

Определение градиента магнитного поля над солнечными пятнами по наблюдениям в ИК-линиях HeI и FeI

Л. М. Козлова^a, Б. В. Сомов^b

Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ).

Россия, 119991, Москва, Университетский проспект, д. 13.

E-mail: ^akozlova-lm@yandex.ru, ^bsomov@sai.msu.ru

Статья поступила 30.03.2009, подписана в печать 28.05.2009.

Исследованы напряженности магнитного поля над 36 пятнами по спектрам магниточувствительных линий HeI $\lambda = 1083.030$ нм и FeI 1082.837 нм. Величина поля определялась непосредственно по зеемановскому расщеплению линий. Преимуществом наблюдений является то, что: 1) в ИК-области зеемановское расщепление в несколько раз превосходит аналогичное расщепление в видимой области; 2) обе исследуемые линии расположены на одном спектре в непосредственной близости друг от друга; 3) инструментальное рассеяние в ИК-области ниже; 4) измерения ведутся вблизи истинного континуума интенсивности между спектральными линиями. Зависимость между напряженностью магнитного поля и остаточной интенсивностью в обеих спектральных линиях имеет нелинейный характер. Градиент магнитного поля над пятном на высотах от фотосферы до верхней хромосферы изменяется в пределах $0.1 \div 0.7$ Гс/км для всех исследуемых пятен.

Ключевые слова: Солнце, активные области, солнечные пятна, магнитные поля.

УДК: 523.94; 523.98. PACS: 96.60.qd.

Введение

Происхождение и существование солнечных пятен связано с подфотосферными магнитными полями, которые генерируются механизмом солнечного динамо. Наблюдения фраунгоферовых линий, формирующихся в хромосфере [1–6], указывают на то, что солнечные пятна сохраняются как компактные образования с сильными магнитными полями в хромосфере до высот в несколько тысяч км. Сравнивая значения магнитного поля, определяемые по зеемановскому расщеплению линий поглощения, образующихся на разных оптических глубинах и соответственно на разных высотах, можно оценить величину вертикального градиента поля над тенью и полутенью пятен. В настоящей работе мы изучаем изменение магнитных полей над пятнами от фотосферы через всю хромосферу к переходному слою от хромосферы к короне.

Работы по изучению магнитного поля солнечных пятен содержат прежде всего попытки определения хода изменения напряженности поля по поверхности пятна. Многие авторы [1, 2, 7–11] изучали градиент поля в хромосфере над пятном, но оценили его довольно неопределенно. Надежное определение значения вертикального градиента магнитного поля пятен необходимо для понимания степени проникновения линий магнитного поля в хромосферу и корону и других физических характеристик.

Цель настоящей работы — детальное исследование связи напряженности магнитного поля и интенсивности излучения в ИК-линиях HeI и FeI в атмосфере над солнечными пятнами. Чтобы оценить градиент поля, мы исследовали его изменение с высотой для 36 пятен разной величины и конфигурации.

Наблюдения

Наблюдения в окрестности ИК-триплета HeI 1083.0 нм регулярно проводились нами с 1976 г. [3–6,

12, 13] на горизонтальном солнечном телескопе Кучинской астрофизической обсерватории ГАИШ МГУ под Москвой. Параметры установки: диаметр главного зеркала 30 см, фокусное расстояние 15 м, диаметр изображения Солнца в плоскости входной щели спектрографа 140 мм, дисперсия на выходной щели в 1-м порядке дифракционной решетки ≈ 0.1 нм/мм. Наблюдения пятен в ИК-триплете HeI проводились во 2-м и 3-м порядках решетки, дисперсия на записях 0.004–0.007 нм/мм. Размеры обеих щелей спектрографа порядка $(0.1\text{--}0.2) \times (1.0\text{--}2.0)$ мм. Отношение сигнал/шум на записях при хороших погодных условиях не меньше 100. Ошибки отдельных измерений глубин и ширин спектральных линий не превосходят 1.0–1.5%. Подробно солнечный Кучинский телескоп и методика наблюдений описаны в [12, 13].

