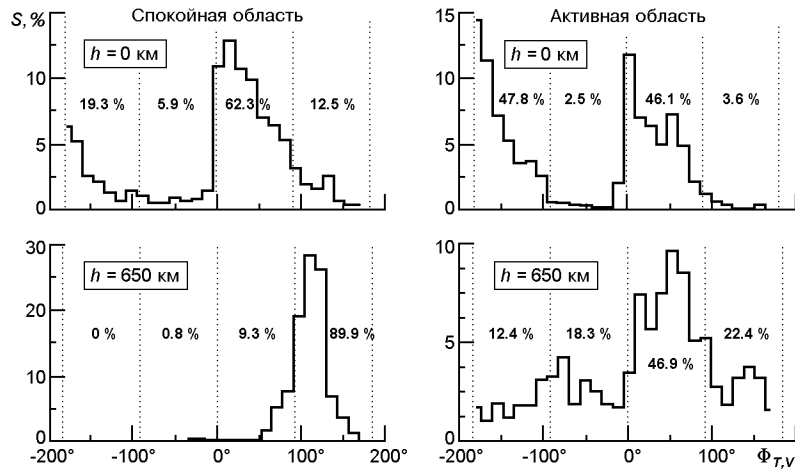


Рис. 4. Гистограммы сдвигов фаз $\Phi_{T,V}$ у основания фотосферы ($h = 0$) и в нижней хромосфере ($h = 650$ км) для спокойной и активной (флоккул) атмосферы

тивной области, с таковыми в спокойной площадке солнечной поверхности. Для этой цели мы воспользовались наблюдениями, которые были проведены в этой же самой линии Ва II, на этом же самом инструменте в июне 2004 г., но в спокойном участке центра солнечного диска [12]. Соответствующие результаты приведены справа на рис. 2. Сдвиги фаз $\Phi_{V,V}$ в активной и спокойной областях очень похожи, а отличия сдвигов $\Phi_{T,V}$ — значительны по всей толще исследуемых высот. Более подробный анализ этих зависимостей мы проведем позднее.

На рис. 3 показано влияние величины напряженности B и наклона магнитного поля на величины $\Phi_{T,V}$ и $\Phi_{V,V}$. У основания фотосферы ($h = 0$ км) магнитное поле существенно модифицирует характер волны — сдвиг фаз между температурой и скоростью изменяется от 0 до 90°. Существенно меньше это влияние в нижней хромосфере ($h = 650$ км). Что касается сдвигов фаз $\Phi_{V,V}$, то по мере увеличения напряженности магнитного поля они увеличиваются. Максимальные (по абсолютной величине) сдвиги фаз $\Phi_{T,V}$ и $\Phi_{V,V}$ имеют место при углах наклона магнитного поля в пределах 0—10°. На рис. 3 обращает на себя внимание довольно большая средняя квадратичная погрешность значений сдвигов фаз (каждая точка усреднялась по 75 измерениям). Одна из возможных причин — значительный «разброс» отдельных измерений от среднего. Мы разделили весь диапазон сдвигов фаз $\Phi_{T,V}$ на четыре домена: 180...90°, 90...0°, 0...+90° и построили гистограммы сдвигов фаз (рис. 4). Если в среде нет магнитного поля, то согласно хорошо развитой теории распространения волн в неабатической среде [16, 21] каждому отдельному домену соответствует свой тип волн: $\Phi_{T,V} = 0...+90^\circ$ — движущиеся вверх, $\Phi_{T,V} = 180...90^\circ$ — движущиеся вниз, $\Phi_{T,V} = +90...+180^\circ$ — стоячие волны. Волны с $\Phi_{T,V} = 90...0^\circ$ распространяться не могут. Для магнитной среды такое простое разделение на типы волн, по-видимому, не годится, однако соответствующая теория еще не создана. Возвратимся к рис. 4. В нижней фотосфере, на уровне образования непрерывного спектра ($h = 0$ км) гистограмма для спокойной области похожа на гистограмму в активной области, хотя имеются и различия. В спокойной области в более 60 % случаях наблюдаются движущиеся вверх волны, а в активной — почти по 50 % движущихся вверх и движущихся вниз. В нижней хромосфере на высоте $h = 650$ км гистограммы отличаются значительно. В спокойной области в 90 % случаев наблюдаются только стоячие волны, и лишь около 9 % — движущиеся вверх. В активной области все движущиеся вверх волны, которые наблюдались на $h = 0$ км (около 46 %), достигли высоты $h = 650$ км. Кроме того, под воздействием магнитного поля возник новый тип волн (около 18 %), у которых сдвиг фаз между колебаниями температуры и скорости заключен в пределах $\Phi_{T,V} = 90...0^\circ$. Для идентификации этих волн (по-видимому, какой-то тип магнито гидродинамических волн) требуется дополнительное теоретическое рассмотрение.

