

Издаётся Евразийским астрономическим обществом
и Государственным астрономическим институтом имени П.К. Штернберга МГУ

№ 1631, 2016 апреля 22

ДИАГНОСТИКА МЕЛКОМАСШТАБНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЗА ПРЕДЕЛАМИ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН ПО НАБЛЮДЕНИЯМ SOT/Hinode

В. Лозицкий¹, О. Ботыгина¹, М.Гордовский²

¹*Астрономическая обсерватория*

Киевского национального университета им. Тараса Шевченко

ул.Обсерваторная, 3, Киев 04053, Украина

lozitsky@observ.univ.kiev.ua, olga.botygina@gmail.com

²*Центр Астрофизики Джодрелл Банк, Университет Манчестера*

Манчестер M13 9PL, Великобритания

tykola.gordovskyy@manchester.ac.uk

Поступила в редакцию 17 ноября 2015 г.

После доработки 6 апреля 2016 г.

Резюме. Мы анализируем структуру фотосферных магнитных полей в трёх активных областях на основе наблюдений зеемановского расщепления линий Fe I 6301.5 Å и 6302.5 Å. Стокс-компоненты I и V данных линий получены с телескопа SOT/Hinode. Для анализа выбраны участки фотосферы за пределами пятен, где эффективные магнитные поля B_{eff} были в пределах 5–350 Гс. Пространственное разрешение прямых наблюдений около 300 км. Найдено, что расщепление этих двух линий соответствует разным величинам магнитного поля B_{eff} ; типичное соотношение $B_{\text{eff}}(6301.5)/B_{\text{eff}}(6302.5) \approx 1.3$. Кроме того, формы бисекторов $I \pm V$ компонент этих линий (показывающих расщепление разных частей линий) существенно различаются. Полученные данные указывают на то, что магнитное поле состоит из элементов с напряжённостью 1.3–2 кГс с малым фактором заполнения, окружённых фоновым полем с напряжённостью порядка 10–100 Гс.

Введение

Хотя пространственное разрешение Hinode довольно высокое [12], субсекундное (менее 300 км в красной области спектра), оно недостаточно для прямого разрешения элементарных силовых трубок магнитного поля, диаметр которых оценён на уровне 40–50 км [7, 13]. Однако среди используемых линий есть две пары линий, а именно FeI 5247.1–5250.2 Å и FeI 6301.5–6302.5 Å, которые весьма удобны в методе «отношения линий» [11], позволяющем оценивать величину локального магнитного поля даже в пространственно неразрешимых магнитных структурах.

Необходимость новых исследований мелкомасштабных магнитных полей вне солнечных пятен диктуется тем, что в этих местах на Солнце известна лишь приближённая величина локальных магнитных полей. Это связано с тем, что структура магнитного

поля здесь как минимум двухкомпонентная (фон + силовые трубки) и для интерпретации наблюдений необходимо использовать двухкомпонентные модели. Однако число свободных параметров в таких моделях слишком велико (около 10), и приходится вводить упрощающие предположения [8]. Например, это предположения о прямоугольном боковом распределении поля в силовых трубках, об одинаковой форме профилей линий в «фоне» и силовых трубках, о незначительных доплеровских сдвигах и др. Есть определённая зависимость полученных результатов и от модели атмосферы, т.е. термодинамических параметров [1], но всё-таки зависимость от модели магнитного поля является более существенной. Например, переход от прямоугольного профиля поля в силовых трубках к более плавному, гауссоподобному, увеличивает напряжённости на оси силовых трубок на десятки и даже сотни процентов [6, 7, 11]. Между тем, в некоторых работах на эту тему [9] этот вопрос даже не обсуждается. В результате использование однокомпонентных моделей может существенно занижать истинную величину локальных магнитных полей. Ранее было показано, что в рамках однокомпонентных моделей невозможно согласовать результаты измерений магнитного поля по линиям с существенно различной магнитной чувствительностью [2, 6, 10, 11].