В изучении физических параметров в солнечных пятнах есть несколько проблем. Во-первых, магнитное поле в пятне не всегда бывает достаточно сильным, чтобы вызвать заметное зеемановское расщепление (например, в малых пятнах и порах, а также в полутени пятна). Во-вторых, при измерении остаточной интенсивности в линиях необходимо учитывать изменения интенсивности непрерывного спектра от гелиоцентрического угла как в спокойной атмосфере, так и в пятнах [3]. В-третьих, пятна сильно отличаются своими размерами, формой, а также тонкой структурой тени и полутени [1]. В-четвертых, необходимо учитывать блендинирование исследуемых линий HeI и FeI соседними линиями, как солнечными, так и теллурическими, зависящими от состояния земной атмосферы во время наблюдений. Необходимо также учитывать рассеянный свет и искажения из-за дрожания изображения.

Наблюдения в ИК-области смягчают часть из этих проблем. Так как зеемановское расщепление пропорционально квадрату длины волны наблюдаемой линии, то наши наблюдения в области $\lambda \approx 1083.0$ нм обеспечива-

вают увеличение чувствительности (величины зеемановского расщепления) почти в 4 раза по сравнению с чувствительностью в видимой области спектра на $\lambda \approx 500$ нм. Искажения по лучу зрения также меньше в ИК-области, чем в видимой, по двум причинам: а) инструментальное рассеяние обычно ниже в ИК-области и б) эффект потемнения от центра к краю диска в ИК-области ниже, поэтому при учете континуума погрешности меньше [1]. К тому же ИК-измерения можно вести вблизи истинного континуума интенсивности между спектральными линиями и, таким образом, получать прямые оценки температур [3].

Преимуществом наших наблюдений также является то, что на небольшом участке спектра мы регистрируем сразу две магниточувствительные линии: хромосферную линию HeI $\lambda = 1083.030$ нм и фотосферную — FeI $\lambda = 1082.837$ нм. Это позволяет получить более точную оценку для градиента поля над пятном на соответствующих высотах.

Третья из упомянутых выше проблем в наблюдениях солнечных пятен, связанная с различием формы, размеров и внутренних структур, решалась нами путем усреднения излучения, поступающего на щель спектрографа. А именно входная щель устанавливалась всегда по центру пятна и имела высоту, равную диаметру тени пятна или тени с полутенью, в зависимости от цели исследования. Ширина щелей выбиралась $\sim 1-2''$, чтобы уменьшить искажающее влияние дрожания изображения, особенно при размерах тени пятна менее $10''$.

Линия HeI $\lambda = 1083.030$ нм с фактором Ланде $g = 1.67$ представляет собой триплет, формирующийся в верхней хромосфере и переходном слое между хромосферой и короной на высотах $\sim 1700-2000$ км над основанием фотосферы. Анализ пространственных и временных изменений параметров линии позволяет получить достоверную информацию о строении, динамике и тонкой структуре этих слоев солнечной атмосферы [3-6, 12, 13]. В настоящей работе мы используем наблюдения в этой линии для измерений магнитных полей над пятнами.

На рис. 1, а представлен спектр 1, полученный 01.09.1997 г. в тени большого ведущего пятна в активной области 8076 NOAA с координатами N24W14 [14]. Диаметр изображения тени пятна ~ 1.5 мм, что соответствует площади ~ 115 мдп. Спектр 2 на рис. 1, б получен над факельным полем вблизи пятна, а спектр 3 — в спокойной хромосфере на том же гелиоцентрическом расстоянии, что и пятно. Как видно из рис. 1, в записанной области спектра имеется несколько линий, усиленных в пятне. Поскольку мы хотели получить оценки градиента поля над пятном на возможно большем диапазоне высот, то второй исследуемой линией на этом спектре мы выбрали линию FeI $\lambda = 1082.837$ нм, образующуюся в фотосфере на высоте ~ 100 км [7, 15].

Для уменьшения эффектов проекции и исключения искажающего влияния эффекта Вильсона, особенно существенного на краю диска, мы отбирали только пятна вблизи центра диска на расстояниях не более $\pm 30^\circ$ от центрального меридиана. При этом учитывалась зависимость остаточных интенсивностей в линиях HeI и FeI от гелиоцентрического угла.

