

УДК 523.942

М. И. Стодилка

Астрономическая обсерватория Львовского национального университета им. И. Франко
ул. Кирилла и Мефодия 8, Львов, 79005, Украина
sun@astro.franko.lviv.ua

Пространственные вариации профилей Стокса магниточувствительных линий Fe I

Получены решения задачи переноса поляризованного излучения в рамках 3D-МГД-модели атмосферы спокойного Солнца. Изучены пространственные вариации параметров профилей Стокса, обусловленные грануляционной структурой и мелкомасштабными магнитными полями в спокойной фотосфере Солнца для магниточувствительных линий нейтрального железа. Выявлен эффект модуляции параметров V-профилей Стокса (амплитуда, площадь) грануляционной структурой фотосферы Солнца — этот эффект существенен преимущественно в межгранулах, где глубина модуляции достигает 50 %. Исследована корреляция параметров профилей Стокса с мелкомасштабными магнитными полями солнечной грануляции. Показано, что по параметрам профилей Стокса линий Fe I 525.02 и 524.71 нм можно построить калибровочные соотношения, обеспечивающие при диагностике мелкомасштабных магнитных полей коэффициент корреляции 0.98.

ПРОСТОРОВІ ВАРІАЦІЇ ПРОФІЛІВ СТОКСА МАГНІТОЧУТЛИВИХ ЛІНІЙ Fe I, Стоділка М. І. — Отримано розв'язки задачі переносу поляризованого випромінювання у рамках 3D-МГД-моделі атмосфери спокійного Сонця. Вивчено просторові варіації параметрів профілів Стокса, зумовлені грануляційною структурою та дрібномасштабними магнітними полями у спокійній фотосфері Сонця для магніточутливих ліній нейтрального заліза. Виявлено ефект модуляції параметрів V-профілів Стокса (амплітуда, площа) грануляційною структурою фотосфери Сонця — цей ефект суттєвий переважно у міжгранулах, де глибина модуляції досягає 50 %. Досліджено кореляцію параметрів профілів Стокса з дрібномасштабними магнітними по-

лями сонячної грануляції. Показано, що за параметрами профілів Стокса ліній Fe I 525.02 та 524.71 нм можна побудувати калібрувальні співвідношення, які забезпечують при діагностиці дрібномасштабних магнітних полів коефіцієнт кореляції 0.98.

SPATIAL VARIATIONS OF STOKES PROFILES OF MAGNETOACTIVE Fe I LINES, by Stodilka M. I. — We obtained solutions for polarized radiative transfer problem within 3D MHD model of the quiet solar atmosphere and studied spatial variations of Stokes profile parameters which are caused by granulation structure and small-scale magnetic fields in the quiet solar photosphere for neutral iron magnetoactive lines. We revealed an effect of Stokes V-profile parameter (amplitude, area) modulation by granulation structure of the solar photosphere. The effect is more significant in intergranules where the modulation depth reaches 50 %. We also investigated correlation of Stokes profile parameters with small-scale magnetic fields of the solar granulation. It was shown that using Stokes profile parameters of Fe I lines 525.02 nm and 524.71 nm one can construct calibration relationships that provide high correlation coefficient (0.98) when studying small-scale magnetic fields.

ВВЕДЕНИЕ

Магнетизм спокойного Солнца — это одно из приоритетных направлений физики Солнца. Мелкомасштабные магнитные поля (ММП) обладают достаточным количеством магнитной энергии, следовательно, они могут играть важную роль в энергетическом балансе солнечной атмосферы. Несмотря на разногласия в исследовании ММП различными подходами, можно однозначно утверждать, что эти поля занимают всю поверхность Солнца (к тому же они охватывают все наблюдаемые пространственно-временные масштабы) и дают существенный вклад в беззнаковый магнитный поток вне активных областей [16]. Нельзя однозначно сказать о происхождении ММП — скорее всего они есть результатом вклада следующих источников: турбулентного динамо, фрагментации остатков магнитных полей активных областей, всплытия ММП из глубоких слоев [17].

