

УДК 523.942

Р. И. Костык

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
e-mail: kostik@mao.kiev.ua

Какие механизмы позволяют 5-минутным колебаниям в активных областях солнечной поверхности проникать из фотосферы в хромосферу?

По результатам фильтровых (в центре линии Ca II 396.8 нм), спектральных (в линии Ba 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 ($h = 1600$ км). Максимум мощности колебаний в нижней фотосфере, в переходной области и в средней хромосфере приходится на период вблизи $P = 5$ мин. На высоте $h = 1600$ км хорошо заметен еще один период колебаний $P = 700$ с. Проникновению 5-мин колебаний из фотосферы в хромосферу способствуют два фактора: наклон силовых линий магнитного поля и отклонение процесса распространения волны от адиабатического. Максимальная мощность 5-мин колебаний на высоте $h = 1600$ км приходится на углы наклона магнитного поля в диапазоне $11 - 13^\circ$ и на сдвиг фаз между колебаниями температуры и скорости, равным $40 - 50^\circ$.

ЯКІ МЕХАНІЗМИ ДОЗВОЛЯЮТЬ 5-ХВИЛИННИМ КОЛИВАННЯМ В АКТИВНИХ ДІЛЯНКАХ СОНЯЧНОЇ ПОВЕРХНІ ПРОНИКАТИ З ФОТОСФЕРИ В ХРОМОСФЕРУ?, Костик Р. І. — За результатами фільтрових (в центрі лінії Ca II 396.8 нм), спектральних (в лінії Ba II 455.4 нм) та спектрополяриметричних (в лініях Fe I 1564.3—

1565.8 нм) спостережень активної ділянки (ізольований флоккул в центрі сонячного диска) на німецькому вакуумному баштовому телескопі VTT Інституту Астрофізики на Канарах досліджуються особливості поширення 5-хв коливань від основи фотосфери ($h = 0$ км) до нижньої хромосфери ($h = 1600$ км). Максимум потужності коливань у нижній фотосфері, у перехідній області та в середній хромосфері припадає на період $P \approx 5$ хв. На висоті $h = 1600$ км добре помітний ще один період коливань $P \approx 700$ с. Проникненню 5-хв коливань з фотосфери у хромосферу сприяють два фактори: нахил магнітних силових ліній та відхилення процесу поширення хвиль від адиабатичного. Максимальна потужність 5-хв коливань на висоті $h = 1600$ км припадає на кути нахилу магнітних силових ліній до вертикалі у межах 11° — 13° та на зсув фаз між коливаннями температури та швидкості, рівний 40° — 50° .

WHAT MECHANISMS ALLOW THE 5-MINUTE OSCILLATIONS IN THE ACTIVE REGIONS OF THE SOLAR SURFACE TO PENETRATE FROM THE PHOTOSPHERE INTO THE CHROMOSPHERE?, by Kostyk R. I. — Using some results of filter (line center of Ca II 396.8 nm) spectral (in Ba II 455.4 nm) and spectropolarimetric (in Fe I 1564.3—1565.8 nm) observations of an active region (isolated faculae near 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 bottom of the photosphere ($h = 0$ km) to the bottom of the chromosphere ($h = 1600$ km). Maximum oscillation power in the lower photosphere, in the transition region, and in the middle chromosphere falls at a period close to $P \approx 5$ min. At the height $h = 1600$ km is well seen even one oscillation period $P \approx 700$ sec. Penetration of 5-min oscillations from the photosphere into the chromosphere is allowed by two factors: the inclination of the magnetic field lines and the deviation of wave propagation process from adiabatic. Maximal power of 5-minute oscillations at the height $h = 1600$ km to fit on the inclination angles of the magnetic field in the range of 11° — 13° and the phase shift between the oscillations of temperature and velocity of 40° — 50° degrees.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в солнечной атмосфере волны с частотой меньше критической («частота обрезания» $\omega_c = a/2H \approx 5.2$ мГц, где a — скорость звука, H — шкала высот, которая определяется температурой атмосферы) не могут распространяться: для колебаний с частотой $\omega < \omega_c$ происходит не передача колебаний вверх, а просто перестройка атмосферы [21]. С другой стороны, многочисленные наблюдения показывают, что максимум мощности колебаний в областях с магнитным полем (мы не будем рассматривать солнечные пятна и поры), тем не ме-

нее, приходится на частоты меньше критической частоты (≈ 5.2 МГц) как в фотосфере, так и в хромосфере [2—6, 11, 13, 15, 18, 19, 22, 24, 26, 28].