В данной работе используются спектрополяриметрические наблюдения линий Fe I 6301 Å и 6302 Å полученные Hinode/SOT. На основе зеемановского расщепления данных линий (а именно, смещения центров тяжести $I + V$ и $I - V$ профилей Стокса) измеряются эффективные величины поля B_{eff} . Мы предполагаем, что магнитное поле двухкомпонентно и состоит из субтелескопических (т.е. с размерами меньшими чем пространственное разделение телескопа) трубок с полем B_{ft} (нижний индекс «ft» происходит от сокращения устоявшегося термина flux tube – трубка потока, т.е. силовая трубка магнитного поля) и фонового поля B_{back} . На основе соотношения между величинами магнитного поля B_{eff} , полученного по линиям 6301 Å и 6302 Å, мы оцениваем действительную величину магнитного поля в трубках B_{ft} . Именно последние две линии мы используем для диагностики субтелескопических магнитных полей в настоящей работе.

Наблюдения

Были проанализированы наблюдения активных областей NOAA2268 (29 января 2015; UT 12:40:33), NOAA 2320 (8 апреля 2015 г.; UT 08:36:58) и NOAA 2339 (9 мая 2015; UT 23:17:02 UT). Для примера на рис. 1–2 показано изображение активной области NOAA 2339 9 мая 2015 г. в континууме, а также вид линий FeI 6301.5 и 6302.5 в стоксовых параметрах I и V . Ввиду того, что нас интересует эффект Зеемана, абсолютная калибровка по длине волны и определение интенсивности континуума не проводились.

Дугообразная форма линий на диаграммах $\lambda - Y$ (рис. 2) является не следствием эффекта Доплера, а чисто инструментальным эффектом, обусловленным кривизной интерференционной картины в эталоне Фабри–Перо. На спектрах (рис. 2) отчётливо видна неоднородная структура лучевых скоростей и магнитных полей в солнечной фотосфере. Тёмные горизонтальные линии на левой панели рис. 2 соответствуют порам, расположенным между двумя большими пятнами в правой нижней части рис. 1. На левой панели рис. 2 можно видеть, что в светлых участках фотосферы преобладают отрицательные лучевые сдвиги (подъём вещества), тогда как в тёмных – положительные (опускание вещества). На правой панели этого же рисунка видно, что хотя в интервале $Y = -45... + 55$ секунд дуги полярность магнитного поля везде одинаковая; тем не

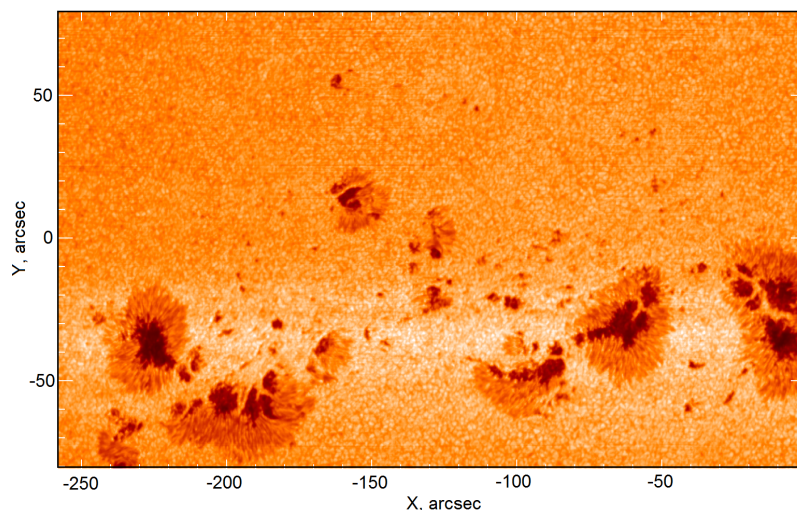


Рисунок 1: Изображение в континууме активной области 9 мая 2015 г. (NOAA 2339).

