



ISSN 1607–2855

Том 8 • № 1 • 2012 С. 58 – 61

УДК 523.987

Сопоставление магнитных полей в спокойных протуберанцах, измеренных по линиям D_3 HeI и $H\alpha$

О.А. Ботыгина, В.Г. Лозицкий

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

Представлены результаты измерений магнитного поля в четырех спокойных протуберанцах: 26 сентября 2011 г., 20 октября 2011 г., 7 ноября 2011 г., 9 ноября 2011 г., полученные по наблюдениям на эшелловом спектрографе ГСТ АО КНУ. Магнитные поля измерялись по зеемановскому расщеплению $I \pm V$ профилей в линиях D_3 HeI и $H\alpha$ на высотах 3–12 Мм в атмосфере Солнца. Измерения амплитудных значений локальных полей показали, что магнитные поля были в пределах от 0 до 1240 Гс для линии $H\alpha$ и от 0 до 1220 Гс для линии D_3 . Амплитудные значения локальных полей оценивались по расщеплению бисекторов центральных частей профилей линий на уровне интенсивности 0.9 от максимальной. В отличие от активных протуберанцев, исследуемых авторами ранее, в спокойных протуберанцах эффект антикорреляции измеренных значений магнитного поля по линиям D_3 и $H\alpha$ не наблюдается.

СПІВСТАВЛЕННЯ МАГНІТНИХ ПОЛІВ В СПОКІЙНИХ ПРОТУБЕРАНЦЯХ, ВИМІРЯНИХ ПО ЛІНІЯХ D_3 HeI і $H\alpha$, Ботигіна О.О., Лозицький В.Г. — Представлені результати вимірів магнітного поля в чотирьох спокійних протуберанцях: 26 вересня 2011 р., 20 жовтня 2011 р., 7 листопада 2011 р., 9 листопада 2011 р., отримані по спостереженнях на ешелловому спектрографі ГСТ АО КНУ. Магнітні поля вимірювались по зееманівському розщепленню $I \pm V$ профілів в лініях D_3 HeI і $H\alpha$ на висотах 3–12 Мм в атмосфері Сонця. Виміри амплітудних значень локальних полів показали, що магнітні поля були в межах від 0 до 1240 Гс для лінії 6563Å і від 0 до 1220 Гс для лінії $5875,6\text{Å}$. Амплітудні значення локальних полів оцінювались по розщепленню бісекторів центральних частин профілів ліній на рівні інтенсивності 0.9 від максимальної. На відміну від активних протуберанців, що досліджувались авторами раніше, в спокійних протуберанцях ефект антикореляції виміряних значень магнітного поля по лініях D_3 і $H\alpha$ не спостерігається.

COMPARISON OF MAGNETIC FIELDS IN QUIESCENT SOLAR PROMINENCES MEASURED BY D_3 HeI AND $H\alpha$ LINES, by Botygina O.A., Lozitsky V.G. — The data of magnetic field measurements in fourth quiescent solar prominences of 26 September 2011, 20 October 2011, 7 November 2011, 9 November 2011 are presented. Observations were made on Echelle spectrograph of Astronomical Observatory of National Taras Shevchenko University of Kyiv. Magnetic fields were measured by Zeeman splitting of $I \pm V$ profiles of D_3 HeI and $H\alpha$ lines on heights of 3–12 Mm in the Sun's atmosphere. The amplitude values of local strengths in named prominences were found in range from 0 to 1240 G for $H\alpha$ line and from 0 to 1220 G for D_3 line. Amplitude values of local strengths were determined from splitting of bisectors in central parts of profiles, at intensity level of 0.9. In contrast to active prominences, studied by authors earlier, in quiescent prominences the anticorrelation effect of measured magnetic strengths in helium and hydrogen lines was not found.

Ключевые слова: физика Солнца; магнитные поля; протуберанцы.

Key words: solar physics; magnetic fields; solar prominences.

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерения магнитных полей протуберанцев и солнечной короны трудны, поскольку на них налагаются очень строгие технические условия измерительных приборов, они требуют глубокого понимания механизма формирования поляризованного излучения линии в намагниченной плазме. Важную роль для интерпретации данных играет количество линий, но линии для хорошей диагностики протуберанцев и корональных магнитных полей ограничены — в спектрах протуберанцев светится гораздо меньше линий, чем видно фраунгоферовых линий в спектре фотосферы и поэтому подобрать подходящие линии практически невозможно. Для протуберанцев лучший выбор сводится обычно к двум линиям — широким линиям гелия и водорода. В основном эти две линии использовались в разное время для изучения магнитных полей протуберанцев.