Каким образом 5-мин колебания проникают в хромосферу? В 1973 г. Мичалитсанос [20] показал, что в среде, где магнитное поле наклонено к вектору гравитации под углом θ , критическая частота ω_c понижается до величины $\omega_c \cos \theta$, что дает возможность пятиминутным колебаниям проникать в хромосферу. Затем этот механизм рассматривался в работах [1, 29]. Математическое моделирование, выполненное в работах [8, 9], подтвердило эффективность этого механизма проникновения пятиминутных колебаний из фотосферы в хромосферу. Де Вийн [7], используя наблюдения «Hinode», показал, что в центре площадок (plages), где поле близко к вертикальному, преимущественно распространяются 3-мин колебания, а 5-мин — исключительно на краях площадок (plages), где поле расширяется и становится наклонным. Стангалини и др. [25] по данным наблюдений IBIS и «Hinode SOT/SP» построили зависимость мощности колебаний от угла наклона магнитного поля: для 3-мин колебаний максимум мощности припадает на 15° , а для 5-мин — на 25° .

С другой стороны, наблюдения показывают, что 5-мин колебания наблюдаются в хромосфере не только в местах с наклонным магнитным полем. Альтернативное объяснение было предложено Робертсом [23] и обусловлено изменением времени радиативной релаксации температурных неоднородностей, что также приводит к понижению критической частоты. Этот механизм способствует распространению хромосферных 5-мин колебаний и в вертикальном магнитном поле, что было продемонстрировано МГД-моделированием [12].

В настоящей работе на основе данных наблюдений мы хотим подтвердить или опровергнуть наличие этого механизма.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проводились Е. Хоменко 13 ноября 2007 г. на германском вакуумном башенном телескопе VTT Института астрофизики на Канарах одновременно в трех участках длин волн: Fe I $1564.3\dots 1565.8$ нм, Ba II 455.4 нм, Ca II 396.8 нм. По фильтрограмме в линии Ca II 396.8 нм была выбрана активная область вблизи центра солнечного диска — факел. Поскольку условия наблюдений и процедура обработки наблюдательного материала подробно описаны в наших предыдущих работах [14, 16, 17], мы перечислим лишь наши исходные (для настоящей работы) наблюдательные данные для площадки размерами 5.5×18.5 , которая сканировалась в течение 34 мин 41 с:

а) значения напряженности и наклона магнитного поля на высоте $h = 0$ км в атмосфере Солнца (рис. 1). Номинальное (пиксельное) про-

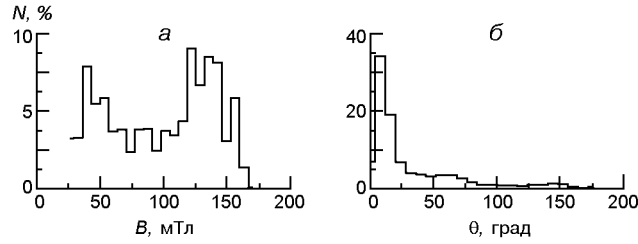


Рис. 1. Гистограмма распределения напряженности магнитного поля в исследуемой активной области на солнечной поверхности (слева) и гистограмма распределения наклона магнитного поля к вектору тяжести

пространственное разрешение составляло 0.185 , а временное — 6 мин 50 с;

б) флуктуации интенсивности и скорости на 14 высотах в атмосфере Солнца в диапазоне 0—650 км с номинальным пространственным разрешением 0.089 и временным — 25.6 с;

в) флуктуации интенсивности на высоте $h = 1600$ км в солнечной атмосфере с номинальным пространственным разрешением 0.123 и временным — 4.93 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В предыдущей работе [14] мы исследовали конвективную составляющую полей интенсивности и скорости. В данной работе основное внимание уделено волновой составляющей. Методика разделения конвективной и волновой составляющих полей интенсивности и скорости описана в наших предыдущих работах [14, 15].