менее, это однополярное поле разбивается на мелкие дискретные участки с видимым диаметром примерно от 1 до 3 секунд дуги.

Соотношение B_{eff} по линиям FeI 6301.5 и 6302.5

На основе профилей I и V были получены их комбинации $I \pm V$, а по ним – величины эффективного магнитного поля B_{eff} , определяемого по смещению «центров тяжести» профиля $I + V$ относительно $I - V$ (см., например, [3]). То есть, B_{eff} – это величина магнитного поля, полученная непосредственно из наблюдений. Физически она примерно соответствует величине поля, усреднённой по площади входной щели инструмента. Для однородных магнитных полей B_{eff} соответствует действительной напряжённости продольной компоненты поля. Теоретически должно быть $B_{\text{eff}} = B_{\text{ft}}$ для однородного поля и $B_{\text{eff}} \approx \alpha B_{\text{ft}}$, если магнитное поле является неоднородным – в форме дискретных силовых трубок с напряжённостью продольного поля B_{ft} и фактором заполнения α [10]. В последнем случае предполагается, что напряжённость магнитного поля вне силовых трубок равна нулю. Такое приближение, строго говоря, является слишком грубым: отношение измеренных напряжённостей по линиям с различными факторами Ланде указывает на то, что силовые трубки переносят около 60% общего магнитного потока, тогда как фоновое поле – примерно 40% [7]. Впрочем, в работах разных авторов встречались очень разные оценки пропорции «силовые трубки/фон», со значительным перевесом в одну и другую сторону.

Наблюденное соотношение B_{eff} по линиям FeI 6301.5 и 6302.5 для внепятенных полей представлено на рис. 3. Сплошной линией здесь показана линия регрессии

$$B_{\text{eff}}(6301.5) = 1.37B_{\text{eff}}(6302.5) + 0.86 \quad (1)$$

Штриховая линия на этом рисунке представляет случай $B_{\text{eff}}(6301.5) = B_{\text{eff}}(6302.5)$. Видно, что для $B_{\text{eff}} \geq 40$ Гс все наблюденные точки в целом хорошо соответствуют выражению (1), и лишь для наиболее слабых полей, возможно, $B_{\text{eff}}(6301.5) \approx B_{\text{eff}}(6302.5)$.

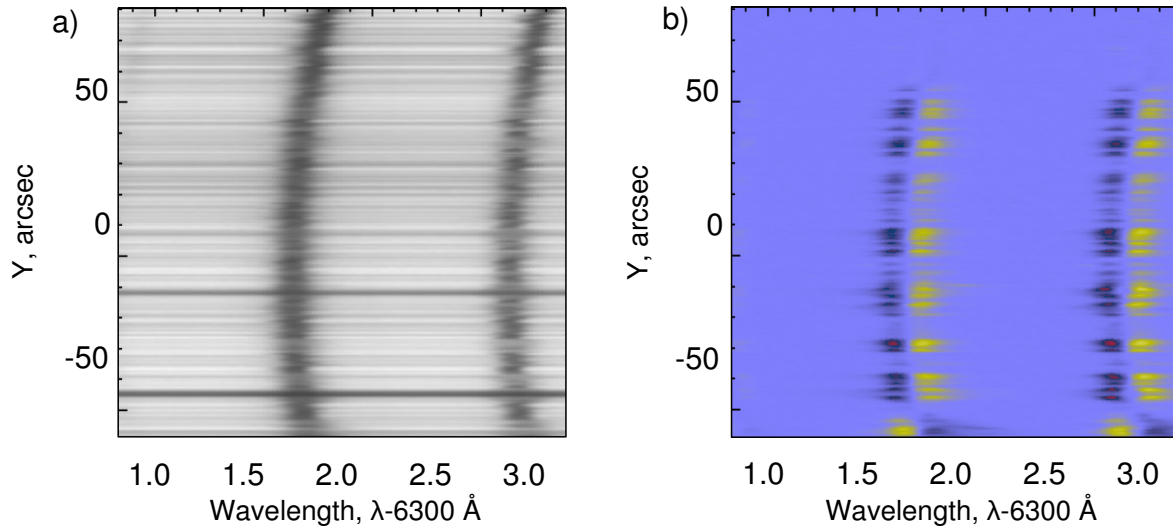


Рисунок 2: Изображение спектрального диапазона около 6302 Å с линиями FeI 6301.5 Å и 6302.5 Å в параметре Стокса I (a) и параметре Стокса V (b) для положения входной щели $X = -38$ arcsec на изображении на рис. 1.

