

УДК 523.98 + 52-337

## Солнечные магнитные поля и эффект Пашена-Бака

*В.Г. Лозицкий*

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета  
им. Т. Шевченко, Киев, Украина,  
e-mail: [lozitsky@observ.univ.kiev.ua](mailto:lozitsky@observ.univ.kiev.ua)

Поступила в редакцию 7 ноября 2008 г.

**Аннотация.** В статье приведены наблюдательные данные, свидетельствующие в пользу существования в солнечных вспышках магнитных полей с индукцией  $\sim 10^4$  Гс. Для двух солнечных пятен отмечено аномальное зеемановское расщепление линии FeI-1177 6094.419 Å, имеющей отрицательный фактор Ланде. В пятнах, однако, эта линия расщепляется так, будто у нее положительный фактор Ланде. Возможно, это результат частичного эффекта Пашена-Бака, но при огромных полях  $\sim 10^5$  Гс. Отмечается, что поля такого уровня в очень мелких структурах теоретически возможны в рамках концепции “преобразований подобия”.

SOLAR MAGNETIC FIELDS AND PASHEN-BACK EFFECT, by *V.G. Lozitsky*.

**Ключевые слова:** солнечные магнитные поля, вспышки, пятна, эффект Пашена-Бака

---

### 1 Введение

Примерно полстолетия назад А.Б. Северный высказал предположение, что в солнечной атмосфере могут существовать необычайно сильные магнитные поля – величиной  $\approx 50$  кГс (Северный, 1957). Он писал: “Таким образом, вполне возможно, что магнитное поле внутри пятен имеет тонкую структуру, осреднение которой при наблюдениях приводит к полям  $\sim 10^3$  гаусс, в то время как фактическое поле отдельных элементов пятна (возможно, различной полярности и наклона) составляет десятки тысяч гаусс; т. е. положение может быть такое же, как в случае грануляции, где осреднение отдельных полей ( $\sim 100$  гаусс) гранул в приборе приводит к полям порядка нескольких гаусс. Если это предположение оправдывается (в результате дальнейших исследований) и поля в пятнах достигают величин  $\sim 50000$  гаусс, будучи сосредоточены в небольших трубках, то проблема ускорения частиц может найти свое более или менее простое решение. В таком случае плазма в области между трубками будет крайне диамагнитной и возможны ее выбросы с большими скоростями”.

Ниже будет показано, что это предположение акад. А.Б. Северного оказалось пророческим (хотя пока что очень далеким от всеобщего признания). Сложность наблюдения таких полей связана со следующими методическими обстоятельствами (Лозицкий, 1993, 2003).

1. Таким очень сильным магнитным полям должны соответствовать очень большие зеемановские расщепления  $\Delta\lambda_H$ , при которых спектральные зеемановские  $\sigma$ -компоненты могут попадать в область соседних интенсивных бленд, где отыскать их крайне сложно. Действительно, из известной формулы

$$\Delta\lambda_H = 4.67 \times 10^{-13} g \lambda^2 B \quad (1)$$

(здесь  $\Delta\lambda_H$  и  $\lambda$  в  $\text{\AA}$ , а  $B$  – в Гс) следует, что если взять линию FeI 5250.2  $\text{\AA}$  ( $g = 3.0$ ), то при  $B = 50000$  Гс имеем  $\Delta\lambda_H = 1.93$   $\text{\AA}$ . Это примерно в 20 раз больше за собственную ширину этой линии в солнечном спектре и в 4 раза – за расстояние до ближайшей интенсивной бленды FeI 5250.65. Даже для линии с очень низким фактором Ланде  $g = 0.5$  имеем тогда  $\Delta\lambda_H = 0.32$   $\text{\AA}$ , что соответствует столь далекому от линии (типа FeI 5250.2  $\text{\AA}$ ) континууму, что здесь наблюдатель скорее может ожидать какую-нибудь бленду, а не спектральные проявления этой же линии. Очевидно, лишь очень слабочувствительные к магнитному расщеплению линии, имеющие факторы Ланде еще меньшей величины (например, 0.1 или 0.01), позволят наблюдать их  $\sigma$ -компоненты именно там, где находится ядро или крылья соответствующей линии. Это означает, что для более уверенной диагностики особо сильных полей лучше использовать особо “глухие” к магнитному расщеплению линии. Если таких полей нет, указанные линии не должны давать заметных спектральных эффектов. Если же очень сильные поля существуют, в профилях таких линий должны возникать неожиданно сильные эффекты расщепления и поляризации, соответствующие эффекту Зеемана.