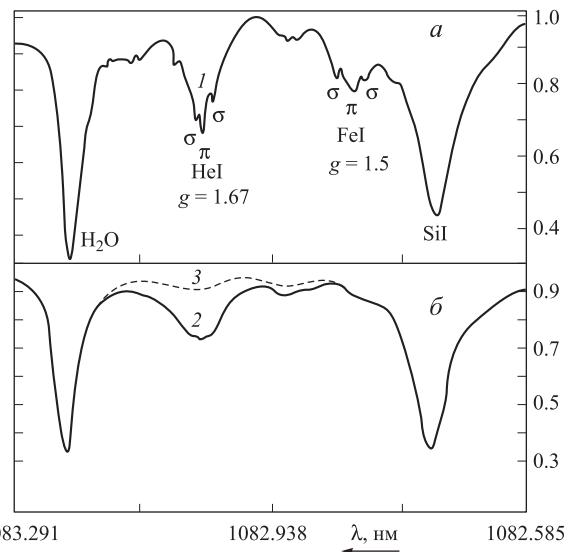


Рис. 1. Спектр 1 в окрестности ИК-линии HeI 1083.0 нм, записанный в тени пятна 01.09.1997 г. (а), спектр 2 — в факельной области около пятна и спектр 3 — в спокойной атмосфере на том же гелиоцентрическом расстоянии, что и пятно (а)

Учитывалось также искажающее влияние на измеряемые интенсивности линий рассеянного света в спектрографе. Рассеянный свет измерялся по теллурическим линиям полного поглощения O₂ вблизи $\lambda = 760.0$ нм. Его значение обычно не превышало 1–1.5% интенсивности непрерывного спектра в исследуемой спектральной области.

Учет блендингования

Отметим, что линия HeI, две сильные компоненты которой сливаются в одну линию (рис. 1) с центром в $\lambda = 1083.030$ нм, имеет слабую бленду паров воды земной атмосферы с $\lambda = 1083.034$ нм. Ее необходимо учитывать при точных измерениях [16, 17]. Для определения внеатмосферного значения глубины линии HeI 1083.0 нм нами исследовалась зависимость глубин блендинированной линии HeI от глубин реперных линий воды земной атмосферы, наблюдавшихся рядом с линией гелия на тех же фотоэлектрических записях на $\lambda = 1083.212$ нм и $\lambda = 1083.402$ нм. Эти зависимости получались для различных воздушных масс земной атмосферы. Наблюдения для малых воздушных масс были получены ранее в горных условиях на высоте 2700 км на Алма-Атинской обсерватории ГАИШ [16]. По нашим оценкам, среднее значение искомой бленды воды, искажающей глубину линии HeI, равно 0.026 ± 0.002 от глубины реперной линии воды, наблюданной на $\lambda = 1083.212$ нм.

Целью нашей работы было определение градиента магнитного поля над пятнами в отсутствие вспышек. Как показано в [18], быстрые изменения поля, связанные со вспышками, наблюдаются в интервале 1–3 ч, т. е. поле обладает способностью восстанавливаться спустя приблизительно 3 ч после кратковременных возмущений разной природы. Поэтому были отобраны около 40 солнечных пятен разной величины, в окрестности которых не наблюдались какие-либо вспышки в течение 3 ч до начала записи спектров.

Результаты наблюдений

Профили линий HeI и FeI над пятном (рис. 1, а) показывают четкое зеемановское расщепление на π - и σ -компоненты магнитного поля. Измеряя расстояние между компонентами $\Delta\lambda_H$, получаем непосредственную оценку величины напряженности магнитного поля H по формуле

$$\Delta\lambda_H = 4.67 \cdot 10^{-13} gH\lambda_0^2. \quad (1)$$

Здесь g — фактор Ланде исходного и конечного состояний линий, H — напряженность поля в гауссах, длины волн — в Å.

