

УДК 523.942

Р. И. Костык

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03143
kostik@mao.kiev.ua

Влияние волновых движений в активной области солнечной поверхности на конвекцию

Обсуждаются результаты наблюдений активной области (факел) вблизи центра солнечного диска, которые были проведены на германском вакуумном башенном телескопе VTT (о. Тенерифе, Испания). Установлено, что уменьшение контраста (яркости) факела с увеличением магнитного поля от 130 до 160 мТл вызвано тем обстоятельством, что в этом диапазоне напряженностей магнитного поля V_V -сдвиг фаз волн близок к нулю ($\varphi_{VV} \approx 0$), т. е. волна становится стоячей и не переносит энергию из фотосферы в хромосферу. Звуковые волны, которые распространяются с хромосферы в направлении фотосферы, заметно влияют на температурные характеристики турбулентных вихрей на уровне образования непрерывного спектра. В частности, контраст гранул под воздействием этих волн может увеличиться на 25 %.

Ключевые слова: Солнце, факел, волны, грануляция.

ВВЕДЕНИЕ

На первый взгляд может показаться, что в название работы проникла какая-то ошибка или неточность. Ведь хорошо известно, что именно подфотосферная турбулентная конвекция возбуждает волновые движения в атмосфере Солнца. И, насколько нам известно, никто не пытался рассматривать обратный процесс — влияние волновых движений на турбулентные движения в фотосфере Солнца. К такому рассмотрению нас подтолкнули результаты предыдущей работы [7], где мы рассматривали распространение пятиминутных звуковых колебаний в солнечной атмосфере и обнаружили, что яркость факельной площадки в хромосфере ($h = 1600$ км), которая наблюдается в центре

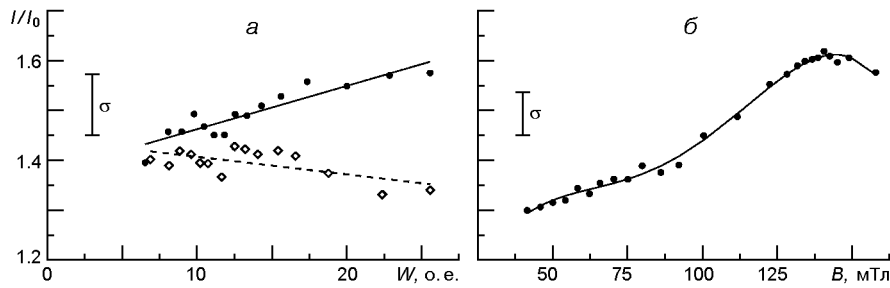


Рис. 1. Зависимости контраста (яркости) факела в центре линии Ca II H 396.8 нм: *a* — от мощности колебаний скорости волн, которые распространяются вверх (точки, сплошная линия) и которые распространяются вниз (ромбы, пунктир), *б* — от напряженности магнитного поля

линии Ca II H 396.8 нм, сильно зависит от направления распространения волны. Яркость (контраст) факела увеличивается с увеличением мощности колебаний скорости волны, распространяющейся вверх, но уменьшается для волны, которая распространяется вниз (рис. 1*a*). Мы сделали заключение, что яркость факела обусловлена не только тем, что из-за магнитного давления излучение выходит с более глубоких (горячих) слоев атмосферы (эффект Вильсона), но температура плазмы в факеле реально выше окружающей невозмущенной среды в тех местах, где волна движется вверх.

Без ответа остался вопрос, реальна ли зависимость уменьшения яркости факела (она сравнима со средней квадратичной погрешностью наблюдений) в тех местах, где волна распространяется вниз? Если да, то мы вправе ожидать, что в фотосфере ($h = 0$ км) должен наблюдаться аналогичный эффект влияния волны на температурный режим плазмы: в местах, где волна распространяется вниз, температура плазмы должна быть выше, чем в местах, где волна распространяется вверх. Проверка этого предположения и есть целью нашей работы. Мы осознаем, что если этот эффект и имеет место, то он должен быть очень слабо выраженным, поскольку распространяющаяся вниз волна из-за увеличивающейся плотности плазмы очень быстро теряет свою мощность. Мы также не нашли причину, почему контраст факела не монотонно увеличивается с увеличением напряженности магнитного поля, как следовало бы ожидать из общих рассуждений, а начиная с приблизительно 140 мТл, наоборот, уменьшается (рис. 1*б*).

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Мы использовали наблюдения факельной площадки вблизи центра солнечного диска, которые были проведены 13 ноября 2007 г. на германском вакуумном башенном телескопе VTT [1, 12, 15] (о. Тенерифе, Испания).