Изучение солнечного магнетизма выявляет дискретную структуру сильных магнитных полей с малым фактором заполнения и запутанные турбулентные поля порядка 1—10 мТл, которые охватывают большую часть поверхности фотосферы [14—16]. Согласно данным наблюдений ММП (сеточной и межсеточной структуры спокойного Солнца) сильные магнитные поля преимущественно вертикальны, тогда как слабые — горизонтальны. Вертикальные децилесовые (килогауссовые) поля локализованы в сеточных областях и сконцентрированы в межгранульных слоях, а слабые горизонтальные поля вездесущи по всей поверхности Солнца и локализованы преимущественно

но в середине и на краю гранул [1, 12, 16]. Последним присущи грануляционные пространственно-временные масштабы. Согласно [6] межсеточные магнитные поля могут включать часть вертикальных деци-тесловых полей, которые не оказывают влияния на эффект Ханле и слабые поля в гранулах, деполяризующие излучение в спектральных линиях, без каких-либо следов в зеемановских линиях Fe I. Более того, из-за непрерывного характера распределения область сантитесловых (гектогауссовых) полей одновременно дает вклад в эффекты Зеемана и Ханле.

Для изучения мелкомасштабных магнитных полей спокойного Солнца используют два подхода:

- Стокс-диагностику, основанную на эффекте Зеемана [13];
- эффект Ханле деполяризации излучения [14].

Основные методы Стокс-диагностики с использованием эффекта Зеемана следующие:

- 1) метод отношения двух линий — в нем используют пары линий с разными факторами Ланде [2, 5, 13];
- 2) метод центров тяжести [5];
- 3) метод расстояния между пиками V-профилей [5];
- 4) магнитографический метод (приближение слабого поля для эффекта Зеемана [5];
- 5) инверсные методы: приближение Милна — Эддингтона [7], экспресс-инверсия [5], SIR-инверсия [9].

Но магнитографический метод непригоден для слабых и сильных полей, второй и третий метод приемлемы для сильных полей, инверсный подход Милна — Эддингтона воспроизводит усредненные вдоль луча зрения значения параметров модели и недооценивает сильные поля (свыше 0.1 Тл), тогда как SIR-инверсия неустойчива, особенно для слабых сигналов. Если сравнить диагностические возможности применяемых методов, то оказывается, что чем сложнее метод, тем хуже его результаты для мелкомасштабных полей атмосферы спокойного Солнца. Поэтому для диагностики мелкомасштабных магнитных полей мы за основу выбрали достаточно простой подход — метод отношения двух линий с дальнейшей его модификацией. Метод отношения двух линий дает достаточно высокий коэффициент корреляции между отношением амплитуд V-профилей Стокса и z-проекцией магнитного поля [2, 5]. К тому же магнитные поля спокойной фотосферы Солнца оказывают влияние и на другие параметры профилей Стокса, но корреляция все же слабее. Тем не менее, дополнительная информация о магнитных полях, имеющаяся в других параметрах профилей Стокса (не только в амплитуде V-сигнала), может быть использована при диагностике магнитных полей путем применения, например, концепции множественной регрессии, что, по-видимому, должно бы повысить качество самой диагностики.

Цель нашей работы — изучить в рамках 3D-МГД-модели пространственные вариации параметров профилей Стокса, обусловлен-

ные как мелкомасштабными магнитными полями, так и самой грануляционной структурой в спокойной фотосфере Солнца для магниточувствительных линий нейтрального железа с целью дальнейшей диагностики этих полей модифицированным нами методом отношения двух линий. Исследована возможность применения метода на случай наблюдений с высоким пространственным разрешением. Поэтому синтетические профили не подвергались влиянию шума, инструментальных эффектов и пространственного замывания. Кроме того, пространственная дискретизация рассматриваемой МГД-модели близка к разрешению современных телескопов.

В данной работе мы для исследования использовали пару линий нейтрального железа Fe I 525.02 и 524.71 нм. Обе линии имеют одно и то же значение gf , и следовательно, одинаковые глубины образования. Профили Стокса были получены путем решения уравнений переноса поляризованного излучения.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Уравнения переноса излучения. При решении задачи неравновесного переноса излучения (для нахождения неЛТР-параметров) мы использовали приближение отсутствия поляризации [10] (PFA — влияние магнитного поля на населенности уровней учтено путем модификации коэффициента поглощения в линии). А для формального решения (при известной функции источников) уравнений переноса поляризованного излучения был использован DELO-метод [8]. Уравнения переноса излучения имеют вид [4, 8]

$$\frac{d\mathbf{I}}{dz} = \mathbf{K}\mathbf{I} - \mathbf{J},$$

где \mathbf{I} — вектор параметров Стокса, \mathbf{J} — вектор полной эмиссии, \mathbf{K} — матрица полного поглощения (поглощение в линии и континууме); поглощение в линии определяется соответствующей матрицей поглощения.

