

УДК 523.98

О. С. Гопасюк

Крымская астрофизическая обсерватория
98409, п. Научный, Крым, Украина

Изменение с высотой магнитного поля в тени солнечных пятен

Исследована структура магнитного поля в тени четырех одиночных пятен. Используются наблюдения продольного магнитного поля и яркости в линии Fe I λ 525.3 нм на двойном магнитографе Крымской астрофизической обсерватории. Восстановлены все три составляющие вектора магнитного поля в тени пятна по полю его продольной составляющей. Значения вертикального градиента магнитного поля и угла расхождения силовых линий магнитного поля в центральной части тени пятна составили 0.03 мТл/км и 29°. Показано, что величина угла расхождения силовых линий поля должна всегда соответствовать величине вертикального градиента поля. Приводится краткое обсуждение этого обстоятельства.

ЗМІНА З ВИСОТОЮ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ТІНІ СОНЯЧНИХ ПЛЯМ, Гопасюк О. С. — Досліджено структуру магнітного поля в тіні чотирьох одиночних плям. Використано спостереження поздовжнього магнітного поля та яскравості в лінії Fe I λ 525.3 нм на подвійному магнітографі Кримської астрофізичної обсерваторії. Відновлено всі три складові вектора магнітного поля в тіні плями по полю його поздовжньої складової. Значення вертикального градієнта магнітного поля і кута розходження силових ліній магнітного поля в центральній частині тіні плями склали 0.03 мТл/км і 29°. Показано, що величина кута розходження силових ліній поля повинна завжди відповідати величині вертикального градієнта поля. Приводиться коротке обговорення цієї обставини.

HEIGHT VARIATION OF THE MAGNETIC FIELD IN SUNSPOT UMBRAE, by Gopasyuk O. S. — We present the results of investigations of the magnetic field structure in four regularly shaped sunspots. The longitudinal magnetic fields and brightness were measured in the line Fe I λ 525.3 nm by means of the double magnetograph of the Crimean Astrophysical Observatory. All three components of the magnetic field vector were reconstructed from the line-of-sight component. The vertical gradient of the magnetic field and beam angle of the magnetic field lines were calculated. Their values were 0.03 mT/km and 29°, respectively. The inference was derived that the beam angle of the magnetic lines and the vertical gradient of the magnetic field must always correspond to each other. Conclusions which follow from this result are briefly discussed.

Для создания модели солнечного пятна необходимы данные о структуре его магнитного поля, в первую очередь о его вертикальном градиенте, который определяет скорость изменения напряженности поля с высотой.

Вертикальный градиент магнитного поля пятен обычно определяется двумя способами:

1) из наблюдений по фотосферным линиям вектора поперечного магнитного поля H_{\perp} с использованием условия [15]

$$\operatorname{div} H = 0. \quad (1)$$

Этот метод не требует знания высот образования линий. Усредненные по азимуту значения градиента, найденные многими исследователями этим методом, довольно неплохо согласуются между собой и составляют 0.06—0.07 мТл/км [24];

2) из одновременных поляризационных наблюдений спектральных линий различной силы. Наблюдения поля в линиях, образующихся в фотосфере, дают сильно различающиеся значения градиентов — от нескольких сотых мТл/км [21] до нескольких десятых мТл/км [8, 22, 24].

Основная причина расхождений значений градиентов, как считалось, заключается в том, какая взята модель пятна — разреженная или плотная. Разность высот образования двух конкретных линий существенно больше в разреженной модели.

Вычисленные разными исследователями значения градиентов поля в пятнах по наблюдениям фотосферных и хромосферных линий, где разность высот образования линий большая, сопоставимы: 0.05 мТл/км по измерениям в линиях H и K Ca II [2], 0.05—0.08 мТл/км по линии H_{α} [1, 16] и 0.1—0.12 мТл/км по линии H_{β} [3].

