

*В.Г. Лозицкий**, *Е.В. Курочка**, *О.А. Ботыгина**

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В АКТИВНОМ ПРОТУБЕРАНЦЕ ПО ДАННЫМ СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЛИНИЯХ D_3 HeI и $H\alpha$

Анализируются стоксовы профили $I \pm V$ линий D_3 и $H\alpha$ в активном протуберанце 12 июля 2004 года, возникшем после лимбовой солнечной вспышки балла M1.6. Измерения магнитных полей методом «центров тяжести» показали, что магнитное поле в протуберанце было в пределах от -200 до $+300$ Гс (разным для разных высот протуберанца). Эти значения соответствуют приближению однородного поля – одинакового как по площади входной щели, так и по всем эмиссионным профилям линий. Сделан вывод, что приближение однородного поля допустимо лишь как некое «нулевое»: выявленный в профилях обеих линий V -эффект (большее магнитное расщепление в ядре линии, чем в ее крыльях) ясно указывает на то, что наблюдаемые $I \pm V$ профили образованы сложением интенсивностей от более широкой и более узкой эмиссий, имеющих также и разные по величине магнитные поля. Приближенная оценка амплитуды магнитных индукций в узкой компоненте приводит к значениям поля от -700 до $+3000$ Гс, что значительно больше ошибок измерений (± 100 Гс). Кроме того, на высоте 6 Мм выявлены слабые, узкие, расщепленные и поляризованные особенности в ядре линии D_3 , которые указывают на субтелескопическое (<1 Мм) магнитное поле величиной 3300 Гс. Для высот 5–7 Мм выявлен интересный эффект – тенденцию к антикорреляции измеренных индукций по линиям гелия и водорода. Аргументируется заключение, что этот может отражать существование в протуберанцах мелкомасштабных экранированных бессильных структур со знакопеременной периферией магнитного поля, предложенных в модели Соловьева и Лозицкого (1986).

*Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, г. Киев, Украина

Магнитные поля в короне определяют большое количество явлений – от переноса магнитодинамических волн до синхротронного излучения в радиодиапазоне. В настоящее время прямых данных о корональных магнитных полях очень мало (по сравнению с фото-сферными полями). Перечислим основные из этих работ. Одновременные измерения в линиях водорода $H\alpha$ и K CaII в области холодной эмиссии (5×10^4 К) на расстоянии 10^5 км от лимба дали значение 100 – 200 Гс [16]. Из спектрополяриметрических наблюдений спикул, выполненных в линии HeI 10830\AA на высоте 2000 км, получено значение около 10 Гс [26]. Значение магнитного поля в корональной петле, полученное из наблюдений на спутнике Hinode [28], оказалось 39 ± 8 Гс.

Солнечные протуберанцы являются корональными объектами, но вопрос о магнитных полях в них до сих пор остается открытым. В обзоре [24] поля в них определены от нескольких до трех тысяч гаусс. Указания в пользу очень сильных полей в протуберанцах (порядка нескольких килогаусс) получены ранее в работах [1–4, 8]. Существует также прямая связь между величиной поля и доплеровской скоростью, что указывает на движение вещества вдоль силовых линий [18, 24].

Физические условия в протуберанцах определены давно: эти образования светятся в результате переизлучения радиации от нижних слоев атмосферы Солнца с небольшой долей переходов под действием электронных ударов. Этим определяется их температура около 7000 К и электронная плотность в пределах от 10^9 до 10^{11} см $^{-3}$ [30]. Самая простая классификация состоит из 2-х типов: спокойные протуберанцы, которые могут существовать до нескольких недель, и активные, относящиеся к активным областям, которые быстро переходят из спокойного состояния в эруптивное, как правило, в результате образования солнечной вспышки.

Физическая модель протуберанца невозможна без учета магнитного поля, поскольку именно оно может удерживать вещество над поверхностью Солнца. Но измерения его величины, проводившиеся в различных линиях фотографическим методом, не дали од-

нозначного ответа. Для простого поддержания спокойного протуберанца необходимо магнитное поле большее, чем 6 Гс [9], и его присутствие в основаниях было найдено в [10]. В [22] рассмотрена волокнистая модель протуберанца, которая подтверждается определениями геометрической толщины от 100 до 10^4 км [17]. Из поляризационных измерений в H_β и D_3 HeI электронная концентрация в протуберанцах составляет от 0.5×10^{10} до 7×10^{10} см⁻³ [12]. Модель протуберанца, состоящая из тонких вертикальных волокон, рассматривалась в [27], где было показано, что «запутанные» магнитные поля величиной около 10 Гс могут поддерживать существование волокон с плотностью до 10^{11} см⁻³.

Но наиболее полная модель спокойного протуберанца представлена в [6]. На основании нового подхода к построению модели – решения обратной гидродинамической задачи, когда физические условия в протуберанце определяются из заданной структуры магнитного поля – были получены точные нелинейные решения для хода температуры, давления и плотности внутри протуберанца.