Данные о магнитных полях в протуберанцах весьма противоречивы. Первые такие измерения выполнены Зириным и Северным [28], а также Растом [13] с магнитографами специальной конструкции, позволяющими измерять зеемановское расщепление в эмиссионных магниточувствительных линиях. По измерениям в линии $H\beta$ получено ≈ 150 Гс в протуберанцах активных областей и ≈ 50 Гс в спокойных протуберанцах; по измерениям в $H\alpha$ — до 60 Гс, причем в спокойных протуберанцах — до 10 Гс.

Первые измерения спектрально-поляризационным методом стали одновременно и сенсационными: в протуберанцах типа «штрихов» были обнаружены указания в пользу полей с напряженностью $B = 4000 - 10000$ Гс [6], а в обычных протуберанцах и выбросах — $B = 1000 - 3000$ Гс [1]. Однако

позже эти данные о столь сильных полях не подтвердились: по измерениям со спектросканирующим магнитографом, в протуберанцах $B \leq 30$ Гс [9].

Последующие измерения приводили к оценкам от нескольких десятков гаусс [7, 8, 15, 17] до 1000 Гс [4, 16]. Последнее значение получено для активного и яркого протуберанца, содержащего в спектре много узких линий металлов [4] и активного участка волокна в фотосфере [16].

Заметим, что для солнечной короны магнитные поля даже в несколько десятков гаусс являются «слишком сильными»: легко оценить, что для равновесия однородной нескрученной и откачанной силовой трубки, погруженной в очень горячую, но и очень разреженную корону, величина равновесного магнитного поля в трубке должна быть на уровне лишь единиц гаусс. В этом отношении «килогауссовые» поля в протуберанцах могли быть либо артефактами, либо указаниями на какую-то более сложную (например, скрученную) структуру магнитного поля. Возможное появление таких полей на корональных высотах представляется важной научной проблемой, затрагивающей существенные моменты природы солнечного магнетизма.

Для фотосферных магнитных полей предложено несколько методов измерений локальных субтелескопических полей. Это метод отношения линий и его модификации [10–12, 14], анализ зависимости относительной измеренной напряженности от фактора магнитной чувствительности $g\lambda^2$, а также рассмотрение зависимостей «расщепление бисекторов $\Delta\lambda_B$ профилей $I \pm V$ — отношение $\Delta\lambda/g\lambda^2$ », где $\Delta\lambda$ — расстояние от центра линии [12]. Все эти методы, однако, требуют использования нескольких спектральных линий с близкими глубинами формирования и температурными чувствительностями, но разными факторами Ланде. Еще одно существенное условие: спектральная ширина линий должна быть сравнимой с искомым зеемановским расщеплением.

Настоящее исследование базируется на использовании лишь двух спектральных линий — $D_3\text{HeI}$ и $\text{H}\alpha$. Ниже будет показано, что также и эти линии позволяют получить весьма ценную информацию о магнитных полях в протуберанцах.

2. МАТЕРИАЛ НАБЛЮДЕНИЙ И ЕГО ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА

Исследовались четыре спокойные протуберанца: 26 сентября 2011 г., 20 октября 2011 г., 7 ноября 2011 г., 9 ноября 2011 г. Их спектры сфотографированы Лозицким В.Г. на эшелном спектрографе горизонтального солнечного телескопа Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко [2]. При фотографировании спектров использовались фотопластинки ORWO WP1 и WP3. Моменты начала экспозиций (по UT) и сами экспозиции были такими: $11^h23^m25^s + 15^s$ для первого протуберанца, $09^h15^m25^s$ для второго, $11^h55^m25^s$ для третьего, $11^h26^m17^s$ и $11^h28^m35^s$ — для четвертого. Инструмент позволяет наблюдать одновременно область от 3800 до 6600 Å со спектральным разрешением 40 мÅ в области линии $D_3\text{HeI}$ и 50 мÅ в области линии $\text{H}\alpha$. При наблюдениях использовался анализатор круговой поляризации, состоящий из четвертьволновой пластинки перед входной щелью спектрографа и призмы-расщепителя из исландского шпата — за ней. Это позволяло получить стоксовы профили $I + V$ и $I - V$ магниточувствительных линий.