В работах [19, 20] по измерениям продольной составляющей поля в линии C IV λ 154.8 нм (переходная область хромосфера — корона) на SMM и одновременным наблюдениям в Fe I λ 525.0 нм полного вектора магнитного поля в пятне у центра солнечного диска вертикальные градиенты поля определялись тремя методами:

1) непосредственно по продольной составляющей на обоих уровнях при разности высот в 2000 км. Разность высот взята на основании расчетов высоты образования линии C IV λ 154.8 нм;

2) по наблюдаемому поперечному полю в фотосфере и условию (1);

3) по потенциальному полю, которое было вычислено по продольной составляющей фотосферного поля, взятого в качестве граничного условия.

Средняя величина вертикального градиента поля в пятне составила примерно 0.02 мТл/км. При этом оказалась, что разность высот по магнитному полю равна 4000—6000 км вместо 2000 км, как это следует из вычислений профиля линии по интенсивности.

Большие различия величин градиентов поля, полученных в разных исследованиях и разными методами, не являются случайными. Для вычисления градиентов магнитного поля из наблюдений в различных линиях необходимо знать высоты формирования этих линий с хорошей точностью. При этом надо иметь в виду, что глубины формирования σ -компонентов отличаются от высот образования π -компонентов. Наши знания тонкой структуры пятна недостаточны для того, чтобы в рамках теории лучистого переноса вычислить с нужной точностью высоты формирования линий. Может быть и ряд других причин, которые приводят к столь серьезным различиям градиентов. Выяснение этих причин важно для понимания структуры магнитного поля в пятнах. Для того чтобы выяснить их, необходимы вычисления вертикальных градиентов магнитного поля разны-

ми методами. Кроме того, мы хотим использовать связь вертикального градиента поля с углом расхождения силовых линий, на которую ранее не обращалось внимание.

НАБЛЮДЕНИЯ

Материал наблюдений получен на двойном магнитографе [12] Башенного солнечного телескопа КраО. Продольные магнитные поля и яркости в одиночных пятнах измерялись в линии Fe I λ 525.3 нм, которая имеет простое магнитное расщепление с фактором Ланде $g = 1.5$. Ее эквивалентная ширина в центре солнечного диска составляет $W = 7.5$ пм. Потенциал возбуждения нижнего уровня этой линии равен 3.28 эВ [23]. Она слабо чувствительна к температуре; в пятне несколько усилена [23]. При регистрации магнитного поля входные щели фотометра пропускали свет в интервале от 3.5 до 9.0 пм от центра линии и в пределах ± 3.5 пм от центра линии при регистрации яркости в центре линии. Величина магнитного поля, при котором происходил сдвиг центра σ -компонентов на середину щелей фотометра, соответствовала напряженности 323.8 мТл.

Размеры входной щели спектрографа составляли $1'' \times 2''$. Сканирование изображения Солнца относительно щели спектрографа осуществлялось с помощью фотогида [7] вдоль суточной параллели со скоростью 2.23"/с. Постоянная времени магнитографа была близка к 1 с. Расстояние между центрами соседних сканов составляло 2.67".

Проведено 42 серии наблюдений в четырех одиночных пятнах на разных расстояниях от центрального меридиана. Данные о положении пятен (долгота L и широта φ) для средних моментов времени каждой серии наблюдений приведены в работе [6, табл. 1].

За период наблюдений размеры пятен практически не изменялись. У пятна, широта которого $\varphi = 16^\circ\text{N}$, размер центральной зоны (выделение зоны в тени пятна по яркости описано ниже) уменьшился с 20" (13.09.78 г.) до 15" (18.09.78 г.). Размер центральной зоны в пятне с $\varphi = 28^\circ\text{N}$ сначала несколько увеличился с 19" (15.09.78 г.) до 24" (18.09.78 г.), а потом уменьшился до 20" (22.09.78 г.). Пятно с $\varphi = 37^\circ\text{N}$ было наименьшего размера, который практически не изменялся и соответствовал в среднем 11". У пятна с $\varphi = 13^\circ\text{S}$ размер центральной зоны тени составлял 22" (22.09.78 г.).