Оказалось, что если поле имеет жгутовую структуру с винтовым закручиванием, и шаг винта является соразмерным радиусу волокон протуберанца, то полученные физические условия отвечают данным наблюдений. Эта модель не нуждается в поддержке внешним магнитным полем, внутреннее поле составляет около 35 Гс, каждому значению поля внутри протуберанца соответствует определенная высота его в короне, а сам протуберанец располагается над линией разделения полярностей, что является известным наблюдательным фактом. Также на основе данного метода рассчитана модель протуберанца в виде аркады со сгибом посередине (модель С. Б. Пикельнера, 1971г.) и показано, что поле около 5 Гс может удерживать холодное волокно на высоте 50 Мм. Но модель не является законченной, поскольку не представлен механизм поддержания протуберанца и его распада.

Измерения магнитных полей протуберанцев производились в различных линиях: H_α , H_β , H и K CaII, 10830Å HeI [11,12, 24, 29]. Поскольку существовало мнение, что поля в протуберанцах малы, была создана теория совместного учета эффектов Ханле и Зеемана в линии D_3 HeI [13]. При поляризационных наблюдениях [29] многих

протуберанцев поляризационные эффекты не были получены в H_α и H_β , а в линии D_3 HeI отмечена небольшая разница между красной и синей компонентами, соответствующая значению магнитного поля 50 Гс. Полученные в [11] магнитные поля по линиям H_α и D_3 оказались в пределах от 7 до 13 Гс. Поляризационные наблюдения протуберанцев в D_3 на THEMIS показали существование в этой линии как Ханле, так и Зееман эффектов [23]. Полученные из магнитных карт протуберанца 25.05.2002 г. в линии D_3 средние значения поля составляют 10–20 Гс, а в отдельных местах, там, где поле является горизонтальным, до 70 Гс [14]. Кроме D_3 в последнее время используется также линия HeI 10830Å, которая является чувствительной к поперечному эффекту Зеемана [25]. Эта линия может дать важную информацию о неразрешимых магнитных полях в протуберанцах [15].

Протуберанцы на диске Солнца наблюдаются в H_α как темные волокна. Наблюдения на Hinode фотосферных магнитных полей под протуберанцем в активной области AR 10953 [21] показали, что области с обеих сторон около линии раздела полярностей, на которой располагался протуберанец, имели слабые вертикальные, но сильные горизонтальные поля. Области сильного горизонтального поля имели сдвиг в синюю сторону, что означает их подъем в корону под протуберанцем. Изучение магнитных полей волокна, размещенного около нейтральной линии в AR 10781 [19] на вакуумном спектрографе в HeI 10830Å дали значения вертикальных полей 100–200Гс, тогда как для горизонтальных – 600–700Гс. Таким образом, горизонтальные магнитные поля нужно учитывать при определении полей в протуберанцах.

Следует отметить, что почти во всех перечисленных работах измерялось некоторое усредненное магнитное поле – среднее как по входной апертуре, так и по профилю спектральной линии. Это дает нижнюю оценку локальных полей и оставляет открытым вопрос об амплитудных значениях магнитного поля в возможных субтелескопических структурах протуберанца. Именно последней проблеме посвящено настоящее исследование.

Авторами исследовался активный протуберанец 12 июля 2004 года. Его спектр сфотографирован с экспозицией 1 мин (начиная с 8:48:50 UT) на эшелюном спектрографе горизонтального солнечного телескопа Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко (ГСТ АО КНУ). Инструмент позволяет наблюдать одновременно область от 3800 до 6600 Å с разрешением 40 мÅ в области линии D₃ HeI и ≈50 мÅ в области линии H_α.

Протуберанец возник на восточном лимбе после вспышки балла M1.6, которая по данным GOES имела пик рентгеновского излучения в 8:10 UT. То есть, наблюдаемый спектр протуберанца зафиксирован примерно через 40 мин. после максимума указанной лимбовой вспышки. Спектр получен Лозицким В.Г. и Лозицкой Н.И. на фотопластинке ORWO WP3. При наблюдениях использовался анализатор круговой поляризации, состоящий из четвертьвольновой 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.

После проявления и фиксирования фотопластинки оказалось, что нормальные почернения фотоэмульсии имеют только линии H_α и D₃ HeI, а другие линии сильно недодержаны. Поэтому при последующей спектрофотометрической обработке изучались только две указанные линии, имеющие факторы Ланде $g=1.05$ и 1.06 , соответственно. Линии были профотометрированы на микрофотометре МФ-4 с тем, чтобы детально изучить их стоксовы профили $I \pm V$.

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 H₂O, которые блендируют их крылья и близлежащий спектральный континуум.