2. Можно ожидать, что особо сильным магнитным полям должны соответствовать очень слабые и малозаметные спектральные особенности. Действительно, если имеем простейший случай однородной и нескрученной силовой трубки, то должно выполняться условие

$$p + B^2 / (8\pi) = p_{ex}, \quad (2)$$

где  $p$  и  $p_{ex}$  – газовое давление внутри и вне трубки,  $B$  – индукция магнитного поля в трубке (давлением магнитного поля вне трубки пренебрегаем). Очевидно, что при фиксированном значении  $p_{ex}$  величина давления в трубке будет тем меньше, чем сильнее магнитное поле  $B$  внутри трубки. Значит, меньше может быть не только температура, но и концентрация частиц, а значит, и оптическая толщина. Поэтому можно ожидать, что магнитные трубки с наиболее сильными полями являются и наиболее разреженными, т. е. “невидимыми” спектрально. Иными словами, все то в спектре, что при невнимательном рассмотрении имеет вид инструментальных флуктуаций, в действительности может маскировать слабейшие спектральные проявления “сверхсильных” полей.

3. Дисперсия значений магнитного поля (т. е. неодинаковая его величина) в силовых трубках также может маскировать сверхмощные магнитные поля, так как она “размывает” зеемановские компоненты и еще больше уменьшает их контраст. Эффект такого “размывания” наиболее значителен для линий с наибольшими факторами Ланде. Поэтому для диагностики особо мощных магнитных полей тем более полезны спектральные линии с очень небольшими факторами Ланде.

4. Профили спектральных линий в местах с очень сильными мелкомасштабными полями существенно сужены, что указывает на практически полное подавление там турбулентных движений и значительное охлаждение плазмы (Лозицкий и др., 1999). Особо узкие проявления могут внешне напоминать шумовые выбросы, что также маскирует присутствие этих полей. Для достаточно широких линий типа FeI 5233, имеющих полуширину  $\Delta\lambda_{1/2} \approx 300$  м $\text{\AA}$  в невозмущенных областях, действительная (точнее, исправленная за влияние инструментального размывания) ширина соответствующих особенностей во вспышках не превышает 10–20 м $\text{\AA}$ , что в 15–30 раз (!) меньше за обычную ширину этой линии.

5. Диагностика сверхмощных магнитных полей может затрудняться или облегчаться в зависимости от локальных термодинамических условий. По-видимому, в солнечных вспышках соответствующие силовые трубки более заметны благодаря увеличению в них газового давления и эмиссионному обращению картины эффекта Зеемана. Поэтому целесообразно

искать дополнительные проявления существования сверхмощных магнитных полей именно в солнечных вспышках.

Целью настоящей работы является краткое изложение некоторых наблюдательных данных, свидетельствующих в пользу реальности особо сильных полей. Как увидим ниже, такие сверхсильные магнитные поля весьма вероятны не только во вспышках, но и в пятнах вне вспышек.

**Солнечные вспышки.** Для уверенной диагностики соответствующих спектральных проявлений необходимо детально сравнить профили магниточувствительных и “немагнитных” линий, т. е. линий, имеющих нулевые факторы Ланде. В первом случае профили линий деформируются как эффектом Зеемана, так и Доплера, во втором – только эффектом Доплера. В солнечном спектре имеется весьма ограниченное число неблендированных линий металлов, имеющих в приближении  $LS$ -связи нулевые факторы Ланде. В частности, это линии  $\text{FeI } ^5F_1^5F_1$   $\lambda = 5123.723 \text{ \AA}$ ,  $\text{FeI } ^5F_1^5D_0$   $\lambda = 5434.527 \text{ \AA}$  и  $\text{FeI } ^5F_1^5D_0$   $\lambda = 5576.097 \text{ \AA}$ , принадлежащие к мультиплетам №№ 16, 15 и 686 соответственно (Мур, 1945). Однако оказалось, что хотя у них  $g_{LS} = 0$ , по лабораторным измерениям их  $g_{\text{lab}}$  равны:  $-0.013$ ,  $-0.014$  и  $-0.012$  соответственно (Земанек и Стефанов, 1976; Ланди Дегль’Инноченти, 1982). Это означает, что в строгом смысле эти линии нельзя считать чисто “доплеровскими”, т. е. не расщепляющимися в любом по величине магнитном поле.