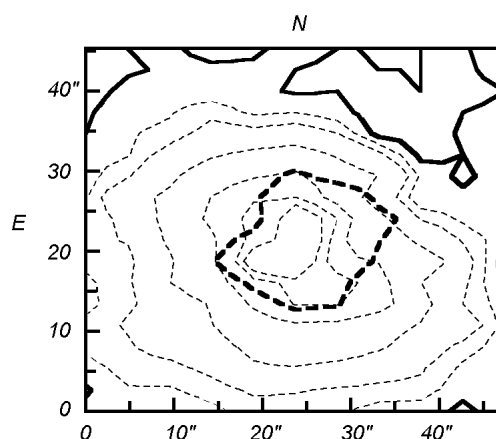
ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ГРАДИЕНТ ПОЛЯ

Распределение магнитного поля в одиночных пятнах наиболее близко соответствует случаю осевой симметрии. На рис. 1 представлен фрагмент карты продольного магнитного поля в одиночном пятне. Во все дни наблюдений линия смены знака продольной составляющей магнитного поля находилась за пределами тени пятна.

По каждой карте яркости I была выделена центральная зона тени пятна с $I \leq 0.5$ (I выражена в единицах яркости невозмущенного фона). Для восстановления всех трех составляющих вектора поля по полю его продольной составляющей был использован метод, изложенный в работе [6]. Три составляющие, усредненные по площади зоны: вертикальная H_z , радиальная H_r — вдоль радиуса пятна и азимутальная H_ω , даются выражениями [6]

$$\overline{H_z} = \frac{1}{\cos\Theta} \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_{\text{lin}}, \quad (2)$$

Рис. 1. Фрагмент карты продольного магнитного поля (Fe I λ 525.3 нм) в одиночном пятне 16.09.78 г. ($L = 24^\circ\text{W}$; $\varphi = 16^\circ\text{N}$). Сплошные жирные линии разделяют области противоположных полярностей. Изолинии проведены через 10, 50, 100, 150, 200, 250 мТл штриховыми линиями для N-полярности. Жирными штриховыми линиями нанесены границы зоны по яркости 0.5



$$\overline{H_r} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\sin\Theta} \cdot \frac{1}{N} \left(\sum_{n=1}^{N(1,4)} H_{\parallel n} - \sum_{n=1}^{N(2,3)} H_{\parallel n} \right), \quad (3)$$

$$\overline{H_\omega} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\sin\Theta} \cdot \frac{1}{N} \left(\sum_{n=1}^{N(3,4)} H_{\parallel n} - \sum_{n=1}^{N(1,2)} H_{\parallel n} \right), \quad (4)$$

где N — полное число точек, равномерно распределенных по площади выделенной зоны, $N(1, 4)$ — число точек, равномерно распределенных по площади выделенной зоны в пределах первого и четвертого квадрантов (после поворота системы координат). $N(2, 3)$, $N(3, 4)$, $N(1, 2)$ имеют аналогичный смысл. На основании выражений (2)—(4) вычислены все три составляющие вектора поля. В тех случаях, когда в течение дня было проведено несколько серий измерений одного и того же пятна, брались средние из них значения составляющих вектора. Данные каждой составляющей мало отличались для этих четырех пятен. Поэтому все значения каждой составляющей всех пятен нанесены на одну зависимость от $\sin\Theta$ (рис. 2). По ним строилась линейная аппроксимация $y = A + C\sin\Theta$, что позволило привести величину каждой составляющей, усредненной по четырем пятнам, к положению пятна, наиболее близко расположенного к центру солнечного диска ($\sin\Theta = 0.2525$; таблица).

Таким же методом был усреднен и приведен к значению при $\sin\Theta = 0.2525$ и радиус r зоны, выделенный по яркости. Его значение также приведено в таблице.