Наблюдения велись одновременно в трех участках длин волн:

1. Fe I 1564.3...1565.8 нм, спектрополяриметрические. Регистрировались все четыре параметра Стокса. Часовое разрешение составляло 6 мин 50 с, спектральное — 1.473 рм/пкл, пространственное — 0.185 /пкл. Входная щель спектрографа шириной 0.35 сканировала активную область (факел) вблизи центра солнечного диска размерами 5.5 84 .

2. Ba II 455.37...455.43 нм, фильтровые в 37 длинах волн. Часовое разрешение составляло 25.6 с, спектральное — 1.6 рм/пкл, пространственное — 0.089 /пкл. Поле зрения фильтра — 45.6 46.6 .

3. Ca II H 396.8 нм, фильтровые, только в центре линии. Часовое разрешение составляло 4.9 с, пространственное — 0.123 /пкл. Поле зрения фильтра — 110 110 .

Общее время наблюдений длилось 34 мин 41 с. Нестабильность земной атмосферы во время наблюдений изменялась от 0.4 до 0.7 . Методика наблюдений и первичная обработка наблюдательного материала подробно описаны в наших предыдущих работах [6, 8, 9].

По спектрополяриметрическим наблюдениям линий нейтрального железа $\lambda = 1564.8$ и 1565.2 нм мы вычислили напряженность магнитного поля. Для этой цели мы воспользовались программным комплексом SIR [11], любезно предоставленным в наше распоряжение сотрудниками Института астрофизики на Канарах. Этот набор программ позволяет по известным из наблюдений параметрам Стокса в приближении локального термодинамического равновесия восстановить напряженность магнитного поля B , а также другие параметры солнечной атмосферы в гранулах и межгранульных промежутках. В качестве начального приближения использовалась Гарвард-Смитсоновская модель атмосферы Солнца HRSA [2]. Магнитное поле предполагалось одно-компонентным и постоянным по высоте. Вычисленные напряженности магнитного поля в исследуемой факельной области оказались в пределах 30...170 мТл.

Вариации интенсивности и скорости были найдены по контурам линии Ba II, применяя «лямбда-метр»-методику [8, 14]. Мы выбрали 14 ширин d (расстояние от фиолетового до красного крыла спектральной линии) на которых для каждого момента времени t и для каждого положения щели спектрографа x находились значения интенсивности $I(t, x, d)$ и скорости $V(t, x, d)$. Затем были найдены усредненные по пространству x и времени t контуры линии $I(d), V(d)$ и вычислены флуктуации интенсивности и скорости согласно выражениям

$$I(t, x, d) - I(t, x, d) - I(d),$$

$$V(t, x, d) - V(t, x, d) - V(d).$$

Отметим, что область образования линии Ba II охватывает высоты h от 0 до 650 км [13].

Флуктуации параметров I и V обусловлены конвективными и

волновыми движениями. Используя диаграмму k — , мы разделили эти две составляющие флуктуаций интенсивности и скорости [4, 5, 8].

Таким образом, для дальнейших исследований мы имеем:

1) напряженность и наклон магнитного поля на высоте образования непрерывного спектра линий нейтрального железа $\lambda = 1564.8$ и 1565.2 нм ($h = -100$ км),

2) конвективные и волновые интенсивности и скорости на 14 высотах в атмосфере Солнца, где образуется контур спектральной линии Ва II $\lambda = 455.4$ нм ($h = 0 \dots 650$ км),

3) волновые интенсивности на высоте образования центра линии Са II $\lambda = 396.8$ нм ($h = 1600$ км) [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мы проанализировали несколько возможных причин уменьшения контраста факела с увеличением напряженности магнитного поля в диапазоне 130 ...160 мТл (рис. 1б). По-видимому, наиболее вероятной причиной такого поведения контраста факела является уменьшение сдвигов фаз волны V_V (по абсолютной величине), которая распространяется снизу вверх с увеличением напряженности магнитного поля, как это видно на рис. 2б. А чем меньше V_V -сдвиг фаз (далее V_V), тем ниже контраст факела (рис. 2а). Отметим, что T_V -сдвиги фаз (далее T_V) не показывают какой-либо монотонной зависимости от напряженности магнитного поля B (рис. 2в). Можно лишь отметить, что вблизи $B = 50$ мТл сдвиги фаз T_V слегка превышают средние значения, а около $B = 150$ мТл они несколько ниже средних значений.