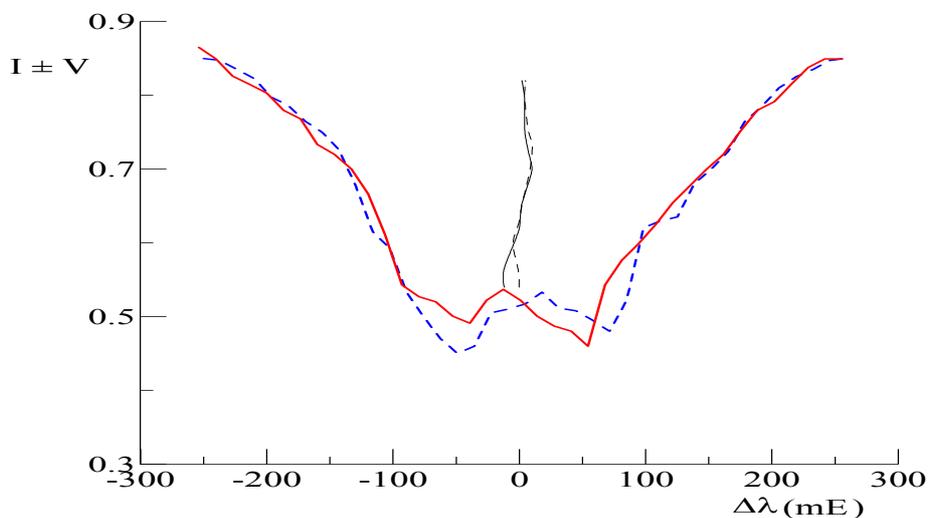
Здесь есть важный методический момент: при возможных сверхсильных полях в  $10^4$ – $10^5$  Гс такие линии имеют именно те факторы Ланде, которые определены в лабораторных условиях, поскольку там использовались при калибровке магнитные поля того же диапазона. Если же использовать при исследовании солнечных вспышек линии с факторами Ланде  $g_{LS} = 2$ – $3$ , то для них уже может наступать эффект Пашена-Бака, при котором, формально, факторы Ланде линий должны существенно меняться (Фриш, 1963).

Были действительно обнаружены тонкие поляризационные эффекты в указанных выше линиях  $\text{FeI}$  с очень малыми факторами Ланде ( $g \approx 0.01$ ), указывающие на сверхмощные поля во вспышках с индукцией  $20$ – $90$  кГс (Лозицкий, 1993, 1998). Возможно, такие поля возникают на непродолжительное время ( $\approx 10$  мин) в максимальной фазе мощных вспышек, притом в местах с многокомпонентной структурой магнитного поля, включающей как поля “килогауссового” диапазона ( $\approx 10^3$  Гс), так поля  $\sim 10^4$  Гс.