Заключение. По результатам двумерных наблюдений активной и спокойной областей (флоккул) в центре солнечного диска мы исследовали особенности распространения 5-мин колебаний от основания фотосферы до нижней хромосферы. На высоте образования континуума ($h = 0$ км) характеры распространения волн в активной и спокойной областях не сильно отличаются: 80...90 % поверхности исследуемых площадок занимают волны, движущиеся вверх и вниз. В нижней хромосфере ($h = 650$ км) различия в поведении волн носят принципиальный характер. В спокойной области в 90 % случаях волны стано-

ваются стоячими. Этот результат подтверждает давно известные выводы, что в спокойной атмосфере Солнца 5-мин колебания не в состоянии переносить энергию из фотосферы в хромосферу. В противоположность этому — при наличии средних и сильных магнитных полей ($B = 30 \dots 180$ мТл) в 47 % случаях волны распространяются вверх, что дает принципиальную возможность нагревать активную область. Исследования показали наличие в активной области волн, сдвиги фаз $\Phi_{T,V}$ которых лежат в пределах $90 \dots 0$. По-видимому, это какой-то тип магнитогидродинамических волн. В спокойной атмосфере волны с такими сдвигами фаз $\Phi_{T,V}$ распространяться не могут. Интересно заметить, что Н. И. Кобанов и В. А. Пуляев [8, 9], исследуя осцилляции в хромосфере факелов, нашли, что наиболее отчетливые признаки распространяющихся волн совпадают пространственно с локальными максимумами напряженности продольного магнитного поля.

1. Дубов Э. Е. Колебания и волны атмосфере Солнца // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Астрономия.— 1978.—**14**.—С. 148—266.
2. Турова И. П. Особенности режима колебаний во флоккуле и его окрестностях на разных уровнях хромосферы // Письма в астроном. журн.—2011.—**37**.—С. 863—880.
3. Bellot Rubio L. R., Ruiz Cobo B., Collados M. Structure of a facular region from the inversion of high spatial and temporal resolution Stokes spectra // ASP Conf. Ser.—1999.—**183**.—P. 61—69.
4. Collados M., Lagg A., Diaz Garci A. J. J., et al. Tenerife Infrared Polarimeter II // ASP Conf. Ser.—2007.—**368**.—P. 611—616.
5. Deubner F. L. Waves and oscillations in the non-magnetic photosphere // The solar photosphere: structure, convection and magnetic fields: Proc. IAU symp. 138 / Ed. by J. O. Stenflo. — Kiev, Kluwer, Dordrecht, 1990.—P. 217—228.
6. Deubner F. L., Fleck B. Dynamics of the solar atmosphere. III. Cell-network distinctions of chromospheres oscillations // Astron. and Astrophys.—1990.—**288**.—P. 506—512.
7. Dominguez Cerdana I., Sanchez Almeida J. The distribution of quiet sun magnetic field strengths from 0 to 1800 G // Astrrophys. J.—2006.—**636**, N 1.—P. 496—509.
8. Kobanov N. I., Pulyaev V. A. Photospheric and chromospheric oscillations in solar faculae // Solar Phys.—2007.—**246**, N 1.—P. 273—279.
9. Kobanov N. I., Pulyaev V. A. Spatial distribution of oscillations in faculae // Solar Phys.—2011.—**268**, N 2.—P. 329—334.
10. Khomenko E., Kostik R. I., Shchukina N. G. Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes // Astron. and Astrophys.—2001.—**369**, N 2.—P. 660—671.
11. Kostik R., Khomenko E. V. Properties of convective motions in facular regions // Astron. and Astrophys.—2012.—**545**.—P. 22—31.
12. Kostik R., Khomenko E., Shchukina N. Solar granulation from photosphere to low chromosphere observed in Ba II 4554 A line // Astron. and Astrophys.—2009.—**506**, N 4.—P. 1405—1415.
13. Lites B. W., Chipman E. G., White O. R. The vertical propagation of waves in the solar chromospheres. II. Phase delay in the quiet chromospheres and cell-network distinctions // Astrophys. J.—1982.—**253**.—P. 367—385.
14. Lites R. W., Rutten R. J., Kalkofen W. Dynamics of the solar atmosphere. I. Long period network oscillations // Astrophys. J.—1993.—**444**.—P. 345—356.

15. *Mein N., Mein P.* Velocity waves in the quiet solar chromospheres // *Solar Phys.*—1976.—**49**.— P. 231—248.
16. *Noyes R. W., Leighton R. B.* Velocity fields in the solar atmosphere. II. The oscillatory field // *Astrophys. J.*—1963.—**138**.—P. 631—647.
17. *Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C.* Inversion of Stokes profiles // *Astrophys. J.*—1992.—**398**, N 1.—P. 375—385.
18. *Stebbins R. T., Goode P. R.* Waves in the solar photosphere // *Solar Phys.*—1987.—**110**, N 2.— P. 237—253.
19. *Tritschler A., Schmidt W., Langhans K., Kentischer T.* High-resolution solar spectroscopy with TESOS — Upgrade from a double to a triple system // *Solar Phys.*—2002.—**211**.—P. 17—29.
20. *Uexkull M., Kneer F., Malherbe J. M., Mein P.* Oscillations of the Sun's chromospheres. V. Importance of network dynamics for chromospheric heating // *Astron. and Astrophys.*—1989.— **208**.—P. 290—296.
21. *Whitney C. A.* Granulation and oscillations of the solar atmosphere // *Smithsonian Contributions Astrophys.*—1958.—**2**.—P. 365—376.

Статья поступила в редакцию 01.08.13