При последующей спектрофотометрической обработке изучались только линии $\text{H}\alpha$ и $D_3\text{HeI}$ (их эффективные факторы $g_{\text{eff}} = 1.05$ и 1.06 , соответственно), поскольку другие линии были сильно недоэкспонированы или вообще не видны. Линии были профотометрированы на микрофотометре МФ-4 с тем, чтобы детально изучить их профили $I \pm V$. Ширина фотометрических разрезов соответствовала 1 Мм на Солнце, причем соседние фотометрические разрезы вплотную стыковались друг с другом. Поскольку профили $I + V$ и $I - V$ получались в отдельных полосках спектра и фотометрировались также отдельно, каждую пару таких регистрограмм следовало «привязать» по длинам волн. Такая «привязка» осуществлялась по теллурическим линиям молекулярной воды H_2O , которые блендируют их крылья и близлежащий спектральный континуум. Точность этой «привязки», определяемая «шумами» фотоэмульсии (как правило, 1–2%), а также магнитной чувствительностью линий и фотометрической крутизной их профилей, и определяла итоговые ошибки измерений; в среднем их величина составляла ± 100 Гс.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спокойные протуберанцы отличаются от активных не только более медленными эволюционными изменениями, но и меньшей дисперсией лучевых скоростей. Именно поэтому вид эмиссионных линий в спокойных протуберанцах более простой — в них нет (как в активных протуберанцах) больших локальных выбросов со значительными (иногда — противоположно направленными) лучевыми скоростями. Во всех исследованных спокойных протуберанцах линии $\text{H}\alpha$ и $D_3\text{HeI}$ также имели довольно простой вид — они напоминали в направлении поперек дисперсии ровненькие полоски, без существенной волнистости в крыльях. Отсюда следует, что лучевые скорости в них не превышали 10–15 км/сек.

Магнитные поля измерялись тремя методами: а) по смещению «центров тяжести» профилей $I + V$ и $I - V$, что позволяло измерить эффективные (усредненные по входной щели) магнитные поля B_{eff} , б) по амплитуде V -параметра Стокса (подобно тому, как это делается магнитографическим методом);

соответствующие данные дают также усредненные магнитные поля B_{Va} ; в) по расщеплению бисекторов профилей $I+V$ и $I-V$ на уровне интенсивности 0.9; таким образом получены поля $B_{0.9}$, которые более близки к амплитудным (локальным) значениям магнитного поля внутри апертуры. Оказалось, что для исследованных спокойных протуберанцев $|B_{Va}| < 150$ Гс, $|B_{eff}| < 300$ Гс, а $|B_{0.9}| < 1000$ Гс. Учитывая результаты работы [3], в которой исследовались активные протуберанцы, можно заключить, что в спокойных протуберанцах измеренные поля примерно в 3–5 раз слабее, чем в активных протуберанцах.

В спокойных протуберанцах более слабо выражен и т.н. V -эффект — большее расщепление бисекторов в ядре линии, чем в крыльях (рис. 1). Этот эффект, вероятно, возникает из-за пространственно неразрешимой («субтелескопической») структуры магнитного поля, когда наблюдаемый профиль формируется суммированием спектральных вкладов двух компонент: узкой и сильно расщепленной и широкой, но слабо расщепленной. Такой эффект наблюдается не только в активных протуберанцах [3], но и лимбовых вспышках [5].

При сопоставлении измеренных напряженностей по линиям D_3 и $H\alpha$ найдено, что соответствующие значения практически не коррелируют (рис. 2).