Для примера на рис. 1 показаны стоксовы профили  $I \pm V$  и бисекторы линии  $\text{FeI } 5434.527$  во вспышке 16 июня 1989 г. (материал наблюдений получен автором на эшелъном спектрографе горизонтального солнечного телескопа АО КНУ). Бисектором профиля линии, как известно, называется срединная его линия, проведенная так, чтобы каждая ее точка была равноудаленной как от “фиолетового”, так и от “красного” крыла линии на том же уровне интенсивности. Вид бисектора несет важную информацию об условиях формирования спектральных линий. В частности, бисекторы профилей  $I + V$  и  $I - V$  при однородном поле должны быть взаимно параллельными, если магнитное расщепление  $\Delta\lambda_n$  намного меньше полуширины ширины спектральной линии  $\Delta\lambda_{1/2}$  (это справедливо как при продольных, так и непродольных полях). Как видно из рис. 1, для указанной вспышки имеем совсем иную картину: здесь бисекторы в целом не параллельны, причем их расщепление наибольшее вблизи ядра линии. Кроме того, в ядре линии отчетливо наблюдаются эмиссионные “холмы”, которые не только расщеплены, но и имеют характерную асимметрию, меняющуюся на противоположную при переходе к другой поляризации. Все это указывает на комбинированный случай Зееман-эффекта во вспышке – проявляющийся как в эмиссии, так и поглощении. По расщеплению эмиссионных “холмов” в ядре линии можно оценить величину магнитного поля; она оказывается близкой к  $60$  кГс.

Заметим, что исследование профилей  $I \pm V$  и бисекторов линии  $\text{FeI } 5434.527$  в областях вне пятен и вспышек не обнаружило подобных особенностей. Также и в профилях теллурических линий не выявлены аналогичные эффекты. Это говорит о том, что выявленные деформации в

профилях линии FeI 5434.527 не являются инструментальными, обусловленными, например, турбуленцией в спектрографе или инструментальной поляризацией.



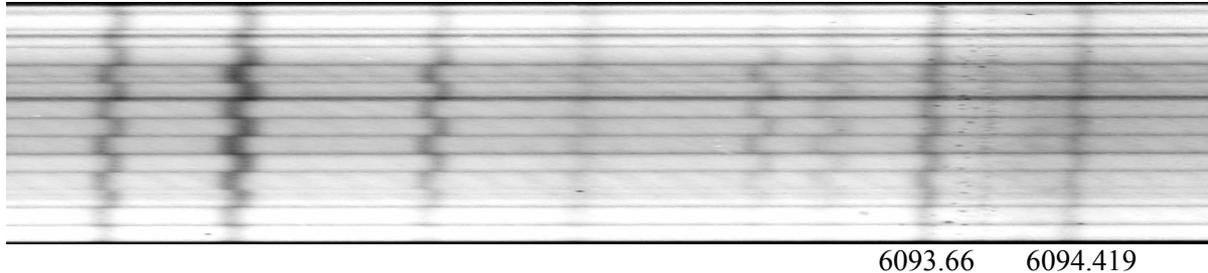
**Рис. 1.** Стоксовы профили  $I \pm V$  и бисекторы линии FeI 5434.527 во вспышке 16 июня 1989 г. (по оси абсцисс – расстояние от центра линии в мÅ)

**Солнечные пятна.** Несколько лет назад автором обнаружено загадочное расщепление в солнечных пятнах линии FeI 6094.419, принадлежащей к мультиплету железа № 1177. Эта линия имеет теоретический фактор Ланде  $g_{LS} = -0.25$ , что близко к ее лабораторному фактору  $g_{Lab} = -0.218$  (Земанек и Стефанов, 1976). Знак минус означает, что при данной полярности магнитного поля она должна иметь такой же знак поляризации  $\sigma$ -компонент, как при противоположной магнитной полярности. То есть при использовании при наблюдениях анализатора круговой поляризации, пропускающего только одну  $\sigma$ -компоненту (например, правокруговую), в этой линии должна наблюдаться противоположная компонента (например, левокруговая). Тем не менее в спектрах двух солнечных пятен было обнаружено, что эта линия расщепляется так, словно у нее положительный фактор Ланде.

Это иллюстрируется фрагментом зееман-спектрограммы на рис. 2. Спектрограмма получена с анализатором круговой поляризации, состоящим из четвертьволновой пластинки и мозаики Скоморовского (вся оптика изготовлена В.И. Скоморовским, ИСЗФ, Иркутск). На рисунке крайняя линия справа – это линия FeI-1177 6094.419 с отрицательным (как говорилось выше) фактором Ланде, а соседняя с ней линия слева – линия того же мультиплета FeI-1177 6093.66, имеющая положительный фактор Ланде  $g_{Lab} = 0.33$ . Можно заметить, что в одной и той же полоске мозаики обе линии имеют расщепление одинакового знака, то есть отклоняются от среднего положения в одну сторону (это подтверждается и фотометрией спектрограмм).