По каждой серии наблюдений был вычислен модуль напряженности магнитного поля и проведено его сравнение с визуальными наблюдениями магнитного поля этих же пятен [14]. Средняя величина вычисленного нами модуля напряженности поля составила примерно 0.7 напряженности, измеренной визуально. Эти различия вполне допустимы, так как полученные нами значения напряженностей являются усредненными по довольно большой площади тени пятна, в то время как визуальные измерения дают максимальную величину напряженности в отдельной точке тени пятна.

Вычисленные значения модуля напряженности магнитного поля показали уменьшение его с переходом пятна от центра к краю солнечного диска. Полученные нами результаты хорошо согласуются с данными измерений напряженности поля по расщеплению магниточувствительных линий (Fe I λ 525.0 и 630.2 нм) в пятне [24].

На основании данных о всех трех составляющих вектора магнитного поля и условия (1) нами были вычислены средние по площади зоны

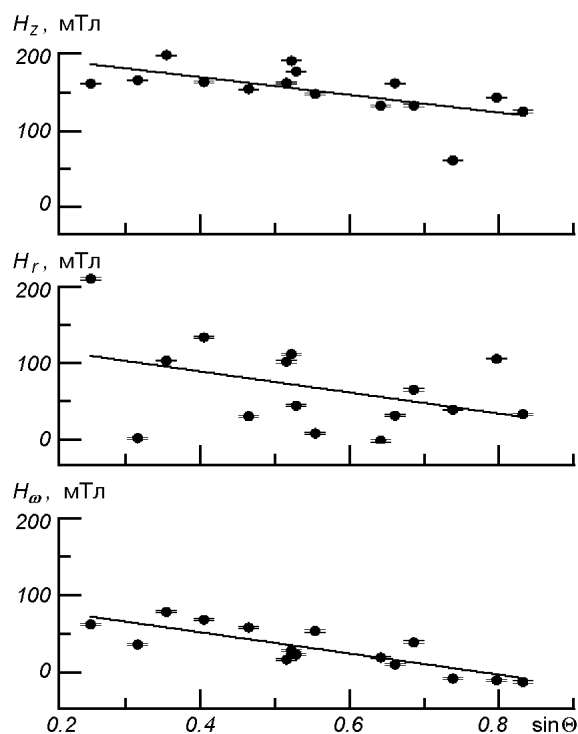


Рис. 2. Изменение с переходом от центра к краю солнечного диска средних по площади зоны вертикальной H_z , радиальной H_r и азимутальной H_ω составляющих вектора магнитного поля

Средние значения составляющих вектора магнитного поля и радиуса зоны

$\sin\theta$	H_r , мТл	H_ω , мТл	H_z , мТл	r , км
0.2525	109	72	187	7000

вертикальные градиенты поля в тени пятна в предположении осевой симметрии ($\partial/\partial\omega = 0$).

Выражение (1) в цилиндрической системе координат принимает вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rH_r) + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Интегрируя (5) по r в предположении, что в пределах зоны $\partial H_z/\partial z = \text{const}$, получаем выражение для вертикального градиента поля [4]:

$$\frac{\partial H_z}{\partial z} = -2 \frac{H_r}{r}, \quad (6)$$

где r — радиус центральной зоны пятна.

На основании выражения (6) и данных таблицы вычислен вертикальный градиент магнитного поля. Его значение составило 0.03 мТл/км, что близко к значениям градиентов, вычисленных на основе данных наблюдений полного вектора магнитного поля в пятнах [18, 19]. Однако оно меньше тех, которые были получены из наблюдений поперечного поля и условия (1) [5, 13]. Различие возможно, в частности, вследствие того, что разные пятна имеют различную закрученность силовых линий поля, от которой зависит величина вертикального градиента магнитного поля [18]: чем больше закрученность силовых линий поля пятна в фотосфере, тем меньше верти-

кальный градиент поля. Поскольку закрученность силовых линий магнитного поля у разных пятен различна, то не приходится ожидать одинаковых градиентов поля у всех пятен.