Полученная зависимость (1) хорошо согласуется с результатами работы Domínguez Cerdeña et al. [1]. Авторы этой работы изучали структуру магнитного поля в центре диска вне фотосферной сетки. Было найдено, что даже с высоким пространственным разрешением (<1 секунды дуги) величины поля, полученные по расщеплению линий 6301.5 и 6302.5, отличаются, что указывает на неоднородность поля на масштабах менее 500 км. Кроме того, авторы рассчитали зависимости между соотношением $B_{\text{eff}}(6301.5)/B_{\text{eff}}(6302.5)$ и действительной величиной поля в маломасштабных элементах для разных моделей атмосферы. Так, при действительной величине поля около 500 Гс соотношение $B_{\text{eff}}(6301.5)/B_{\text{eff}}(6302.5) \approx 1$, при величине поля около 1 кГс $B_{\text{eff}}(6301.5)/B_{\text{eff}}(6302.5) \approx 0.8 - 1.1$, а при величине поля 1.5 кГс это соотношение возрастает до 1.2–1.6.

Сравнение полученной из наблюдений величины $B_{\text{eff}}(6301.5)/B_{\text{eff}}(6302.5)$ с данными из работы [1] дает действительную величину поля 1.3–1.6 кГс. Интересно, что существенный контраст между величинами $B_{\text{eff}}(6301.5)$ и $B_{\text{eff}}(6302.5)$ наблюдается в широком диапазоне величин B_{eff} , от 30 до 300 Гс.

Указанный разброс значений B_{ft} связан с тем, что для различных моделей атмосферы (Quiet Sun, Solar Network, MISMA и др.) получаются несколько различные калибровочные кривые. Однако соответствующий разброс (≈ 30) менее значителен, чем возможная коррекция данных за форму бокового профиля поля. В работе [1] рассмотрен простейший случай с «прямоугольным» распределением поля (т.е. поле в трубках однородно). Однако, если профиль поля в силовых трубках не прямоугольный, а более плавный, напоминающий профиль поля в солнечных порах, то величину магнитного поля следует увеличить в 1.5 раза [7], т.е. мы должны иметь $B_{\text{ft}} \approx 1.9-2.5$ кГс. Как увидим ниже, именно в таком диапазоне получают магнитные поля из рассмотрения особенностей бисекторов линий.

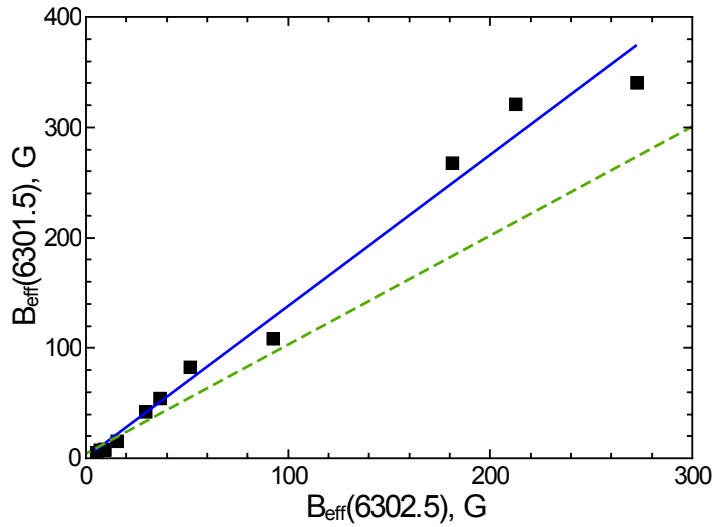


Рисунок 3: Сопоставление наблюдаемых величин B_{eff} по линиям FeI 6301.5 и 6302.5. Штриховая зелёная линия соответствует $B_{\text{eff}}(6301.5)/B_{\text{eff}}(6302.5) = 1$. Сплошная синяя линия показывает линейную аппроксимацию соотношения между $B_{\text{eff}}(6301.5)$ и $B_{\text{eff}}(6302.5)$.