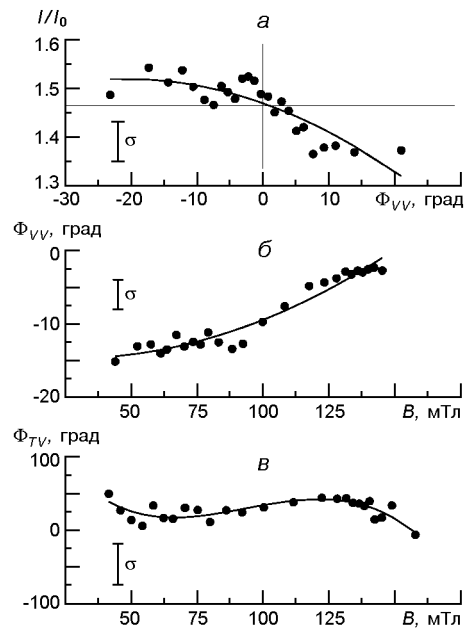


Рис. 2. Зависимости: а — контраста (яркости) факела в центре линии Са II $\lambda = 396.8$ нм от сдвига фаз волны V_V , б, в — V_V - и T_V -сдвигов фаз волны от напряженности магнитного поля

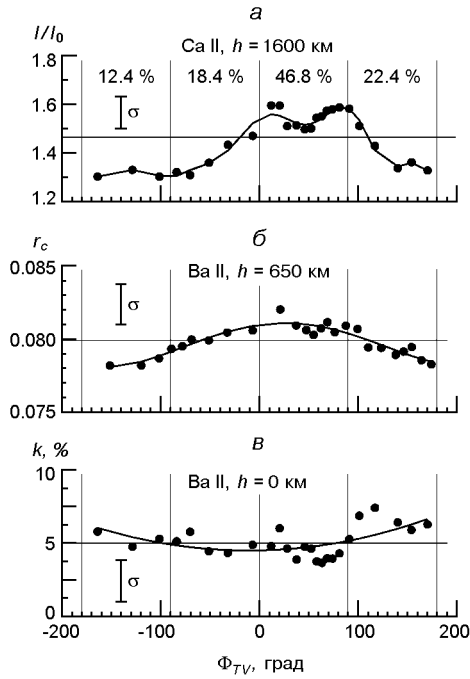
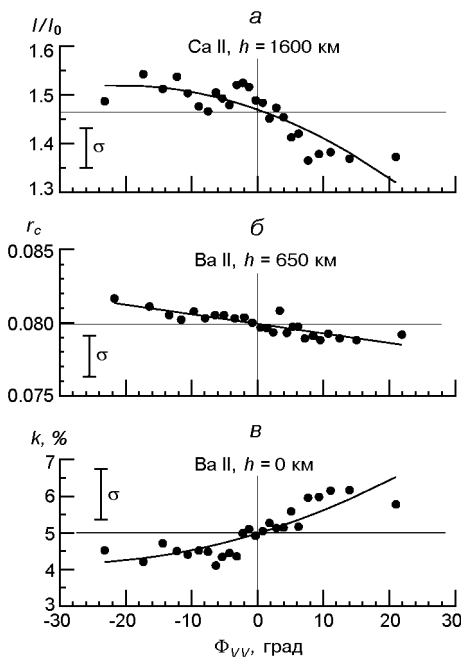


Рис. 3. Зависимости от сдвига фаз волны T_V : *a* — контраста (яркости) факела в центре линии Ca II $\lambda = 396.8$ нм, *б* — центральной остаточной интенсивности линии Ba II $\lambda = 455.4$ нм, *в* — контраста гранул в непрерывном спектре линии Ba II $\lambda = 455.4$ нм

На рис. 3 показано, как волновые движения с разными значениями T_V -сдвигов фаз возмущают атмосферу Солнца на разных ее высотах: от нижней фотосферы до верхней хромосферы. Наиболее сильное влияние, как и следовало ожидать, проявляется на высоте, где образуется центральная интенсивность линии Ca II $\lambda = 396.8$ нм ($h = 1600$ км): контраст факела изменяется от 1.3 до 1.6 (около 20 %). Максимум яркости (контраста) приходится на диапазон углов от 0 до 90° . Именно в этом диапазоне углов T_V -сдвигов фаз волны должны распространяться вверх [3], и следовательно, наиболее эффективно нагревать плазму. И действительно, в этих местах контраст факела выше среднего. На этот диапазон приходится почти половина всех значений углов T_V -сдвигов фаз. В диапазоне углов от -90° до -180° и от $+90^\circ$ до $+180^\circ$ контраст факела должен быть минимальным, поскольку здесь согласно работе [3] волны распространяются вниз, а также становятся стоячими. Как видно, результаты наших наблюдений подтверждают эти теоретические вычисления (рис. 3а).