Спектральное разрешение в наших наблюдениях в 3-м порядке дифракционной решетки $\sim 2 \cdot 10^5$, профили линий однозначно описываются функцией Гаусса. После учета бленд как солнечного происхождения, так и теллурических производилась непосредственная оценка величины зеемановского расщепления. Поскольку некоторые пятна имеют небольшую асимметрию между π - и σ -компонентами до ± 100 Гс из-за возможных искажений π -компонент и недостаточного деблендингования, то за зеемановское расщепление принималась $1/2$ расщепления σ -компонент. Положение компонент оценивалось с точностью до ± 20 Гс. Неопределенность в измерении остаточной (по отношению к локальному континууму) интенсивности около ± 0.01 для всех значений интенсивности. Расщепление во второй соседней линии FeI с $g = 1.50$ на $\lambda = 1082.837$ нм использовалось для измерения магнитного поля в фотосфере. Для калибровки и определения λ и $\Delta\lambda_H$, а также для оценки бленды H_2O в линии HeI использовались линии земной атмосферы, наблюдавшиеся на этих же спектрах в $\lambda = 1083.214$ и 1083.402 нм.

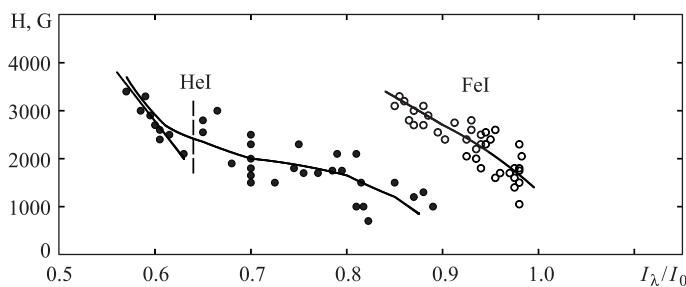


Рис. 2. Зависимости напряженности магнитного поля H от остаточной интенсивности I_λ/I_0 для 36 солнечных пятен, полученные в линиях FeI $\lambda = 1082.837$ нм и HeI $\lambda = 1083.030$ нм

Полученные результаты иллюстрирует рис. 2. Зависимость между напряженностью поля и остаточной интенсивностью для обеих исследуемых линий имеет явно нелинейный характер с коэффициентами линейной корреляции: $R(\text{HeI}) = -0.85$ и $R(\text{FeI}) = -0.83$. Зависимость $H = f(I_\lambda/I_0)$ для линии HeI можно разделить на две части: линейную и нелинейную. В линейной части с $H \geq 2000$ Гс (в тени больших пятен — это 9 точек в левой части рис. 2) наблюдается резкое снижение магнитного поля, и коэффициент линейной корреляции возрастает до значения $R(\text{HeI}) = -0.95$. В области средних и слабых магнитных полей наблюдаются постепенные нелинейные изменения поля

для большой области изменения интенсивностей. Кроме того, в этой области наблюдается увеличение рассеяния точек; здесь $R(\text{HeI}) = -0.63$.

Подобная нелинейная форма зависимости с присущим ей увеличенным рассеянием точек с очевидностью имеет место на рис. 3 и 4, полученных в [7] для 6-ти солнечных пятен, наблюдавшихся в линии FeI $\lambda = 1564.9$ нм. Однако в [11] по поверхности одного круглого униполярного пятна, наблюдавшегося в зеемановском триплете линии FeI $\lambda = 630.25$ нм, обнаружена линейная связь между остаточной интенсивностью и величиной магнитного поля, что находится в соответствии с условиями магнитогидростатического равновесия вблизи вертикального магнитного поля [7, 11].