Особенности расщеплений бисекторов линий

Наблюдённое расщепление бисекторов $\Delta\lambda_B$ в линиях FeI 6301.5 и 6302.5 в зависимости от расстояния $\Delta\lambda$ от центров этих линий представлено на рис. 4. Эти данные усреднены для диапазона $B_{\text{eff}} = 40 - 350$ Гс. Видно, что обе линии не удовлетворяют приближению слабого поля: вместо $\Delta\lambda_B = \text{const}$, линия FeI 6301.5 показывает уменьшение $\Delta\lambda_B$ при росте $\Delta\lambda$, тогда как FeI 6302.5 – обратную тенденцию. Поскольку обе линии образуются на близких высотах в атмосфере Солнца (точнее, их высоты формирования перекрываются), полученный результат не может отражать высотные изменения магнитного поля: ведь в таком случае необходимо предположить противоположные знаки высотного градиента. Поэтому можно предположить, что эффект возникает благодаря горизонтальной неоднородности [3].

Заметим, что аналогичные особенности для внепятенных магнитных полей были получены ранее в работе [5]. На основании рассмотрения расщеплений около 10 спектральных линий было показано, что если вместо зависимости $\Delta\lambda_B$ против $\Delta\lambda$ рассмотреть зависимость $\Delta\lambda_B$ против $\Delta\lambda/(g\lambda^2)$, то данные по разным линиям хорошо согласуются между собой, образуя единую зависимость с максимумом $\Delta\lambda_B$ при определённом значении $\Delta\lambda/(g\lambda^2)$. Последнее значение позволяет оценить зеемановское расщепление в пространственно неразрешимых структурах.

На рис. 5 показаны расщепления бисекторов двух линий, нормированных на фактор $g\lambda^2$ (Принимается, что длины волн примерно одинаковы). Поскольку в нашем случае имеется только две линии, а не около 10, как в работах [5, 6], то зависимость $\Delta\lambda_B$ против $\Delta\lambda/(g\lambda^2)$ не может быть достаточно убедительной и наглядной. Тем не менее, она позволяет приближённо оценить положение общего максимума расщепления как точку, где пересекаются зависимости $\Delta\lambda_B$ против $\Delta\lambda/(g\lambda^2)$ для обеих линий. Согласно рис. 5, эта точка пересечения соответствует абсциссе ≈ 110 мÅ. Учитывая, что нормировоч-

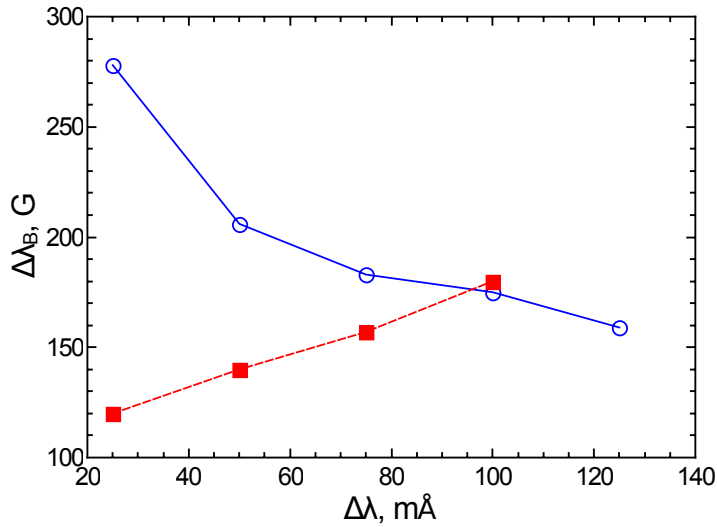


Рисунок 4: Расщепление бисекторов $\Delta\lambda_B$ в линиях FeI 6301.5 (сплошная синяя линия) и 6302.5 Å (штриховая красная линия) в зависимости от расстояния $\Delta\lambda$ от центров этих линий.