Здесь также проявляется отличие от активных протуберанцев, для которых, по данным авторов [3], существует антикорреляция магнитных полей в D_3 и $H\alpha$. По-видимому, это указывает на более простую

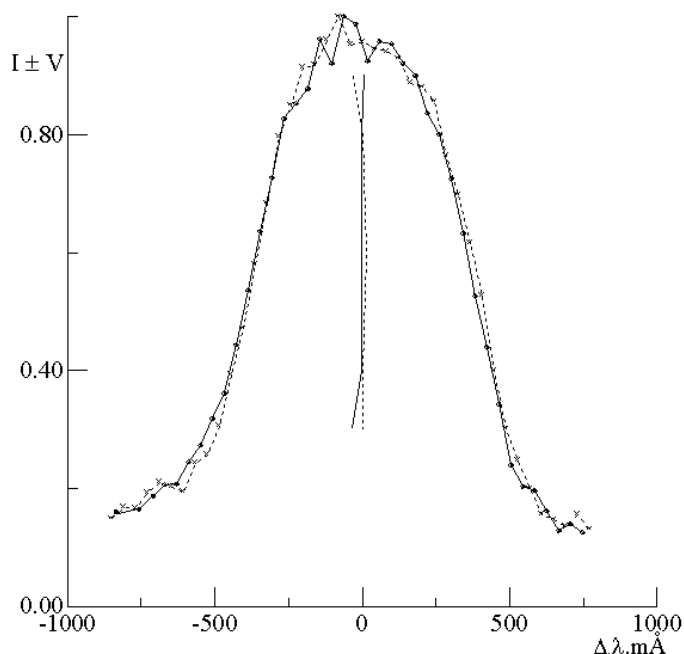


Рис. 1. Профили $I \pm V$ и бисекторы линии $H\alpha$ в протуберанце 20.10.2011 г. для момента $09^h 15^m 25^s$

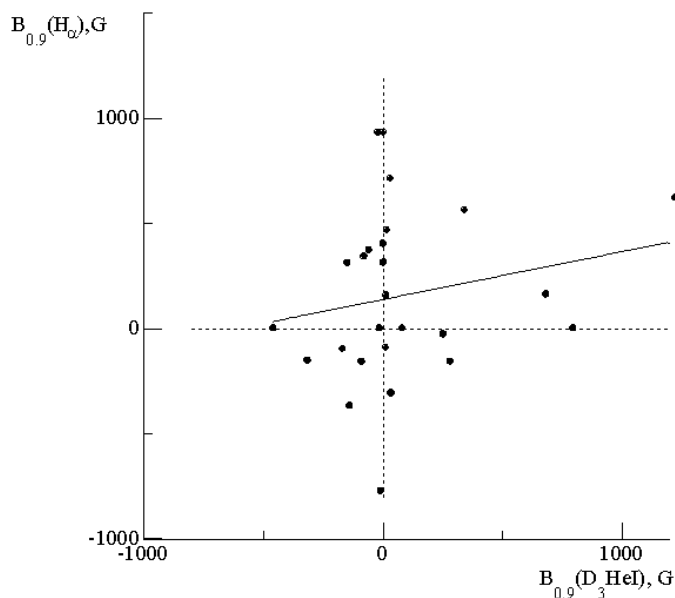


Рис. 2. Сопоставление измерений $B_{0.9}$ по линиям D_3 и $H\alpha$ для спокойных протуберанцев

структуру магнитного поля в спокойных протуберанцах, хотя высокие его значения (до ≈ 1 кГс) указывают на то, что также и в спокойных протуберанцах должна быть какая-то нетривиальная структура магнитного поля (по-видимому, типа бессилового поля, т.е. скрученного), позволяющего выдерживать огромную разницу давлений (магнитного и газового) внутри и вне протуберанца.

4. ВЫВОДЫ

В исследованных протуберанцах величины усредненных полей B_{Va} и B_{eff} не превосходили 150 и 300 Гс, соответственно, на высотах 3–12 Мм. Оценка локальных полей по величине $B_{0,9}$ приводит к гораздо более высоким значениям, до ≈ 1 кГс. Таким образом, в спокойных протуберанцах измеренные поля примерно в 3–5 раз слабее, чем в изученных ранее [3] активных протуберанцах.

В спокойных протуберанцах более слабо выражен и т.н. V-эффект — большее расщепление бисекторов в ядре линии, чем в крыльях. Кроме того, в них не выявлено достоверной корреляции результатов измерений по линиям D_3 и $H\alpha$ (для активных протуберанцев отмечена антикорреляция [3]). Все это указывает на то, что спокойные протуберанцы имеют более простую структуру магнитного поля, чем активные. Тем не менее, достаточно высокие его значения (до ≈ 1 кГс) указывают на то, что также и в спокойных протуберанцах должна быть какая-то нетривиальная структура магнитного поля (по-видимому, бессилового типа), позволяющего выдерживать огромную разницу давлений (до 4–5 порядков) внутри и вне протуберанца.