Что касается углов от 0 до -90° , то с точки зрения теории здесь неблагоприятные условия для распространения волн. Тем не менее, наши наблюдения показывают, что и в этом диапазоне углов волны могут распространяться (около 18 % всех случаев). Мы напомним, что диаграмма, которая приведена в работе [3], построена на основании теории распространения волн в отсутствии магнитного поля, следовательно, наши сравнения не совсем корректны. Возможно поэтому и возникли разногласия для диапазона углов от 0 до -90° . Вполне может быть, что именно благодаря наличию магнитного поля, такие волны и могут распространяться в солнечной атмосфере. Еще хотим обратить

Рис. 4. Зависимости от сдвига фаз волны $\nu\nu$: *a* — контраста (яркости) факела в центре линии Ca II λ 396.8 нм в зависимости от V -сдвига фаз волны $\nu\nu$, *б* — центральной остаточной интенсивности линии Ba II λ 455.4 нм, *в* — контраста гранул в непрерывном спектре линии Ba II λ 455.4 нм



внимание на локальный минимум вблизи 45° . Мы не нашли удовлетворительного объяснения этой особенности. Хотя этот минимум наблюдается уверенно, но величина его находится в пределах ошибки наблюдений.

На рис. 3б нанесены центральные остаточные интенсивности линии Ba II λ 455.4 нм в гранулах в зависимости от T -сдвигов фаз $\nu\nu$. Средняя высота образования центральной остаточной интенсивности этой линии согласно работы [13] равна $h = 650$ км. Как видно из рисунка, центральные остаточные интенсивности максимальны вблизи 45° и монотонно уменьшаются по обе стороны от этого значения угла. Диапазон изменений центральной остаточной интенсивности заключен в пределах $0.078 \dots 0.081$, т. е. составляет всего лишь около 4 %.

Что касается рис. 3в, где нанесен контраст гранул в непрерывном спектре линии Ba II λ 455.4 нм, то здесь наблюдается лишь небольшой разброс точек относительно среднего значения.

На рис. 4 показана реакция атмосферы Солнца на направление движения волны. На рис. 4а для удобства сравнения мы повторяем зависимость, которая нанесена на рис. 2а. На рис. 4б видно, что с увеличением V -сдвига фаз (по абсолютной величине) волны, которая распространяется вверх (отрицательные значения $\nu\nu$) центральные остаточные интенсивности линии Ba II λ 455.4 нм в гранулах увеличиваются, а для волны, которая движется вниз (отрицательные значения $\nu\nu$), наоборот, — уменьшаются.

На рис. 4в (справа) представлены те результаты, ради которых и выполнялась эта работа: реакция гранул на волну, которая распространяется сверху вниз (положительные значения $\nu\nu$). Мы были удив-

лены, что такое влияние есть, и оно ощутимо: волна повышает контраст гранул почти на 25 %. Изменяет контраст гранул и волна, которая движется снизу вверх (отрицательные значения ν_V), но влияние совершенно противоположное: контраст гранул не увеличивается, а уменьшается, правда, на меньшую величину — около 15 %. Горизонтальными линиями нанесены средние значения соответствующих величин, как видно, все они приходятся на нулевой угол сдвигов фаз ($\nu_V = 0$).

Мы повторили все вычисления, результаты которых приведены на рис. 3 и 4, но для межгранульных промежутков. Результаты аналогичные как и для гранул, но величина эффекта существенно меньшая. Чтобы не перегружать текст рисунками, мы их опускаем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уменьшение контраста (яркости) факела с увеличением магнитного поля от 130 до 160 мТл вызвано тем обстоятельством, что в этом диапазоне напряженности магнитного поля $V-V$ -сдвиг фаз волн близок к нулю ($\nu_V = 0$), т. е. волна становится стоячей и не переносит энергию с фотосферы в хромосферу.

Волны, которые распространяются с хромосферы в фотосферу (положительные значения сдвигов фаз ν_V), уменьшают контраст факела, но увеличивают контраст гранул (по отношению к среднему значению), а волны с противоположным направлением движения, т. е. из фотосферы в хромосферу (отрицательные значения ν_V) уменьшают контраст гранул, но увеличивают контраст факела.

Таким образом, наши исследования показали, что в активной области солнечной поверхности (факел), звуковые волны, которые распространяются с хромосферы в направлении фотосферы, могут заметно влиять на температурные характеристики турбулентных вихрей на уровне образования непрерывного спектра. В частности, контраст гранул под воздействием этих волн может увеличиться на 25 %.