На рис. 2 показана мощность W колебаний в зависимости от частоты на трех высотах в атмосфере Солнца: $h = 0, 650$ и 1600 км. Тонкой горизонтальной линией отмечен уровень ошибок 3 . Видно, что максимум мощности колебаний в нижней фо-

не выделено. Видно, что максимум мощности колебаний в нижней фо-

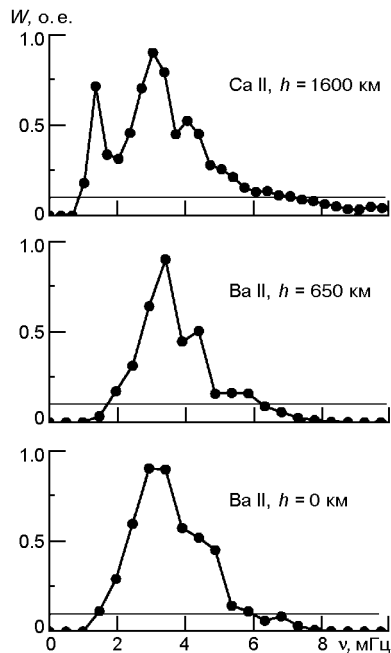


Рис. 2. Зависимость мощности волновых колебаний интенсивности (верхняя панель) и скорости (средняя и нижняя панели) от частоты, соответственно на высотах $h = 1600, 650$ и 0 км в атмосфере Солнца

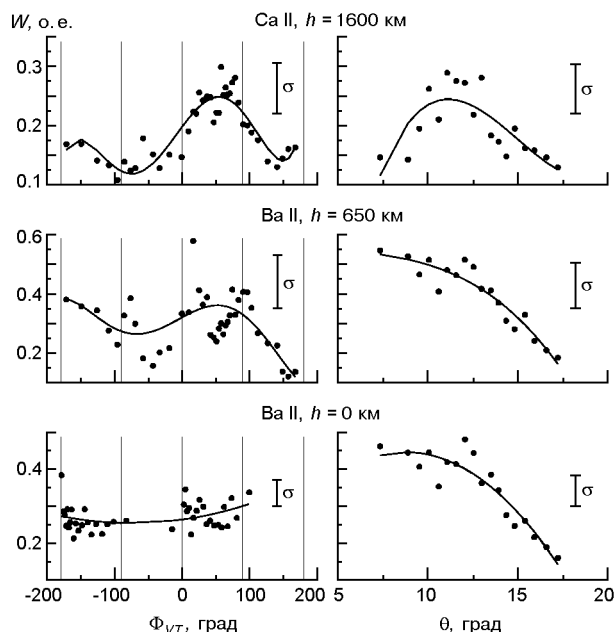


Рис. 3. Зависимость мощности волновых колебаний интенсивности (верхняя панель, $h = 1600$ км) и скорости (средняя панель, $h = 650$ км; нижняя панель, $h = 0$ км) от сдвига фаз между колебаниями температуры и скорости на высоте $h = 650$ км (верхняя и средняя панели) и колебаниями температуры и скорости на высоте $h = 0$ км (нижняя панель)

тосфере, в переходной области и в средней хромосфере приходится на период $P \approx 5$ мин. На высоте $h = 1600$ км хорошо заметен еще один период колебаний $P \approx 700$ с. Близкие периоды наблюдались и в работах [13, 19].