При построении профилей $I \pm V$ в интенсивностях и их взаимной «привязке» по теллурическим линиям оказалось, что в расщеплении бисекторов обеих линий присутствует характерная особенность, которая ранее была названа V -эффектом [3]. Она состоит в том, что бисекторы эмиссионных профилей расщепляются в их ядрах заметно больше, чем в крыльях (Рис. 1). Из рисунка видно, что бисекторы почти не расщеплены в крыльях линии (на расстояниях от центра $|\Delta\lambda| > 200$ мÅ), но имеют наибольшее расщепление в ядре линии ($|\Delta\lambda| < 200$ мÅ).

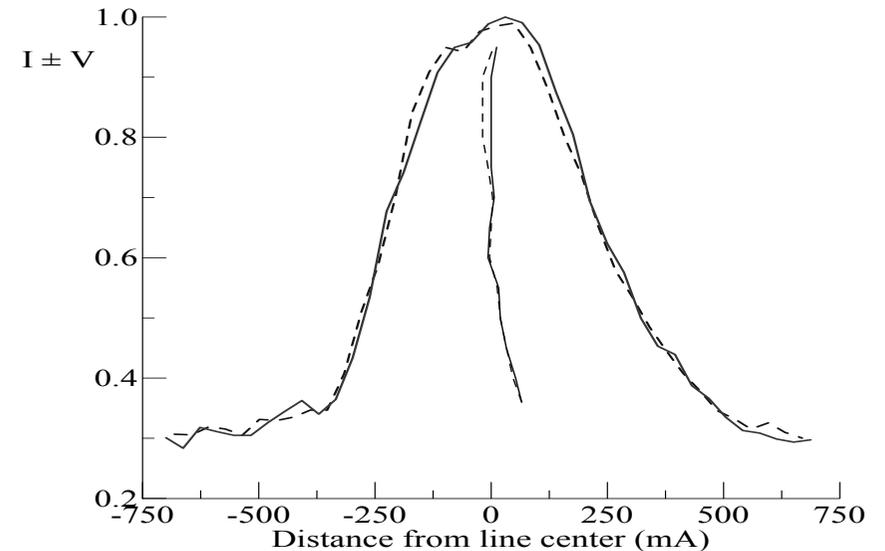


Рис. 1. Профили $I \pm V$ линии D₃HeI в исследованном протуберанце на высоте около 5 Мм над уровнем фотосферы

В данном случае, измеренное по расщеплению бисекторов магнитное поле изменяется от практически нулевых значений для $|\Delta\lambda| > 200$ мÅ и до 550 ± 100 Гс в ядре линии. Это, по-видимому,

указывает на неоднородную структуру магнитного поля в картинной плоскости.

Если магнитное поле измерять по смещению «центра тяжести» всей эмиссии, то оно в разных местах протуберанца оказывается равным от -260 до $+280$ Гс для обеих линий, что более чем в 2 раза превосходит ошибки измерений (± 100 Гс).

СОПОСТАВЛЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ В ЛИНИЯХ D_3 и H_α

Данные «центра тяжести» отражают усредненное поле, найденное в приближении его однородности в пределах площади входной щели. Чтобы найти величину поля, более близкую к его амплитудным (т.е. локальным) значениям, целесообразно измерить расщепление не «центров тяжести», а вершин эмиссий. Для этого следует прокалибровать в напряженностях расщепление бисекторов в ядре линии.

Поскольку в центре линии всегда имеются некоторые особенности типа плато или двойной-тройной вершины (см. ниже), лучше для этой цели измерять расщепление не в самом центре линии, а несколько ниже по уровню интенсивности – например, на уровне 0.9 от максимальной интенсивности – где ход интенсивности в профилях уже достаточно крутой и величина расщепления меньше зависит от «шумовых» искажений интенсивности.

Такое поле, кратко обозначенное как $B_{0,9}$, представлено на рис. 2 для высот 2–10 Мм. Видно, во-первых, что диапазон величин поля теперь существенно шире, от -700 Гс до $+3000$ Гс, что уже однозначно (и намного) превосходит ошибки измерений.

Но, во-вторых, намечается странная тенденция: поля в D_3 и H_α антикоррелируют, причем антикорреляция распространяется даже на изменение полярности поля!

Насколько известно авторам статьи, такой эффект отмечается впервые. В данном случае вряд ли могут быть сомнения в достоверности отдельных измерений – они в несколько раз больше ошибок измерений. Возникает, однако, вопрос о возможной случайности такого соотношения величин поля. То есть, вопрос можно ставить так: может быть, такое соотношение поля в этих двух линиях чисто

случайное, возникшее из-за ограниченности нашей выборки? Возможно, что эта тенденция, случайным образом проявившаяся на рис. 2 для высот от 2 до 10 Мм, при более широком сопоставлении данных (включая другие высоты) будет нарушена?