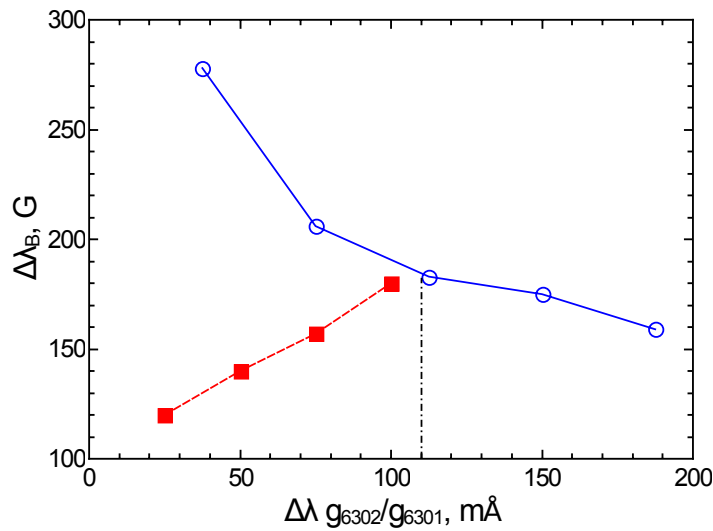


Рисунок 5: Зависимость расщепления бисекторов $\Delta\lambda_B$ в линиях FeI 6301.5 (сплошная синяя линия) и 6302.5 Å (штриховая красная линия) от ширины профиля, нормированного на фактор Ланде. Положение точки пересечения указано тонкой чёрной линией.

ный множитель 2.5 по оси абсцисс (где приведены значения $2.5\Delta\lambda/(g\lambda^2)$) эквивалентен приведению данных к линии Fe I 6302.5, у которой фактор Ланде $g = 2.5$, имеем $\Delta\lambda_H(6302.5) = 110$ мÅ. Это соответствует величине поля $B_{ft} = 2.3$ кГс.

Напомним, что Стенфло [11] получил для спокойных областей именно такое значение (2.3 кГс) для гауссоподобного бокового профиля поля. Лозицкий и Цап [7] получили для спокойных областей $B_{ft} = 2.2$ кГс. Однако в обеих названных работах использовался магнитографический метод и иная методика оценки истинных значений напряжённостей. Поэтому, указанное согласие результатов, полученных на разных ин-

струментах и различными методами, весьма обнадеживает и свидетельствует в пользу достоверности оценки $B_{ft} = 2.2\text{--}2.3$ кГс для силовых трубок во внепятенных и спокойных областях. Конечно, величина магнитного поля также должна зависеть от высоты в силовых трубках, а эта высота отличается на 50–70 км для линий FeI 5247.7–5250.2 и FeI 6301.5–6302.5.

В заключение отметим, что приведённая на рис. 4 картина расщепления бисекторов линий FeI 6301.5 и 6302.5 найдена нами несколько различной в разных диапазонах B_{eff} . В качественном отношении она одинакова в диапазоне $B_{\text{eff}} = 50\text{--}350$ Гс, но при $B_{\text{eff}} = 10\text{--}20$ Гс имеем другую тенденцию: обе линии, FeI 6301.5 и 6302.5 Å, показывают рост расщепления бисекторов $\Delta\lambda_B$ при увеличении расстояния $\Delta\lambda$ от центра линии. Такое поведение бисекторов не должно быть при слабом однородном поле с произвольной ориентацией силовых линий – тогда их расщепление должно быть везде одинаковым по профилю линии. В рамках двухкомпонентной модели с силовыми трубками и фоновым полем, подобный эффект может возникнуть при отрицательном высотном градиенте магнитного поля в силовых трубках или же при значительном изменении (по сравнению со случаем $B_{ft} = 2.2\text{--}2.3$ кГс) напряжённостей в силовых трубках. Этот вопрос требует тщательного изучения в отдельной работе.