Наличие положительной радиальной составляющей в тени одиночных пятен (рис. 2) показывает, что силовые линии поля в тени пятна расходятся с высотой. Среднее по зоне значение угла, соответствующего расхождению силовых линий поля, можно определить из выражения [4]

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{H_r}{H_z}. \quad (7)$$

По данным таблицы находим $\gamma = 29^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Связь между градиентом поля и углом расхождения силовых линий непосредственно следует из (6), если в нем на основании (7) выразить H_r через модуль вектора поля $H = (H_z^2 + H_r^2)^{1/2}$:

$$\frac{\partial H_z}{\partial z} = -\frac{2H}{r} \sin \gamma. \quad (8)$$

Ранее эта связь не бралась во внимание. А из нее следует, что градиент поля 0.2 мТл/км при $r \approx 4000$ км невозможен, даже если H становится преимущественно поперечным. Наблюдения показывают, что в центре одиночных пятен, расположенных вблизи центра солнечного диска, магнитное поле в основном вертикальное. Напряженность поля в центре пятна по фотосферным линиям равна примерно 260 мТл. Примем, что поперечный размер области $2r \approx (6-8) \cdot 10^3$ км и $\gamma \leq 30^\circ$. Тогда на основании (8) находим, что $|\partial H_z / \partial z| \leq 0.074$ мТл/км. Если учесть, что вертикальный градиент поля тени пятна тем меньше, чем сильнее закручены его силовые линии в фотосфере [18], то вертикальный градиент поля не может превышать 0.07 мТл/км.

Большая величина вертикальных градиентов поля получается в тех случаях, когда данные наблюдений берутся по фотосферным линиям [11, 24]: разность между высотами образования этих линий мала, а напряженность поля по ним отличается значимо. Возможно, здесь более важным является эффект поверхностной неоднородности тени пятна [17] и магнитного поля, нежели эффект глубины, с которым связывается изменение поля. Неоднородность магнитного поля по поверхности тени пятна была установлена по наблюдениям в спектральных линиях с разной чувствительностью к температуре [9, 10, 13, 25]. Из сказанного следует, что контроль величины полученного вертикального градиента поля следует проводить по углу расхождения силовых линий.

Степень согласования этих двух величин может быть критерием в выборе модели тени пятна при расчетах глубин образования линий.

Таким образом:

1. По наблюдениям продольной составляющей магнитного поля в одиночных пятнах нами были восстановлены все три составляющие вектора магнитного поля.

2. По ним и условию $\operatorname{div} \mathbf{H} = 0$ для центральной зоны тени вычислены вертикальный градиент магнитного поля $\partial H_z / \partial z = 0.03$ мТл/км и угол расхождения силовых линий поля $\gamma = 29^\circ$.

3. Угол расхождения силовых линий поля всегда должен соответствовать величине вертикального градиента поля.

4. Степень согласования этих двух величин может быть критерием выбора модели тени пятна при расчетах глубин образования линий.

Приношу глубокую благодарность д-ру физ.-мат. наук С. И. Гопасюку за постоянное внимание к работе и Н. И. Райковой за частичную обработку данных наблюдений.