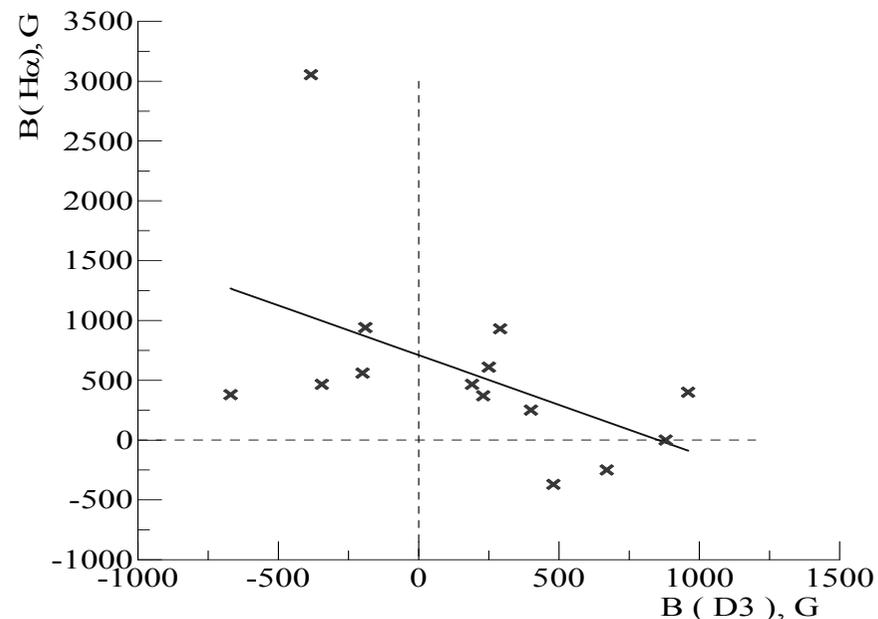


Рис. 2. Сопоставление измерений $B_{0,9}$ по линиям D_3 и H_α для высот 2–10 Мм в исследованном протуберанце

Поставленные вопросы представляются очень важными для понимания природы магнитных полей в протуберанцах, и поэтому для более уверенных суждений безусловно нужны дополнительные тщательные исследования.

УЗКИЕ ОСОБЕННОСТИ В ЦЕНТРЕ ЛИНИИ D_3

Еще один интересный эффект был найден при изучении распределения интенсивности в центре линии D_3 (Рис. 3). На этом ри-

сунке все распределения интенсивностей нормированы на наибольшую интенсивность в соответствующем фотометрическом разрезе. Для удобства при сравнении профилей, профили для высот 5 и 7 Мм сдвинуты на -0.2 и $+0.2$ единицы вдоль оси ординат по отношению к профилям для высоты 6 Мм.

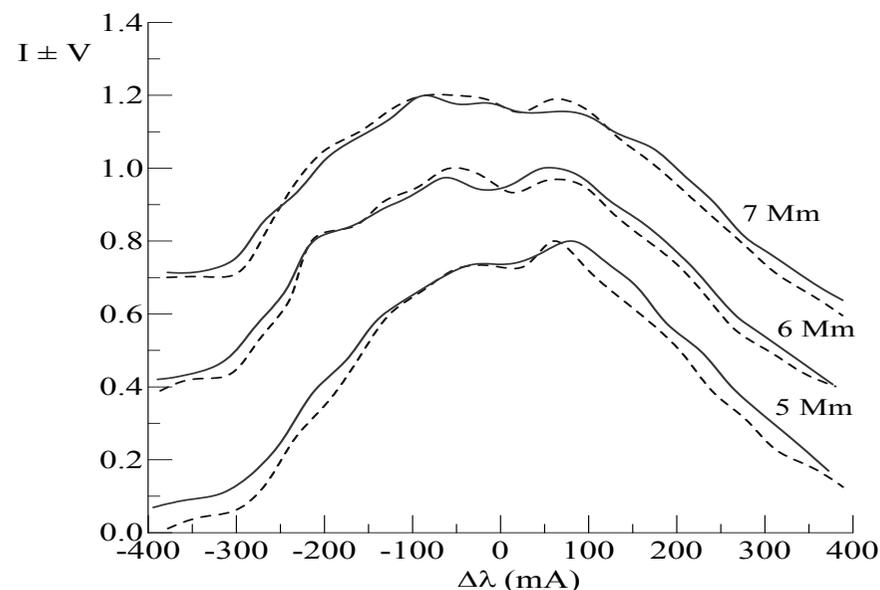


Рис. 3. Сопоставление профилей $I \pm V$ линии D_3 HeI для трех различных высот протуберанца, которые указаны в правой части рисунка

Видно, что в ядре линии, на расстояниях $|\Delta\lambda| < 150 \text{ м\AA}$ от центра, наблюдается в целом хаотический ход профилей $I + V$ (сплошные линии) по отношению к профилям $I - V$ (штрихи). Однако в одном фотометрическом разрезе, а именно для высоты 6 Мм, картина проясняется: здесь хорошо заметна, во-первых, двухвершинность эмиссии, во-вторых, инверсия (изменение знака) стоковского параметра V при переходе через центр линии. Картина представляется такой, как будто на высокий эмиссионный пик в целом неполяризованной эмиссии накладывается еще одна узкая эмисси-

онная картина, имеющая а) значительное расщепление ($\Delta\lambda_n \approx 56 \text{ м\AA}$), б) типичную для эффекта Зеемана круговую поляризацию с ее инверсией в центре линии и в) очень узкие профили интенсивности — около 100 м\AA (тогда как ширина основных профилей эмиссии намного больше — примерно 600 м\AA).