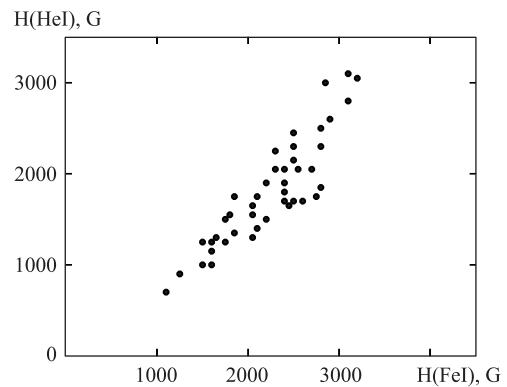


Рис. 3. Корреляция фотосферных (в линии FeI) и хромосферных (в линии HeI) магнитных полей

На рис. 3 представлена зависимость между величинами напряженности магнитного поля, измеренными нами. Видна хорошая корреляция магнитных полей в фотосфере и хромосфере ($R = 0.92$). Некоторый разброс точек, вероятно, в данном случае объясняется в основном как результат искривления линий магнитного поля на разных уровнях солнечной атмосферы. Тем не менее столь высокое значение коэффициента корреляции, полученное по измерениям большого количества различных пятен, показывает, что в пятнах существует тесная связь между напряженностями поля на обоих столь удаленных друг от друга уровнях в солнечной атмосфере.

Градиент магнитного поля между фотосферой (на высоте $h \approx 100$ км) и верхней хромосферой ($h \approx 1850$ км) определялся нами отдельно для каждого спектра по линиям FeI и HeI и варьировал по спектрам в пределах $(0.1 \div 0.7)$ Гс/км. Среднее значение градиента, полученное по спектрам 36-ти пятен, равно (0.35 ± 0.05) Гс/км.

Обсуждение и выводы

Для исследования были отобраны 36 пятен различной величины в отсутствие вспышек. Наблюдательный материал охватывал период с 1991 по 1996 г. Рис. 2 иллюстрирует один из главных результатов — существование нелинейной связи между напряженностью магнитного поля и остаточной интенсивностью. Эта связь нелинейна в обеих ИК-линиях, одна из которых (FeI) характеризует фотосферу, а вторая (HeI) — верхнюю хромосферу. Найденную зависимость можно

разделить на два сегмента: сильные изменения поля с интенсивностью для $H > 2000$ Гс и постепенные, более слабые изменения поля (при $H < 2000$ Гс) для большой области изменения интенсивности. Вертикальная штриховая линия на рис. 2 разделяет эти две области. Вторая область характеризуется большим рассеянием точек, чем первая.

Преимущества наших ИК-наблюдений описаны выше. Важно также то, что мы наблюдаем одновременно на одном и том же небольшом участке спектра сразу обе исследуемых линии. Это уменьшает ошибки регистрации спектров, учета блендингования, а также рассеянного света и дрожания изображения.

Качественная интерпретация различий связей между полем H и интенсивностью I_λ/I_0 для больших и малых полей, очевидно, состоит в том, что в области больших полей (в тени больших пятен) линии магнитного поля преимущественно вертикальны и лучше выполняются условия магнитогидростатического равновесия. Это и обуславливает почти линейную связь поля и интенсивности в левой части рис. 2. В правой части рис. 2 для средних и малых пятен наблюдается уменьшение изменений H с интенсивностью и большая нелинейность этих изменений, что, по-видимому, объясняется наличием горизонтальной составляющей поля в области тень-полутень. Здесь хуже выполняются условия статического равновесия и наблюдаются значительные отклонения от чисто линейной связи между H и остаточной интенсивностью I_λ/I_0 .

Большее рассеяние точек в правой части зависимости H от I_λ/I_0 может быть вызвано пространственно неразрешимыми неоднородностями, особенно существенными в области тень-полутень пятна. Наблюдения с высоким пространственным разрешением (см. [19]) указывают на то, что магнитное поле существенно слабее, например, в ярких волоконцах полутени, чем в темных волоконцах. Это, возможно, также одна из причин нелинейной зависимости $H = f(I_\lambda/I_0)$. Тени пятен — более однородные структуры, хотя и здесь наблюдается некоторое отклонение от линейности. Оно может быть вызвано присутствием в тени пятна ярких, неразрешаемых немагнитных областей (ярких точек), которые дают π -компоненты в наблюдаемых спектрах, но не дают эффективных значений σ -компонент.