1. Абдусаматов Х. И. Структура магнитного поля пятна с фотосферным мостом на двух уровнях солнечной атмосферы // *Астрон. журн.*—1970.—47, вып. 1.—С. 82—90.
2. Бумба В. Результаты исследования магнитного поля одиночных солнечных пятен // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1960.—23.—С. 212—252.
3. Вьяльшин Г. Ф., Крат В. А. Магнитные поля в солнечной хромосфере // *Изв. Главной астроном. обсерватории в Пулкове.*—1965.—24, вып. 2, № 178.—С. 26—34.
4. Гопасюк О. С. Движения плазмы над тенью солнечного пятна вблизи уровня фотосфера—хромосфера. Структура магнитного поля // *Кинематика и физика небес. тел.*—2000.—16, № 3.—С. 230—240.
5. Гопасюк С. И. Структура и динамика магнитного поля в активных областях на Солнце // *ВИНИТИ, ИНТ Астрономия.*—34.—М.—1987.—С. 6—77.
6. Гопасюк С. И., Гопасюк О. С. Движения плазмы в магнитном поле солнечного пятна. I. Наблюдения по фотосферным линиям // *Кинематика и физика небес. тел.*—1998.—14, № 5.—С. 389—400.
7. Границкий Л. В., Границкая Л. А., Дидковский Л. В., Никулин Н. С. Система сбора и обработки информации на башенном солнечном телескопе Крымской астрофизической обсерватории // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1977.—56.—С. 181—188.
8. Гусейнов М. Дж. Вертикальное распределение напряженности магнитного поля в ядре солнечного пятна // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1970.—41—42.—С. 89—96.
9. Гусейнов М. Дж. О неоднородности магнитного поля в тени солнечных пятен // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1974.—49.—С. 15—24.
10. Гусейнов М. Дж. Изучение магнитных полей в тени солнечных пятен по фраунгоферовым линиям с различной чувствительностью к температуре // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1974.—50.—С. 168—174.
11. Гусейнов М. Дж. Об условиях равновесия полного давления пятна с давлением окружающей его фотосферы // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1983.—66.—С. 83—88.
12. Котов В. А., Северный А. Б., Цап Т. Т. Исследование глобальных колебаний Солнца: I. Метод и инструмент // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1982.—65.—С. 3—34.
13. Обридко В. Н. Солнечные пятна и комплексы активности. — М.: Наука.—1985.—255 с.
14. Солнечные данные.—1978.—N 9.
15. Северный А. Б. Исследование вращения магнитного поля с глубиной в атмосфере Солнца // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1965.—33.—С. 3—33.
16. Abdussamatov H. I. On the magnetic fields and motions in sunspots at different atmospheric levels // *Solar Phys.*—1971.—16, N 2.—P. 384—397.
17. Danielson R. E. The structure of sunspot penumbras. II // *Astrophys. J.*—1961.—134, N 2.—P. 289—311.
18. Gopasyuk S. I., Gopasyuk O. S., Tarasova T. N., Shakhovskaya A. N. Vertical gradients of the magnetic fields in active regions // *Solar Phys.*—1996.—168, N 1.—P. 65—74.
19. Hagyard M. J., Teuber D., West E. A., et al. Vertical gradients of sunspot magnetic fields // *Solar Phys.*—1983.—84, N 1/2.—P. 13—31.
20. Henze W., Tanberg-Hanssen E., Hagyard M. J., et al. Observations of the longitudinal magnetic field in the transition region and photosphere of a sunspot // *Solar Phys.*—1981.—81, N 2.—P. 231—244.
21. Kneer F. Profiles of magnetically split lines in sunspots // *Astron. and Astrophys.*—1972.—18, N 1.—P. 47—50.
22. Makita M., Nemoto K. Magnetic field gradient in sunspot umbra // *Publ. Astron. Soc. Jap.*—1976.—28, N 3.—P. 495—508.
23. Moore Ch. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J. The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å. — Washington, 1966.—349 p.
24. Wittmann A. Computation and observation of Zeeman multiplet polarization in Fraunhofer lines. III: Magnetic field structure of spot Mt. Wilson 18488 // *Solar Phys.*—1974.—36, N 1.—P. 29—44.
25. Zwaan C., Buurman J. Magnetic field strengths derived from various lines in the umbral spectrum // *IAU Symp. N 43 / Ed. R. Howard.* — Dordrecht—Holland: Reidel, 1971.—P. 220—222.

Поступила в редакцию 16.07.01