Если считать, что эти узкие расщепленные и поляризованные особенности на высоте 6 Мм обусловлены эффектом Зеемана, то соответствующее поле должно быть $B = 3300 \text{ Гс}$. Заметим, что в данном случае оно должно выступать как некое субтелескопическое поле ($< 1 \text{ Мм}$), занимающее в картинной плоскости небольшую долю площади.

ВЫВОДЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно полученным данным, в исследованном протуберанце магнитное поле было в пределах от -200 до $+300 \text{ Гс}$ для разных высот протуберанца. Эти значения соответствуют приближению однородного поля — одинакового как по площади входной щели, так и по всей форме эмиссионных профилей линий D_3 и H_α . Очевидно, что в данном случае это приближение допустимо лишь как некое «нулевое»: выявленный в профилях обеих линий V -эффект (большее магнитное расщепление в ядре линии, чем в ее крыльях) ясно указывает на то, что наблюдаемые $I \pm V$ профили линии образованы сложением интенсивностей от более широкой и более узкой эмиссий, имеющих также и разные по величине магнитные поля. Приближенная оценка амплитуды магнитной индукции в узкой компоненте приводит к значениям поля от -700 до $+3000 \text{ Гс}$ (для разных мест протуберанца), что значительно больше ошибок измерений ($\pm 100 \text{ Гс}$). Кроме того, на высоте 6 Мм выявлены слабые, узкие, расщепленные и поляризованные особенности в ядре линии D_3 , которые указывают на локальное субтелескопическое ($< 1 \text{ Мм}$) магнитное поле величиной 3300 Гс .

Для высот в диапазоне от 2 до 10 Мм над уровнем фотосферы обнаружены указания на антикорреляцию магнитных полей по линиям D_3 и H_α (Рис. 2). Поскольку обнаруженный эффект превосходит ошибки измерений, он заслуживает внимания даже несмотря

на недостаточную, на первый взгляд, статистику данных. Действительно, добавление новых данных может изменить картину на совершенно противоположную, но это еще не значит, что ближе к реальности будет именно массив объединенных данных. Как в фотосфере, так и в короне структура магнитного поля чрезвычайно мелкомасштабная, а при разрешении в 1 Мм (как в нашем случае) – субтелескопическая. Поскольку в настоящем исследовании ставится целью изучение локальных магнитных полей, то методически правильно было бы полагать, что некоторые особенности магнитного поля могут существенно меняться при смещении в картинной плоскости на величину порядка 1 Мм. То есть, нужно быть готовым к тому, что эти существенные особенности магнитного поля проявятся в узком диапазоне высот, а на других высотах они будут отсутствовать.

Действительно, из рис. 3 мы видим, что характерные особенности профилей $I \pm V$ для высоты 6 Мм, указывающие на локальные магнитные поля в 3300 Гс, достаточно отчетливо видны только на этой высоте, а при смещении от нее всего на 1 Мм вверх и вниз – теряются. То есть, необязательно требовать, чтобы некая характерная особенность в магнитных полях на некоторой высоте имела глобальный характер и присутствовала во всем объеме протуберанца.

Попробуем с этой точки зрения представить себе, как может индукция магнитного поля уменьшаться по одной линии тогда, когда по другой линии она растет. Заметим, что ничего подобного не отмечается для фотосферных полей: там всегда наблюдается либо положительная, либо близкая к нулю корреляция измерений по разным линиям, но никогда – отрицательная (см., напр. [5]). Существенное различие измеренных полей может быть при измерениях по линиям с разными факторами Ланде [20], однако в нашем случае сравниваемые линии имеют как раз близкие факторы Ланде (1.05 и 1.06).

При интерпретации наблюдений базовым представлением должно быть представление о вероятной субтелескопической структуре поля, состоящей из тонких пространственно неразрешимых магнитных «нитей» с сильным магнитным полем, заполненных светящимся веществом. Во всяком случае, именно так выглядят проту-

беранцы с орбитальных солнечных обсерваторий типа Hinode и TRACE. При наблюдениях на входную щель спектрографа попадает много таких «нитей», притом (не исключено) – и с разной магнитной полярностью. В наблюдаемом спектре это дает какую-то суммарную картину с преобладающей магнитной полярностью, зависящей от концентрации плазмы и ее температуры, а также полярности, напряженности и фактора заполнения соответствующих магнитных полей.