Вообще говоря, подобный случай возможен, если полярность магнитного поля в пятне на уровнях формирования этих линий является различной. Однако глубины формирований этих линий отличаются лишь на 10–20 км (Гуртовенко и Костык, 1989). Более того, поскольку каждая линия формируется в диапазоне высот порядка 50 км, фактически их высоты формирований плотно перекрываются. Но тогда весьма маловероятно, чтобы полярность магнитного поля в пятне поменялась на обратную на ничтожно малом интервале глубин!

Заметим, что линия FeI-1177 6094.419 соответствует переходу  ${}^3F_2^5P_1$ , ее факторы Ланде для нижнего и верхнего термов равны (для LS-связи)  $g_1 = 0.667$ ,  $g_2 = 2.500$ , откуда по формуле Ланди Дегль'Инноченти (1982) получается эффективный фактор Ланде  $g_{\text{eff}} = -0.25$ .



**Рис. 2.** Фрагмент зееман-спектрограммы большого пятна 25 марта 1991 г. в области длин волн около 6089-6095 Å (см. текст)

Если предположить, что нижний терм линии FeI-1177 6094.419 подвергнут влиянию эффекта Пашена-Бака и для него  $g_1 \approx 1.0$ , то тогда по той же формуле  $g_{\text{eff}} = +0.25$ . Если же имеет место частичный эффект Пашена-Бака (pPBe), то может быть, например,  $g_{\text{eff}} = +0.01$  или  $+0.02$ . В последнем случае будет примерно такое же расщепление, которое отмечено наблюдениями.

Оценим для этой линии пороговое значение магнитного поля, приводящее к частичному эффекту Пашена-Бака (Фриш, 1963):

$$B_p \approx |E_i - E_k| / m_j g \mu_B, \quad (2)$$

где  $m_j$  – магнитное квантовое число,  $g$  – фактор Ланде,  $\mu_B$  – магнетон Бора,  $B$  – индукция магнитного поля,  $|E_i - E_k|$  – разность энергий в атоме между термами мультиплетной структуры. Принимая, согласно таблицам мультиплетов Мур (1945)  $|E_i - E_k| \approx 0.01$  эВ, а также учитывая, что  $\mu_B = 0.58 \times 10^{-8}$  эВ/Гс, имеем для линии FeI-1177 6094.419 огромную величину  $B_p \approx 500000$  Гс. Именно при таком поле для этой линии должен наступать частичный эффект Пашена-Бака.

Значит ли это, что на Солнце в пятнах (даже вне вспышек!) существуют магнитные поля в несколько сотен тысяч гаусс (т.е. субмегагауссовы поля)? Предположение кажется фантастичным, но и альтернативное предположение (об изменении магнитной полярности в пятне на протяжении всего 10–20 км по глубине) также маловероятно.

Есть ли какая-либо иная (не столь “сенсационная”) возможность объяснения этих результатов? Автору статьи она неизвестна.

**Оценки Стенфло на основе “преобразований подобия”.** Ян Олоф Стенфло, наиболее, по-видимому, авторитетный в настоящее время специалист по проблеме мелкомасштабной структуры солнечных магнитных полей, стажировался в Крымской астрофизической обсерватории в 60-х годах XX ст. В своей относительно недавней лекции по физике Солнца, прочитанной на симпозиуме в Индии в 1999 г. (Стенфло, 2000), он приводит интересные соображения в пользу возможного существования чрезвычайно сильных полей в очень мелких масштабах.

Он отмечает, что солнечная плазма (от ядра до солнечной короны и вспышек) на диаграмме “температура-плотность” занимает примерно те же положения, что и лазерная плазма, плазма в токамаках и взрывная плазма. Однако солнечная и лабораторная плазма имеют фундаментальное отличие – занимают существенно различные объемы. Приведение одного

масштаба к другому не может быть сделано произвольно, без изменения других физических параметров. Один из формализованных подходов, позволяющих грубо оценить порядок величин при таком приведении, – т. н. “преобразования подобия” (Альвен и Фельтхаммер, 1963).