Много полезной информации о волновых движениях и характере их распространения в солнечной атмосфере можно получить, исследуя сдвиги фаз Φ_{TV} между колебаниями скорости и температуры (интенсивности) на разных высотах в атмосфере Солнца. На левой панели рис. 3 мы приводим зависимость мощности W колебаний от величины Φ_{TV} на трех разных высотах в атмосфере Солнца (каждая точка — результат усреднения по 40 отдельным измерениям). Тонкие вертикальные линии разделяют рисунки на четыре домена, по 90° в каждом, от -180° до $+180^\circ$. В зависимости от знака и величины Φ_{TV} каждому домену соответствует разный тип волн: $0 < \Phi_{TV} < 90$ — бегущие вверх волны, $90 < \Phi_{TV} < 180$ — стоячие, $-180 < \Phi_{TV} < -90$ — бегущие вниз [10, 27]. Волны, для которых сдвиг фаз Φ_{TV} заключен в пределах -90 — 0 распространяться не могут (следует оговорить, что такая классификация волн справедлива лишь для среды без магнитного поля).

У основания фотосферы ($h = 0$ км) волны в 95 % случаях распространяются или вверх, или вниз, причем мощность колебаний почти

не зависит от сдвига фаз между колебаниями температуры и скорости (рис. 3, *в*). В нижней хромосфере ($h = 650$ км) в пределах ошибки не видно никаких явных закономерностей, но появляются стоячие волны ($90 < \tau_V < 180$), а также волны со сдвигами фаз $-90 < \tau_V < 0$, т. е. волны, которые согласно теории [10, 27] вообще не могут распространяться (рис. 3, *б*). В средней хромосфере (рис. 3, *а*) мощность колебаний имеет один доминирующий максимум. Он припадает на то место, где сдвиг фаз между колебаниями температуры и скорости заключен в пределах $40 \dots 50$, т. е. где волны распространяются вверх, и отклонения процесса распространения волны от адиабатичности достигают максимальных значений.

Поскольку в нашем распоряжении имеются данные о наклоне магнитных силовых линий к вертикали, то мы исследовали, как мощность колебаний зависит от этого параметра на разных высотах в атмосфере Солнца. Результаты приведены на рис. 3 справа (каждая точка — результат усреднения по 40 отдельным измерениям). Если в основании фотосферы (рис. 3, *е*) и переходной области (рис. 3, *д*) мощность колебаний монотонно увеличивается с уменьшением угла наклона магнитных силовых линий, то в среднюю хромосферу (рис. 3, *з*) наибольшую вероятность проникнуть имеют колебания, распространяющиеся вдоль магнитных силовых линий, наклон к вертикали которых равен $10 \text{—} 13$. Это в два раза меньше, чем оценка [25].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты наших наблюдений показывают, что в активной области (факел), где напряженность магнитного поля достигает $B = 170$ мТл максимум мощности колебаний приходится на период около $P = 5$ мин (рис. 2) как в основании фотосферы ($h = 0$ км), в переходной области ($h = 650$ км) так и в средней хромосфере ($h = 1600$ км), что согласуется с результатами предыдущих работ [2—6, 11, 13, 18, 19, 22, 24, 28].

Почему волны с периодом $P > 3$ мин, что подтверждают и наши результаты, проникают из фотосферы в хромосферу? Одна из предложенных возможностей — отклонение процесса распространения волны от условия адиабатичности под воздействием магнитного поля [12, 23]. Действительно, приблизительно на 50 % активной области распространяются бегущие вверх неадиабатические волны, в которых колебания температуры опережают колебания скорости в диапазоне от нуля до 90 с максимумом вблизи 45 (рис. 3, *а*).

Вторая из возможных причин проникновения 5-мин колебаний в хромосферу — распространение вдоль наклонного магнитного поля [1, 7—9, 20, 25, 29]. Мы проверили эффективность этого механизма, построив зависимость мощности колебаний в линии Ca II 396.8 нм вблизи периода колебаний $P = 320$ с (рис. 2, *а*) от величины наклона магнитного поля. Действительно, как видно из рис. 3, *з* имеется явно