Легко сообразить, что если обе спектральные линии формируются с одинаковым вкладом по интенсивности в «нитях» различной полярности, то и измеренная магнитная полярность по этим линиям будет одинаковой. Никакого эффекта, подобного представленному выше на рис. 2, тогда не будет.

Ситуация может меняться, если одна из линий почему-то больше формируется в магнитном поле одной полярности, тогда как другая – противоположной. В этом случае в суммарном наблюдаемом профиле знак зеемановского расщепления одной линии «потянет», например, на положительную полярность, тогда как в другой – на противоположную, отрицательную.

Но реально ли это в случае солнечного протуберанца?

Области свечения гелия и водорода в протуберанцах не совпадают: эмиссия гелия наблюдается в поверхностных слоях протуберанца, где электронная плотность примерно в 10 раз меньше, чем средняя по протуберанцу, тогда как водорода – внутри протуберанца, в местах с большей электронной плотностью [30]. Такая разница определяется механизмами возбуждения этих линий: для гелия большую роль играет ионизация ультрафиолетовым излучением Солнца с $\lambda < 504\text{\AA}$. Поскольку это излучение поглощается на протяжении оптической толщи, равной 2 единицам, то и последующие рекомбинации на верхний уровень линии D_3 HeI будут происходить там же. Таким образом, гелий будет светиться в наружных частях протуберанца или между его волокнами, если принять волокнистую модель, где температура несколько выше, чем в более плотных волокнах.

В МГД модели протуберанца, предложенной А.А. Соловьевым [6], температура наиболее высока снаружи магнитной силовой

трубки и постепенно падает внутрь, к оси симметрии структуры. Очевидно, в такой структуре гелий должен светиться в основном в оболочке («оплетке») соответствующей силовой трубки, а внутри трубки его свечение значительно слабее. То есть, тогда внутренность силовой трубки практически невидима в линии гелия. Иное дело – свечение в H_{α} . Водород должен светиться в основном во внутренних частях силовых трубок протуберанца.

Модель [6], однако, не решает проблемы разной полярности магнитного поля по измерениям в линиях D_3 и H_{α} . Поскольку полярность магнитного поля на данном сечении трубки предполагается везде одинаковой, наблюдаемая магнитная полярность по обеим линиям должна совпадать.

Имеются, однако, и более подходящая модель, имеющая знакопеременное чередование полярности поля с удалением от оси структуры. Она предложена Соловьевым и Лозицким [7] для объяснения таких необычных свойств субтелескопических полей, как дискретность напряженностей и очень высокие их значения – иногда даже более высокие, чем обычно наблюдаемые в солнечных пятнах. Авторами рассматривалось линейное бессилое поле, при котором

$$\text{rot}\mathbf{H} = \alpha\mathbf{H}, \quad (1)$$

где α таково, что $\nabla\alpha\mathbf{H} = 0$ (здесь \mathbf{H} - вектор напряженности магнитного поля). Для аксиальной симметрии системы и при $\alpha = \text{const}$ общее решение этого уравнения описывается функциями Бесселя J_0 и J_1 нулевого и первого порядка. Решение уравнения (1) таково, что условие поперечного ограничения структуры $H_r(a) = 0$ эквивалентно условию $J_1(\lambda a) = 0$, где a – радиус поперечного сечения структуры (жгута), λ – некоторая константа. Тогда условие баланса давлений на границе жгута с внешней атмосферой приводит к выражению

$$H_k(0)J_0(\mu_k) = (8\pi P)^{1/2}, \quad (2)$$

где μ_k – k -й корень функции J_1 . Вследствие того, что $J_0(\mu_k)$ образует дискретное множество, мы получаем дискретное множество также напряженностей $H_k(0)$ и индукций $B_k(0)$. Характерным свойством

таких образований является также наличие *знакопеременной мелко-масштабной структуры поля в их периферийных участках*. Чем больше полупериодов знакопеременного поля укладывается в боковом сечении жгута, тем выше напряженность $H_k(0)$ на его оси. При $P = \text{const}$ теоретические значения поля получаются на фотосфере такими: 2.5, 6.2, 8.3, 10.0...кГс, т.е. они вполне удовлетворительно согласуются с наблюдениями фотосферных полей [2].