Решая уравнения переноса, можно получить профили Стокса, описывающие поляризованное излучение.

Калибровочные соотношения. При воспроизведении магнитных полей по результатам наблюдений используют соответствующие калибровочные соотношения между параметрами магнитного поля, с одной стороны, и параметрами профилей Стокса наблюдаемых линий — с другой, заданные преимущественно в виде линейной регрессии. Рассмотрим построение калибровочных соотношений в виде множественной регрессии. Пусть \mathbf{X} — матрица, описывающая регрессоры (параметры профилей Стокса и их комбинации) для каждой реализации магнитного поля, \mathbf{a} — вектор коэффициентов регрессии, \mathbf{y} — вектор известных напряженностей магнитного поля. Тогда можно записать

$$y - Xa,$$

где y — вектор невязок, которые нельзя описать в рамках линейной модели. Таким образом,

$$Xa = y.$$

После минимизации функционала $y^T y + a^T a$ по a (второе слагаемое функционала ограничивает разбаланс решений, a — параметр регуляризации; его значение выбрали из условия максимума коэффициента корреляции между воспроизведенными и модельными значениями магнитного поля), мы получили уравнение для коэффициентов регрессии:

$$a = (X^T X + I)^{-1} X^T y.$$

С помощью коэффициентов регрессии легко получить простые калибровочные соотношения для экспресс-диагностики магнитных полей спокойного Солнца.

Получив, таким образом, вектор a коэффициентов регрессии и имея параметры наблюдаемых профилей Стокса, можно для каждой узловой точки модели атмосферы оценить значение магнитного поля и сравнить его с известным (теоретическим) значением.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе рассмотрено образование линий нейтрального железа Fe I 525.0 и 524.7 нм в рамках 3D-МГД-модели [12] солнечной атмосферы. В данном исследовании мы ограничились I - и V -профилями Стокса, поскольку эти профили дают наибольший отклик на магнитные поля при изучении их посредством эффекта Зеемана. В дальнейшем будем рассматривать такие параметры профилей: A — средняя (по двум пикам) амплитуда V -профиля Стокса, S — средняя площадь (без учета знака) V -профиля Стокса, hw_V — средняя полуширина V -профиля Стокса, hw_I — полуширина I -профиля Стокса (только для диагностики), z_{br} — расстояние между синим и красным пиками V -профиля Стокса.

Пространственные вариации параметров профилей Стокса.

Рассмотрим пространственные вариации параметров профилей Стокса для магниточувствительных линий нейтрального железа в спокойной фотосфере Солнца, обусловленные мелкомасштабными магнитными полями. Эти вариации в основном обусловлены сеточной структурой мелкомасштабных магнитных полей и отличающимися между собой физическими условиями в гранулах и межгранулах. Гранулы и межгранулы отчетливо видны в белом свете, поэтому конвективные ячейки логично разделять по температуре в слоях нижней фотосферы, где имеет место классическая картина конвекции [3]. В более верхних слоях из-за инверсии температуры и вертикальной скорости выпол-