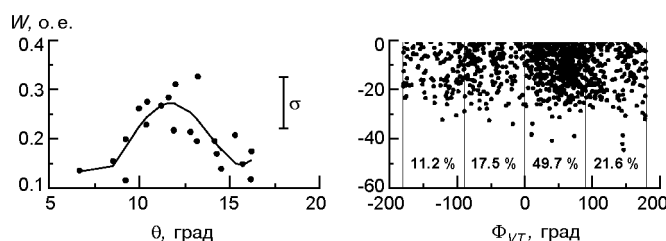


Рис. 4. Зависимость мощности W волновых колебаний интенсивности на высоте $h = 1600$ км бегущих вверх волн от угла наклона магнитных силовых линий (слева) и от величины сдвига фаз Φ_{TV} (справа)

выраженный максимум этой зависимости, который приходится на углы наклона $10 - 13^\circ$. Ранее Стангалини [25], по данным наблюдений в линиях Ca II 854.2 нм ($h = 1500$ км) и Fe I 617.3 нм ($h = 300$ км) обнаружил, что максимум мощности 5-мин колебаний приходится на магнитное поле с наклоном около 25° . Возможной причиной расхождений могут быть разные значения напряженности магнитных полей, а также разные высоты в атмосфере Солнца, к которым относятся эти результаты. Данные о магнитном поле в нашей работе получены только для основания фотосферы на высоте $h = 0$ км.

Поскольку нас больше всего интересуют волны, которые распространяются вверх (именно они переносят энергию из фотосферы в хромосферу), то мы построили зависимость мощности колебаний на высоте образования центральной интенсивности линии Ca II ($h = 1600$ км) от наклона магнитного поля только для этих волн. Из рис. 4, а видно, что как и на рис. 3, σ максимум мощности колебаний приходится на углы $11 - 13^\circ$. На рис. 4, б показаны сдвиги фаз Φ_{TV} распространяющихся вверх волн. Только около 50 % этих волн имеют сдвиги фаз Φ_{TV} в диапазоне $0 - 90^\circ$. Мы действительно убеждаемся, что классификация волн по величине сдвигов фаз Φ_{TV} , которой пользуются для спокойной атмосферы Солнца [10, 27], не справедлива для среды, где есть умеренные магнитные поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали, как изменяются характеристики звуковых волн в активной области на поверхности Солнца (факел) при наличии умеренных магнитных полей. Основные результаты следующие.

1. Максимум мощности колебаний в нижней фотосфере, в переходной области и в средней хромосфере приходится на период $P = 5$ мин. На высоте $h = 1600$ км хорошо заметен еще один период колебаний $P = 700$ с.

2. Проникновению 5-мин колебаний из фотосферы в хромосферу способствуют два фактора: наклон силовых линий магнитного поля и отклонение процесса распространения волны от адиабатического.

Максимальная мощность 5-мин колебаний на высоте $h = 1600$ км приходится на углы наклона магнитного поля в диапазоне 11 ...13 и на сдвиг фаз между колебаниями температуры и скорости, равный $\tau_V = 40 \dots 50$.