1. Collados M., Lagg A., Diaz Garci A. J. J., et al. Tenerife Infrared Polarimeter II. *ASP Conf. Ser.* 2007. 368. P. 611—616 (The Physics of Chromospheric Plasmas / Eds P. Heinzel, I. Dorotović, R. J. Rutten).
2. Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., et al. The Harvard-Smithsonian reference atmosphere. *Solar Phys.* 1971. 18. N 2. P. 347—365.
3. Holweger H., Testerman L. Five-minute oscillations of solar equivalent widths. *Solar Phys.* 1975. 43. N 2. P. 271—284.
4. 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.
5. Kostik R. I., Khomenko E. Observations of a bright plume in solar granulations. *Astron. and Astrophys.* 2007. 476. N 2. P. 341—347.
6. Kostik R., Khomenko E. Properties of convective motions in facular regions. *Astron. and Astrophys.* 2012. 545. A22. P. 1—9.

7. Kostik R., Khomenko E. The possible origin of facular brightness in the solar atmosphere regions. *Astron. and Astrophys.* 2016. 589. A6. P. 1—7.
8. Kostik R., Khomenko E., Shchukina N. Solar granulation from photosphere to low chromosphere observed in Ba II 4554 Å line. *Astron. and Astrophys.* 2009. 506. P. 1405—1415.
9. 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.
10. Linsky J. L., Avrett H. E. The Solar H and K lines. *Publs Astron. Soc. Pacif.* 1970. 82. N 485. P. 169L—248L.
11. Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C. Inversion of Stokes profiles. *Astrophys. J.* 1992. 398. N 2. P. 375—385.
12. Schroeter E. H., Soltau D., Wiehr E. The German solar telescopes at the Observatorio del Teide. *Vistas in Astron.* 1985. 28. N 3. P. 519—525.
13. Shchukina N. G., Olshevsky V. L., Khomenko E. V. The solar Ba II 4554 Å line as a Doppler diagnostic: NLTE analysis in 3D hydrodynamical model. *Astron. and Astrophys.* 2009. 506. P. 1393—1404.
14. Stebbins R., Goode P. R. Waves in the solar photosphere. *Solar Phys.* 1987. 110. N 2. P. 237—253.
15. 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. N 1. P. 17—29.

Статья поступила в редакцию 25.07.2017

P. I. Kostik

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
Київ, Україна

ВПЛИВ ХВИЛЬОВИХ РУХІВ В АКТИВНІЙ ДІЛЯНКІ СОНЯЧНОЇ ПОВЕРХНІ НА КОНВЕКЦІЮ

Обговорюються результати спостережень активної ділянки (факел) поблизу центра сонячного диску, які були отримані на німецькому вакуумному баштовому телескопі VTT (о. Тенерифе, Іспанія). Встановлено, що зменшення контрасту (яскравості) факела зі збільшенням магнітного поля від 130 до 160 мТл обумовлено тим явищем, що в цьому діапазоні напруженостей магнітного поля V_V -зсув фаз хвиль близький до нуля ($V_V \approx 0$), тобто хвиля переходить у стоячу і не переносить енергію з фотосфери у хромосферу. Звукові хвилі, які поширюються з хромосфери в напрямку фотосфери, помітно впливають на температурні характеристики турбулентних вихрів на рівні утворення неперервного спектру. Зокрема, контраст гранул під дією цих хвиль може збільшитись на 25 %.

Ключові слова: Сонце, факел, хвилі, грануляція.

R. I. Kostyk

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine

EFFECT OF WAVE MOTIONS IN THE ACTIVE REGION OF THE SOLAR SURFACE ON CONVECTION

The results of observations of the active region (faculae) near the center of the solar disk, which were obtained on the German Vacuum Tower Telescope VTT (Tenerife, Spain) are

discussed. We have determined that the decrease in the contrast (brightness) of the faculae with an increase in the magnetic field from 1300 G to 1600 G is due to the fact that in this range of magnetic field strengths the $V_{\perp}V_{\parallel}$ phase shift of the waves is close to zero ($\varphi_{V_{\perp}V_{\parallel}} \approx 0$), i.e. the wave becomes stationary and does not transfer energy from the photosphere to the chromosphere. Sound waves that propagate from the chromosphere towards the photosphere significantly affect the temperature characteristics of turbulent vortices at the level of formation of the continuous spectrum, in particular, the contrast of the granules under the influence of these waves can increase by 25 %.

Keywords: Sun, faculae, oscillations, granulation.