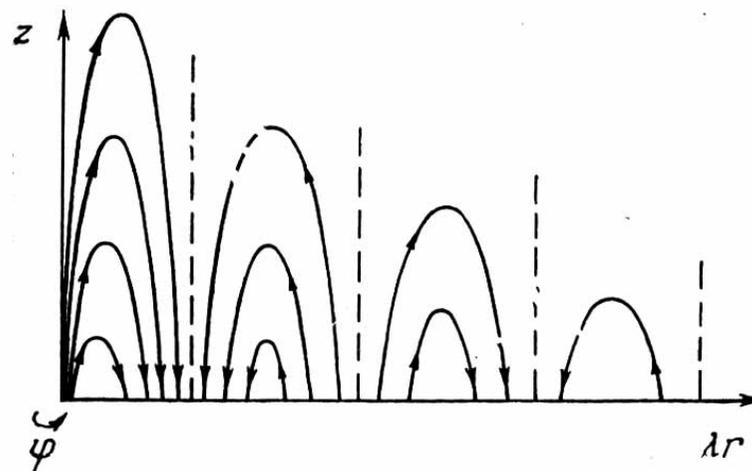


Рис. 4. Конфигурация силовых линий мелкомасштабного элемента в проекции на плоскость $\varphi = \text{const}$ в модели [7]

Если предположить, что такие необычные образования возникают не только в фотосфере, но и в протуберанцах, то это естественным образом разрешает проблему антикорреляции данных по линиям D_3 и H_{α} . Действительно, в таких структурах гелий должен светиться снаружи, при какой-то одной преобладающей полярности магнитного поля. Свечение водорода должно охватывать большую толщу структуры, включая и слои противоположной полярности. Наблюдаемый же эффект должен отражать сложный баланс многих условий: возбуждения свечения, фактора заполнения, силы и поляр

ности магнитного поля. Очевидно, что в различных случаях (местах протуберанца, стадиях его эволюции и пр.) этот баланс может быть различным. Поэтому необязательно, чтобы то, что получилось на одной высоте протуберанца, повторялось и на другой высоте, особенно в таких нестационарных образованиях, как активные протуберанцы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Баширцев В.С., Смольков Г.Я., Шмулевский В.Н.* Об измерениях магнитного поля в солнечных активных протуберанцах // В сб.: Исслед. по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца. – Вып. 20. – М.: Наука. – 1971. – С. 212 – 221.
2. *Лоцицкий В.Г.* Сильные магнитные поля в мелкомасштабных структурах и вспышках на Солнце. Дисс. доктора ф.-м. наук: 01.03.03 – Киев, 2003. – 299с.
3. *Лоцицкий 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.
4. *Лоцицкий В.Г., Стаценко М.М.* Исследование магнитного поля в лимбовой солнечной вспышке // Известия Крым. Астрофиз. обсерватории. – 2008. – Т. 104, № 2. – С. 28–28.
5. *Лоцицкий В.Г., Цап Т.Т.* Эмпирическая модель мелкомасштабного магнитного элемента спокойной области Солнца // Кинематика и физика небес. тел. – 1989. – Т.5, № 1. – С.50–58.
6. *Соловьев А.А.* Структура солнечных волокон. Протуберанцы в короне без внешнего магнитного поля / Астрон. журн. – 2010. – Т.87. – С.93–102.
7. *Соловьев А.А., Лоцицкий В.Г.* Бессиловая модель тонкоструктурного магнитного элемента // Кинематика и физика небес. тел. – 1986. – Т.2, № 5. – С.80–84.
8. *Шпитальная А.А., Вяльшин Г.Ф.* О магнитных полях в протуберанцах // Солнечные данные. – 1970, № 4. – С. 100–107.
9. *Ashbourn J.M.A., Woods L.C.* On the magnetic fields supporting quiescent solar prominences / Ap. J. – 2002. – V.568. – P.1049–1055.
10. *Aulanier G., Schmieder B.* Magnetic helicity and solar prominence formation // Proceedings of the 2008 Meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics – 2008. – P.543–546.
11. *Bommier V., Landi Degl’Innocenti E., Leroy J.-C., Sahal-Brechot S.* Complete determination of the magnetic field vector and of the electron density in 14 prominences from linear polarization measurements in the HeI D3 and H α lines / Sol. Phys. – 1994. – V.154, N1. – P.231–260.
12. *Bommier V., Leroy J.-C., Sahal-Brechot S.* The linear polarization of hydrogen H β radiation and the joint diagnostic of magnetic field vector and electron density in quiescent prominences. II The electron density / Astron. Astroph. – 1986. – V.156, N1-2. – P.90–94.