1. *Bel N., Leroy B.* Analytical study of magneto-acoustic gravity waves // *Astron. and Astrophys.*—1977.—**55**.—P. 239—243.
2. *Blondel M.* Etude statistique comparee du champ de vitesse dans une region active et deux regions calmes de la photosphere du Soleil // *Astron. and Astrophys.*—1971.—**10**.—P. 342—353.
3. *Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J.* Oscillations and wave propagation in different solar magnetic features // *ASP Conf. Ser.*—2006.—**358**.—P. 465—470.
4. *Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J.* Wave propagation and shock formation in different magnetic structures // *Astrophys. J.*—2009.—**692**.—P. 1211—1220.
5. *Deubner F. L.* Some properties of velocity fields in the solar photosphere // *Solar Phys.*—1967.—**2**.—P. 133—149.
6. *Deubner F. L.* Waves and oscillations in the non-magnetic photosphere // *IAUS.*—1990.—**138**.—P. 217—228.
7. *De Wijn A. G., McIntosh S. W., De Pontieu B.* On the propagation of p-modes into the solar chromospheres // *Astrophys. J.*—2009.—**702**.—P. L168—L171.
8. *Hegglund L., De Pontieu B., Hansteen V. H.* Numerical simulations of shock wave-driven chromospheric jets // *Astrophys. J.*—2007.—**666**.—P. 1277—1283.
9. *Hegglund L., Hansteen V. H., De Pontieu B., Carlsson M.* Wave propagation and jet formation in the chromospheres // *Astrophys. J.*—2011.—**743**.—P. 142—171.
10. *Holweger H., Testerman L.* Five-minute oscillations of solar equivalent width // *Solar Phys.*—1975.—**43**.—P. 271—284.
11. *Howard R.* Velocity field in the solar atmosphere // *Solar Phys.*—1967.—**2**.—P. 3—33.
12. *Khomenko E., Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J.* Channeling 5 minute photospheric oscillations into the solar outer atmosphere through small-scale vertical magnetic flux tubes // *Astrophys. J.*—2008.—**676**.—P. L85—L88.
13. *Kobanov N. I., Pulyaev V. V.* Photospheric and chromospheric oscillations in solar faculae // *Solar Phys.*—2007.—**246**.—P. 273—279.
14. *Kostik R., Khomenko E.* Properties of convective motions in facular regions // *Astron. and Astrophys.*—2012.—**545**.—A22.—P. 1—9.
15. *Kostik R., Khomenko E.* Properties of oscillatory motions in a facular region // *Astron. and Astrophys.*—2013.—**559**.—A107.—P. 1—10.
16. *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**.—P. 1405—1415.
17. *Kostyk R. I., Khomenko E. V.* The effect of acoustic waves on spectral-line profiles in the solar atmosphere: observations and theory // *Astron. Rep.*—2002.—**46**.—P. 925—931.
18. *Krijger J. M., Rutten R. J., Lites B. W., et al.* Dynamics of the solar chromosphere. III. Ultraviolet brightness oscillations from TRACE // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**379**.—P. 1052—1082.
19. *Lites B. W., Rutten R. J., Kalkofen W.* Dynamics of the solar chromosphere. I. Long-period oscillations // *Astrophys. J.*—1993.—**414**.—P. 345—356.

20. *Michalitsanos A. G.* The five-minutes period oscillations in magnetically active regions // *Solar Phys.*—1973.—**30**.—P. 47—61.
21. *Noyes R. W., Leighton R. B.* Velocity field in the solar atmosphere. II. The oscillatory field // *Astrophys. J.*—1963.—**138**.—P. 631—647.
22. *Orral F. Q.* Observational study of macroscopic inhomogeneities in the solar atmosphere. VIII. Vertical chromospheric oscillations measured in K3 // *Astrophys. J.*—1966.—**143**.—P. 917—927.
23. *Roberts B.* Wave propagation in intense flux tubes // *Solar Phys.*—1983.—**87**.—P. 77—93.
24. *Sheeley N. R., Bhatnagar A.* Measurements of the oscillatory and slowly-varying components of the solar velocity field // *Solar Phys.*—1971.—**18**.—P. 379—384.
25. *Stangalini M., Del Moro D., Berrilli F., Jefferies S. M.* MHD wave transmission in the Sun's atmosphere // *Astron. and Astrophys.*—2011.—**534**.—A65.—P. 1—7.
26. *Turova I. P.* Peculiarities of the mode of oscillations in a floccule and its neighborhoods at different chromospheric levels // *Astron. Lett.*—2011.—**37**.—P. 799—816.
27. *Whitney C. A.* Granulation and oscillation of the solar atmosphere // *Smithsonian Contribs Astrophys.*—1958.—**2**. P. 365—376.
28. *Woods D. T., Cram L. E.* High resolution spectroscopy of the disk chromospheres // *Solar Phys.*—1981.—**6**.—P. 233—238.
29. *Zhugzhda Y. D., Dzhililov N. S.* Magneto-acoustic-gravity waves on the Sun. I. Exact solution for an oblique magnetic field // *Astron. and Astrophys.*—1984.—**132**.—P. 45—51.

Статья поступила в редакцию 01.12.2014