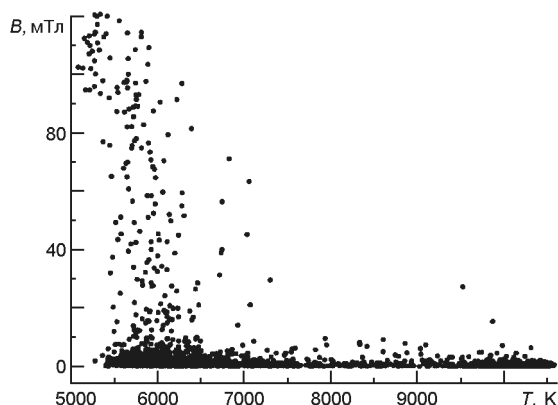


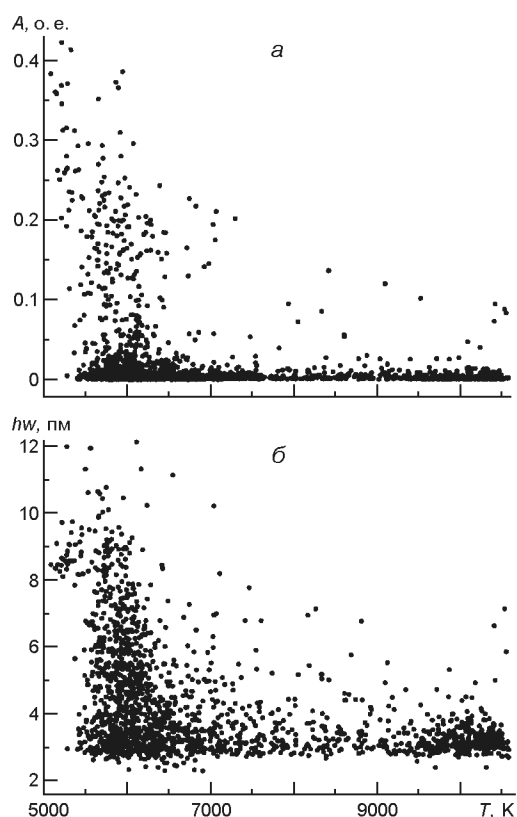
Рис. 1. Зависимость усредненной напряженности B магнитного поля от температуры T на уровне образования континуума (3D-МГД-модель)

нить такое разделение проблематично. Согласно результатам 3D-МГД-моделирования [11] конвективные движения «выметают» магнитные поля в межгранульные слои, что, наряду с действием механизма локального динамо, приводит к усилению магнитного поля. В качестве иллюстрации последнего на рис. 1 приведены значения магнитного поля, усредненные по слоям нижней и средней фотосферы (0...400 км) в зависимости от температуры на уровне образования континуума.

Как видим, в межгранульных слоях (область пониженных температур) конвекция почти на порядок усиливает магнитные поля по сравнению с полями в гранулах. Горизонтальные вариации магнитных полей в спокойной фотосфере Солнца, наряду с изменениями термодинамических и кинематических параметров фотосферы и их градиентами, оказывают существенное влияние на поляризацию и образование спектральных линий, что отражается на самих профилях Стокса. Мы рассмотрели влияние магнитного поля на вариации средней (по модулю) амплитуды, средней площади, средней полуширины и расстояния между синим и красным пиками V -профилей Стокса как наиболее чувствительных к магнитному полю параметров. Зависимости средней амплитуды A и средней полуширины hw (эти параметры дают наибольшую корреляцию с магнитным полем) от температуры на уровне образования континуума приведены на рис. 2. Зависимости для амплитуды и площади качественно похожи, поэтому в дальнейших иллюстрациях будем ограничиваться только одной зависимостью.

В межгранулах параметры V -профилей Стокса (амплитуда, площадь и полуширина) существенно усилены как магнитным полем, так и физическими параметрами и их градиентами в этих фотосферных областях. В гранулах влияние магнитного поля на эти параметры V -профилей Стокса практически отсутствует, за исключением тех случаев, когда при распаде гранулы в верхних слоях фотосферы начинают образовываться нисходящие потоки, что приводит к усилению магнитного поля.

Рис. 2. Зависимость средней амплитуды A (а) и средней полуширины hw (б) V -профилей Стокса от температуры на уровне образования континуума (3D-МГД-модель)



Поскольку в межгранулах рассматриваемые параметры V -профилей Стокса усилены не только движениями вещества и магнитными полями, но и высотными градиентами лучевой скорости вещества, а также и физическими параметрами среды, мы рассмотрели влияние самой грануляционной среды на параметры профилей Стокса. Для этого были рассчитаны пространственные вариации рассматриваемых параметров при фиксированных значениях магнитного поля $B = B_z = 16$ мТл. Полученные результаты представлены на рис. 3.

Согласно представленным результатам в межгранулах амплитуда и площадь V -профилей Стокса ослаблены, тогда как полуширины усилены. Градиенты давления и плотности (в нижних фотосферных слоях межгранул) и градиенты лучевых скоростей в межгранулах увеличены, вследствие чего ширина профилей возрастает. Поскольку в межгранулах вещество преимущественно разрежено (по отношению к гранулам) и температура в нижних слоях межгранул понижена, то амплитуда и площадь — уменьшены. В гранулах же эти параметры гораздо менее подвержены влиянию вариаций физических условий среды. Как видим, грануляционная структура оказывает модулирующее воздействие на пространственные вариации параметров профилей Стокса, причем в межгранулах глубина модуляции не менее 50%. Следовательно, влияние грануляционной структуры на профили Стокса достаточно значительное, чего нельзя не учитывать при по-