13. *Bommier V., Sahal-Brechot S.* Quantum theory of the Hanle effect : calculation of the Stokes parameters of the D3 Helium line for quiescent prominences / Astron. Astroph. – 1978. – V.69. – P.57–64.
14. *Casini R., Lopez Ariste A., Tomczyk S., Lites W.B.* Magnetic maps of prominences from full Stokes analysis of the HeI D3 line / Ap. J. Let. – 2003. – V. 598. – P.L67–L70.
15. *Casini R., Manso Sainz R., Low B.C.* Polarimetric diagnostics of unresolved chromospheric magnetic fields / Ap. J. Let. – 2009. – V.701, N1. – P.L43–L46.
16. *Delone A.B., Porfir’eva G.A., Smirnova O.B., Yakunina G.V.* On the magnetic field strength in the solar corona / Multi-Wavelength Investigation of Solar Activity. Proceedings IAU Symposium N 223, 2004. – 2004. – P.453–454.
17. *Heinzel P., Bommier V., Vial J.-C.* A complex diagnostic of solar prominences / Sol. Phys. – 1996. – V.164, N 1. – P.211–222.
18. *Klepikov V.Yu.* Magnetic field and Doppler velocity correlation in quiescent solar prominences / Radiophysics and quantum electronics. – 1996. – V.39, N10. – P.857–861.
19. *Kuckein C., Cnteno R., Martinez Pillet V., Casini R., Manso Sainz R., Shimizu T.* On the magnetic field strength of active region filaments / Astron. Astroph. – 2009. – V.501, N 3. – P. 1113–1121.
20. *Lozitsky V.G., Staude J.* Observational evidences for multi-component magnetic field structure in solar flares // Journal of Astrophysics and Astronomy. – 2008. – V.29, Nos. 3&4. – P. 387–404.
21. *Okamoto T.J., Tsuneta S., Lites B.W., Kubo M. et al.* Emergence of a helical flux rope under an active region prominence / Ap. J. Let. – 2008. – V.673. – P.L215–L218.
22. *Paletou F.* The magnetic field of solar prominences / Proceedings of the 2008 Meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics – 2008. – P.237–242.
23. *Paletou F., Lopez Ariste A., Bommier V., Semel M.* Full-Stokes spectropolarimetry of solar prominences / Astron. Astroph. – 2001. – V.375. – P.L39–L42.
24. *Smolkov G.Ya., Bashkirtsev V.S.* Magnetic fields in solar prominences / Contribution of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. – 1976. – V.6. – P.175–194. (Proceedings of the 7th Regional Consultation on Solar Physics “Solar Activity and Solar-Terrestrial Relations”, September 24-28, 1973).
25. *Trujillo Bueno J., Asensio Ramos A.* Influence of atomic polarization and horizontal illumination on the Stokes profiles of the HeI 10830 Å multiplet / Ap. J. – 2007. – V.655. – P.642–650.
26. *Trujillo Bueno J., Merenda L., Centeno R., Collados M., Landi Degl’Innocenti E.* The Hanle and Zeeman effects in solar spicules: a novel diagnostic window on chromospheric magnetism / Ap. J. Let. – 2005. – V.619. – P.L191–L194.
27. *Van Ballegooyen A.A., Cranmer S.R.* Tangled magnetic fields in solar prominences / Ap.J. – 2010. – V.711. – P. 164–178.

28. *Van Doorselaere T., Nakariakov V.M., Young P.R., Verwichte E.* Coronal magnetic field measurement using loop oscillations observed by Hinode/ETS / *Astron. Astroph.* – 2008. – V.487, N2. – P.L17–L20.

29. *Wiehr E., Bianda M.* Solar prominence polarimetry / *Astron. Astroph.* – 2003. – V.404, N1. – P.L25–L28.

30. *Yakovkin N.A., Zeldina M.Yu.* The helium radiation in prominences / *Sol. Phys.* – 1971. – V.19. – P.414–430.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Бабий В.П., Ефименко В.М., Лозицкий В.Г.</i> Необычность циклов активности №№ 17 и 18 в отношении диаметров солнечных пятен	5
<i>Баранов А.В., Лазарева Л.Ф.</i> Анализ профилей круговой поляризации линий Fe 1 $\lambda\lambda$ 609.37 и 609.42 нм в спектрах солнечных пятен	17
<i>Баранов А.В., Можаровский С.Г.</i> Проявления аномальной дисперсии в солнечных спектральных линиях со сложной структурой расщепления	30
<i>Баранов А.В., Можаровский С.Г.</i> Анализ модели элемента тонкой структуры солнечной фотосферы, построенной по связи магнитного поля и эквивалентной ширины спектральных линий	41
<i>Ерофеев Д.В.</i> Вариации формы и симметрии пространственного распределения мощности низкочастотных флуктуаций ММП в ходе солнечного цикла	51
<i>Ерофеев Д.В., Ерофеева А.В.</i> Систематические изменения размеров групп солнечных пятен в циклах активности 19–23...57	
<i>Крамынин А.П., Воробьева Г.П.</i> Сравнение рядов площадей солнечных пятен УАФО и ГАС ГАО.....	68
<i>Кузьменко И.В., Гречнев В.В., Уралов А.М.</i> Волна Мортонна, «волна EIT» и радиовсплеск II типа как проявление единого волнового фронта в событии 13 июля 2004 г.....	82
<i>Кузьменко И.В., Гречнев В.В.</i> Оценка массы выброса по радиоданным в эруптивном событии 1 января 2005 г.....	92
<i>Лозицкий В.Г., Курочка Е.В., Ботыгина О.А.</i> Магнитные поля в активном протуберанце по данным спектрально-поляризационных измерений в линиях D ₃ HeI и H α	100