Предположим, что линейный масштаб изменился на фактор  $\gamma$ . Из уравнений Максвелла следует, что временной масштаб должен тогда также измениться на фактор  $\gamma$ , электрические  $E$  и магнитные  $B$ -поля – на фактор  $\gamma^{-1}$ , плотность электрического тока – на  $\gamma^{-2}$  и т. д. То есть можно ожидать – во сколько раз уменьшается размер структуры, во столько же раз там может быть сильнее магнитное поле.

Но как проверить надежность этих оценок? Очевидно, лишь на основе правдоподобного предсказания каких-нибудь хорошо известных величин.

Стенфло (2000) отмечает, что если взять для примера солнечный магнитный цикл, для которого  $l \approx 10^6$  км,  $B \approx 10$  Гс,  $t \approx 22$  года и сравнить его с лабораторным масштабом  $l \approx 1$  м, то имеем фактор  $\gamma \approx 10^9$ . Тогда соответствующие лабораторные значения  $B_{\text{lab}} \approx 10^{10}$  Гс,  $t_{\text{lab}} \approx 1$  сек. Первое значение указывает на формальную допустимость фантастически сильных магнитных полей, тогда как второе подозрительно близко к пульсу человека. Конечно, это совпадение можно рассматривать как чистый курьез (1 метр лабораторного масштаба – это с точностью до фактора порядка 2 действительно рост человека), однако обратное приведение, к Солнцу, приводит нас тогда к заключению, что 22 года – это “пульс” Солнца. С последним, пожалуй, могут согласиться многие гелиофизики...

Заметим также, что Соловьевым (1998) показана возможность существования примерно столь же сильных полей более строго – на основе рассмотрения конкретной МГД-модели (сферического магнитного вихря). В процессе эволюции такая магнитная структура эволюционирует от одного бессилового состояния к другому, однако оказывается, что ее бессильные состояния разделены сингулярными, при которых индукция магнитного поля в структуре возрастает формально до бесконечности.

В целом, таким образом, идея А.Б. Северного о возможном существовании на Солнце экстремально сильных (десятки килогаусс) полей обрела за последние 50 лет как экспериментальные, так и теоретические подтверждения.

## Литература

- Альвен и Фельтхаммер (Alfven H., Fälthammar C.-G.) // *Cosmical Electrodynamics – Fundamental Principles*. 2nd edition. Oxford Univ. Press. 1963.
- Гуртовенко Э.А., Костык Р.И. // *Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов* Киев: Наук. думка. 1989.
- Земанек Е.Н., Стефанов А.П. // *Вестник Киевского ун-та, сер. астрономии*. 1976. Вып. 18. С. 20.
- Ланди Дегль’Инноченти (Landi Degl’Innocenti E.) // *Solar Phys.* 1982. Vol. 77. №. 1/2 P. 285.
- Лозицкий В.Г. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 1993. Т. 9. №. 3. С. 23.
- Лозицкий В.Г. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 1998. Т. 14. №. 5. С. 401.
- Лозицкий В.Г. // *Дисс. докт. физ.-мат. наук*. Киев. 2003.
- Лозицкий и др. (Лозицкий В.Г., Лозицька Н.Й., Гордовський М.Ю.) // *Вісник. Київський ун-т ім. Т. Шевченка. Астрономія*. 1999. Вип. 35. С. 17.
- Мур (Moore С.Е.) // *Contr. Princeton Univ. Observ.* №. 20. Princeton. New Jersey. 1945. P. 110.
- Северный А.Б. // *Астрон. журн.* 1957. Т. 34. С. 684.
- Соловьев А.А. // *Астрон. журн.* 1998. Т. 75. №. 5. С. 783.
- Стенфло (Stenflo, J.O.) // *Journal of Astrophys. Astron. (India)*. 2000. Vol. 21. P. 451.
- Фриш И.Е. // *Оптические спектры атомов*. М.-Л.: Физматгиз. 1963.