1. Башкирцев В.С., Смольков Г.Я., Шмулевский В.Н. Об измерениях магнитного поля в солнечных активных протуберанцах // В сб.: Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. — Вып. 20. — М.: Наука, 1971. — С. 212–221.
2. Курочка Л.Н., Лозицкая Н.И., Лозицкий В.Г., Нагулин Ю.С. Одновременные наблюдения солнечного спектра в инфракрасной и видимой областях с помощью нового эшелювого спектрографа // Вестник Киевского университета, Астрономия. — 1988. — Вып. 30. — С. 46–50.
3. Лозицкий В.Г., Ботыгина О.А. Сопоставление магнитных полей в активных протуберанцах, измеренных по линиям D_3HeI и $H\alpha$ // Письма в Астрономический журнал — 2012. — **38**, № 6 — С. 431–438.
4. Лозицкий В.Г., Пасечник М.Н. О магнитных полях в активном протуберанце, измеренных по линиям различных элементов // Вестник Киевского университета, Астрономия. — 1986. — Вып. 28. — С. 40–43.
5. Лозицкий В.Г., Стаценко М.М. Исследование магнитного поля в лимбовой солнечной вспышке // Известия Крым. Астрофиз. обсерватории. — 2008. — **104**, № 2. — С. 28–28.
6. Шнитальная А.А., Вальшин Г.Ф. О магнитных полях в протуберанцах // Солнечные данные. — 1970. — № 4. — С. 100–107.
7. Casini R., López Ariste A., Paletou F., Léger L. Multi-line Stokes inversion for prominence magnetic-field diagnostics // The Astrophysical Journal. — 2009. — **703**, № 1. — P. 114–120.
8. Casini R., López Ariste A., Tomczyk S., Lites B.W. Magnetic maps of prominences from full Stokes analysis of the $HeI D_3$ line / Ap. J. Let. — 2003. — **598**. — P. L67–L70.
9. Kim I.S., Nikolsky G.M., Kouthmy S., Stellmacher G. Magnetic field in solar prominences measured with a new spectrally scanning magnetograph // Astron. and Astrophys. — 1982. — **114**, № 2. — P. 347–350.
10. Lozitska N., Lozitskij V. Small-scale magnetic fluxtube diagnostics in a solar flare // Solar Physics. — 1994. — **151**, № 2. — P. 319–331.
11. Lozitsky V.G., Baranovsky E.A., Lozitska N.I., Leiko U.M. Observations of magnetic field evolution in a solar flare // Solar Physics. — 2000. — **191**, № 1. — P. 171–183.
12. Lozitsky V.G., Staude J. Observational evidences for multi-component magnetic field structure in solar flares // Journal of Astrophys. and Astronomy — **29**, № 3&4. — 2008. — P. 387–404.
13. Rust D.M. Magnetic fields in quiescent solar prominences // The Astrophys. Journ. — 1967. — **150**. — P. 313.
14. Stenflo J.O. Magnetic-field structure of the photospheric network // Solar Physics.- 1973. — **32**, № 1. — P. 41–63.
15. Van Doorselaere T., Nakariakov V.M., Young P.R., Verwichte E. Coronal magnetic field measurement using loop oscillations observed by Hinode/EIS // Astron. and Astroph. — 2008. — **487**, № 2. — P. L17.
16. Xu Z., Lagg A., Solanki S., Liu Y. Magnetic fields of an active region filament from full Stokes analysis of Si I 1082.7 nm and He I 1083.0 nm // The Astrophysical Journal. — 2012 — <http://arxiv.org/abs/1202.4562>.
17. Zapiór M., Rudawy P. Estimation of solar prominence magnetic fields based on the reconstructed 3D trajectories of prominence knots // Solar Phys., Online First — 2012 — <http://www.springerlink.com/content/75012624405g12h0/>.
18. Zirin H., Severny A. Measurement of magnetic fields in solar prominences // The Observatory. — 1961. — **81**. — P. 155–156.

Поступила в редакцию 1.10.2012