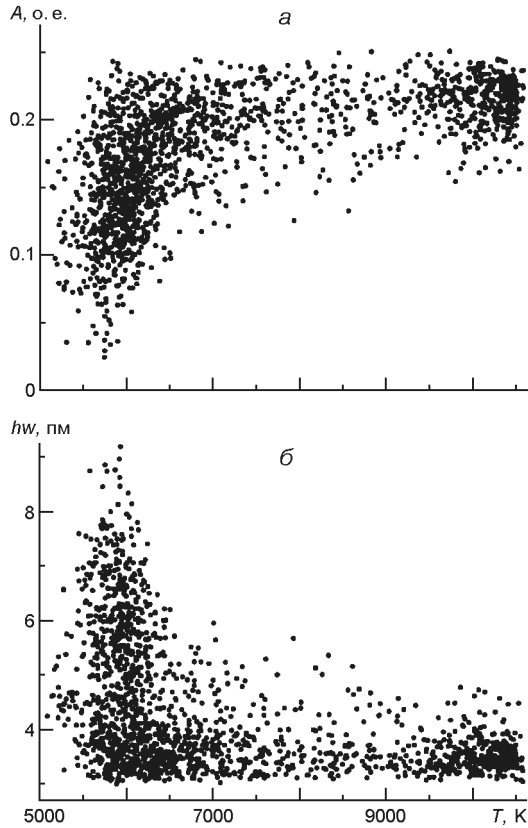


Рис. 3. Зависимость средней амплитуды A (а) и средней полуширины hw (б) V -профилей Стокса от температуры при $B = B_z = 16$ мТл на уровне образования континуума

строении калибровочных соотношений для диагностики магнитных полей, полученным по 1D-моделям.

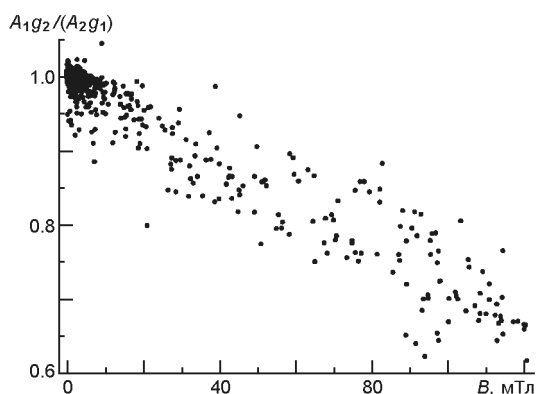
Диагностика магнитного поля: калибровочные соотношения.

В рамках подхода отношения двух линий только два параметра обеспечивают высокую корреляцию с магнитным полем — средняя амплитуда и площадь V -профилей Стокса (коэффициент корреляции -0.93 и -0.87 соответственно). Кроме того, разница средних полуширин двух линий также дает высокий коэффициент корреляции с напряженностью магнитного поля (0.85). На рис. 4 показана зависимость $A_1 g_2 / (A_2 g_1)$ для двух рассматриваемых линий нейтрального железа от напряженности B магнитного поля, усредненного по слоям нижней и средней фотосферы.

Представленная зависимость линейна и не чувствительна к грануляционной структуре солнечной фотосферы, поэтому ее часто используют в качестве калибровочного соотношения при диагностике магнитных полей фотосферы Солнца.

Так как параметры профилей Стокса рассматриваемых нами линий дают достаточно высокую корреляцию с магнитным полем, можно попытаться использовать их в качестве дополнительной информации при построении соответствующих диагностических соотношений, что могло бы улучшить достоверность воспроизведения мелко-масштабных магнитных полей по данным наблюдений.

Рис. 4. Зависимость $A_1g_2 / (A_2g_1)$ для двух рассматриваемых линий нейтрального железа от усредненной напряженности B магнитного поля (3D-МГД-модель)



Чтобы получить простые соотношения между значениями магнитного поля и данными наблюдений, мы использовали концепцию множественного регрессионного анализа. В качестве регрессоров были использованы параметры профилей Стокса и их комбинации: $A_1g_2 / (A_2g_1) - 1$, $S_1g_2 / (S_2g_1) - 1$, $hw_{V,1} / hw_{V,2} - 1$, $hw_{I,1} / hw_{I,2} - 1$, $hw_{V,1} - hw_{V,2}$, $hw_{I,1} - hw_{I,2}$, A / S (здесь g — фактор Ланде).