Благодарности

Телескоп Hinode – японский проект, разработанный и запущенный ISAS/JAXA, в сотрудничестве с NAOJ (Япония), NASA (США) и STFC (Великобритания). Телескоп управляется данными организациями, а также ESA и NSC (Норвегия). Данное исследование финансировалось Киевским национальным университетом имени Тараса Шевченко, тема № 11БФ023-02.

Список литературы

- [1] Domínguez Cerdeña D., Sánchez Almeida J., Kneer F., A&A, **407**, 741 (2003).
- [2] Gopasyuk S.I., Kotov V.A., Severny A.B., Tsap T.T., Sol. Phys., **31**, № 2, 307 (1973).
- [3] Gordovskyy M., Lozitsky V.G., Sol. Phys., **289**, № 10, 3681 (2014).
- [4] Lozitsky V.G., Adv. in Space Research, **55**, 958 (2015)
- [5] Lozitsky V.G., Kinematika i Fizika Neb. Tel, **2**, № 1, 28 (1986).
- [6] Lozitsky V.G., Phys. Solariterr., Potsdam, **14**, 88 (1980).
- [7] Lozitsky V.G., Tsap, T.T., Kinematika i Fizika Neb. Tel, **5**, № 1, 50 (1989).
- [8] Rachkovsky D.N., Tsap T.T., and Lozitsky V.G., J. Astrophys. Astron., **26**, № 4, 435 (2005).
- [9] Socas-Navarro H., Borrero J.M., Asensio Ramos A., et al., ApJ **674**, 596 (2008).
- [10] Stenflo, J.O., Astron. Astrophys. Rev., **1**, 3 (1989).
- [11] Stenflo, J.O., Sol. Phys., **32**, 41 (1973).

[12] Tsuneta S., Ichimoto K., Tatsukawa Y., et al., *Sol. Phys.*, **249**, № 2, 167 (2008).

[13] Wiehr E., *A&A*, **69**, № 2, 279 (1978).

SMALL-SCALE MAGNETIC FIELD DIAGNOSTICS OUTSIDE SUNSPOTS USING SOT/HINODE OBSERVATIONS

V.Loizitskyy¹, O.Botygina¹, and M.Gordovskyy²

¹*Astronomical Observatory,
Taras Shevchenko Kyiv National University,
Observatorna str., 3, Kyiv 04053, Ukraine
lozitsky@observ.univ.kiev.ua, olga.botygina@gmail.com*

²*Jodrell Bank Centre for Astrophysics,
University of Manchester, Manchester M13 9PL, United Kingdom
mykola.gordovskyy@manchester.ac.uk*

Received November 17, 2015

After revision April 6, 2016

Abstract. We analyze the structure of photospheric magnetic fields in three active regions based on Zeeman splitting of FeI 6301.5 Å and 6302.5 Å lines. Stokes components I and V are obtained with the SOT/Hinode telescope. Areas with observed magnetic fields 5–300 G outside sunspots are investigated. The spatial resolution is about 300 km. It is found that the splitting of these two lines corresponds to different values of B_{eff} , typical ratio of $B_{\text{eff}}(6301.5)/B_{\text{eff}}(6302.5)$ is about 1.3. In addition, we find that the bisectors of $I + V$ and $I - V$ components of these lines (showing Zeeman splitting of different parts of a line) are substantially different. These data indicate that the magnetic field in these active regions is formed by elements with a field strength of 1.3–2 kG with small filling factor, surrounded by the ambient field with a strength of about 10–100 G.