Аналогичная нелинейная связь $H = f(I_\lambda/I_0)$ получена в [7] отдельно для каждого из 6 наблюдаемых там пятен. Тот факт, что мы получили примерно такую

же связь по спектрам 36 различных пятен, говорит о том, что эта связь имеет фундаментальное значение. Как мы полагаем, она отражает реальную физическую зависимость между величиной магнитного поля и температурой в пятне, что будет предметом наших исследований в дальнейшем.

Сравнение значений магнитного поля, полученных в линиях HeI и FeI, позволило нам получить оценку градиента поля на диапазоне высот от фотосферы до верхней хромосферы. Среднее значение градиента поля над пятном на высотах фотосферы — верхней хромосферы равно 0.35 ± 0.05 Гс/км. Это второй важный результат наших исследований.

Список литературы

1. Брей Р., Лоухед Р. Солнечные пятна. М., 1967.
2. Бумба В. // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 1960. **23**. С. 212.
3. Сомов Б.В., Козлова Л.М. // Астрон. журн. 1998. **75**. С. 926.
4. Козлова Л.М., Сомов Б.В. // Астрон. журн. 2000. **77**. С. 460.
5. Козлова Л.М., Сомов Б.В. // Известия РАН. Сер. физ. 2003. **67**. С. 390.
6. Козлова Л.М., Сомов Б.В. // Известия РАН. Сер. физ. 2006. **70**. С. 72.
7. Kopp G., Rabin D. // Solar Phys. 1992. **141**. P. 253.
8. Beckers J.M., Schroter E.H. // Solar Phys. 1969. **10**. P. 384.
9. Wittmann A. // Solar Phys. 1974. **36**. P. 29.
10. Osherovitch V.A. // Solar Phys. 1980. **68**. P. 297.
11. Gurman J.B., Lewis L., House L.L. // Solar Phys. 1981. **71**. P. 5.
12. Козлова Л.М., Сомов Б.В. // Астрон. журн. 1998. **75**. С. 598.
13. Козлова Л.М. // Труды ГАИШ. 2001. **71**. С. 199.
14. Solar Geophys. Data. 1997. N 626, 627.
15. Swensson J.W., Benedict W.S., Delbouille L. et al. The solar spectrum from λ 7498 to λ 12016. A table of measures and identification. Belgique, 1970.
16. Ситник Г.Ф., Козлова Л.М., Давлекеев М.И. // Астрон. журн. 1988. **65**. С. 1283.
17. Breckinridge J.B., Hall D.N.B. // Solar Phys. 1973. **28**. P. 15.
18. Чумак О.В., Цанг Х.-К., Гуо Ж. // Астрон. журн. 2008. **85**. С. 946.
19. Lites B.W., Scharmer G.B., Skumanich A. // Astrophys. J. 1990. **355**. P. 329.

Determination of the gradient magnetic field above a sunspot based on observations in the infrared lines HeI and FeI

L. M. Kozlova^a, B. V. Somov^b

Sternberg State Institute of Astronomy, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.
E-mail: ^akozlova-lm@yandex.ru, ^bsomov@sai.msu.ru.

The magnetic field strengths above the 36 sunspots have been studied based on the spectra of magnetosensitive lines HeI $\lambda = 1083.030$ nm and FeI $\lambda = 1082.837$ nm. The value of field strength was determined directly by Zeeman splitting of lines. The advantage of our observations are as follows: (a) in the IR region, the Zeeman splitting is several times larger than a similar splitting observed in the visible region, (b) both investigated lines are located in the same spectrum in a close vicinity of each other, (c) the instrumental scattering in the IR region is relatively small, (d) the measurements are conducted near the true continuum of intensity in both spectral lines is nonlinear. The gradient magnetic field over a sunspot on the heights of the photosphere to the upper chromosphere varies within 0.1–0.7 G/km for all investigated spots.

Keywords: Sun, the active region, sunspots, magnetic fields.

PACS: 96.60.qd.

Received 30 March 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2009).

Сведения об авторах

1. Козлова Людмила Матвеевна — науч. сотр.; тел.: (495) 522-02-14, e-mail:kozlova-lm@yandex.ru.
2. Сомов Борис Всеволодович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел. 939-16-44.