Регрессионная зависимость была построена для мелкомасштабных магнитных полей, усредненных по высотам от 0 до 400 км (на этих высотах образуются ядро и крылья линий). Получив описанным выше методом минимизации невязок коэффициенты регрессии \mathbf{a} и имея параметры «наблюдаемых» профилей Стокса, можно для каждой узловой точки модели фотосферы получить оценки значения магнитного поля и сравнить их с известными (теоретическими) значениями. Сравнение воспроизведенных (по параметрам профилей Стокса) значений магнитного поля с известными (по модели) данными показано на рис. 5. Ввиду того, что на всем диапазоне изменения магнитных полей средняя ошибка воспроизведения ($|B - B_{\text{мод}}|$) равна 3.1 мТл (среднее квадратичное отклонение $\sigma = 5.3$ мТл), мы не рассматривали вертикальные колонки модели с усредненными магнитными полями меньше 3 мТл. В области слабых и умеренных магнитных полей (3... 50 мТл) средняя ошибка воспроизведения меньше: 1.7 мТл ($\sigma = 2.9$ мТл). Темная сплошная линия отображает регрессионную зависимость между воспроизведенными и модельными значениями магнитного поля: $B = 0.97B_{\text{мод}} + 6.4$, а серая полоса — . Как видим, воспроизведенные магнитные поля в среднем всего лишь на 3 % ниже истинных значений.

Коэффициент корреляции между воспроизведенными и модельными значениями магнитных полей довольно высок: 0.98, причем сильные магнитные поля воспроизводятся лучше (относительная ошибка воспроизведения для них меньше), чем слабые.

Вообще говоря, интервал высот усреднения можно сузить. Естественно, коэффициенты регрессии при этом изменятся, а средняя ошибка воспроизведения увеличится. Так, при усреднении по высотам от 0 до 300 км ошибка становится равной 3.7 мТл, а для интервала усредне-

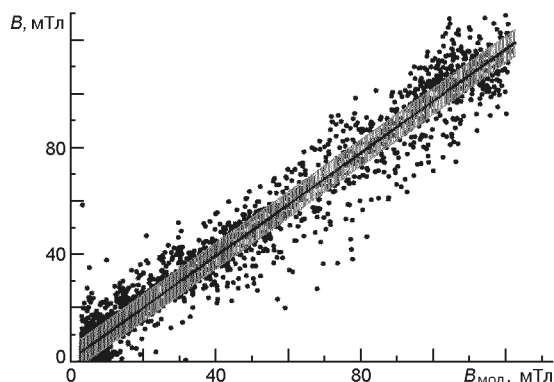


Рис. 5. Коррелятивная зависимость воспроизведенных значений магнитного поля B от известных (модельных) значений $B_{\text{мод}}$

ния от 0 до 200 км — 4.9 мТл. Полученные ошибки воспроизведения магнитных полей соизмеримы (несколько меньше) с ошибками при использовании инверсного подхода Милна — Эддингтона [7].

Важно отметить, что мы учитывали все имеющиеся профили, то есть «сильно нестандартных» профилей не отбрасывали.

ВЫВОДЫ

Мы получили решения задачи переноса поляризованного излучения в рамках 3D-МГД-модели солнечной фотосферы и определили параметры профилей Стокса для двух магниточувствительных линий Fe I 525.0 и 524.7 нм. Эти параметры были использованы для исследования их пространственных вариаций и диагностических возможностей при изучении мелкомасштабных магнитных полей спокойной фотосферы Солнца с помощью эффекта Зеемана.

Выявлен эффект модуляции параметров (амплитуда, площадь) V -профилей Стокса грануляционной структурой фотосферы Солнца — этот эффект существен преимущественно в межгранулах, где глубина модуляции достигает 50 %.

Показано, что, имея параметры I и V -профилей Стокса для двух магниточувствительных линий Fe I 525.0 и 524.7 нм, для диагностики мелкомасштабных магнитных полей спокойной фотосферы Солнца можно построить в виде множественной регрессии калибровочные соотношения, обеспечивающие коэффициент корреляции порядка 0.98.

Мы благодарны А. Нордлунду и Е. В. Хоменко за любезно предоставленные МГД-модели солнечной фотосферы.

1. Harvey J. W., Branston D., Henney C. J., et al. Seething horizontal magnetic fields in the quiet solar photosphere // *Astrophys. J. Lett.*—2007.—**659**.—P. L177—L180.
2. Khomenko E., Collados M. On the Stokes V amplitude ratio as an indicator of the field strength in the solar internetwork // *Astrophys. J.*—2007.—**659**.—P. 1726—1735.
3. Kostyk R. I., Shchukina N. G. Fine structure of convective motions in the solar photosphere: Observations and theory // *Astron. Repts.*—2004.—**48**.—P. 769—780.

4. *Landi Degl'Innocenti E.* MALIP — a programme to calculate the Stokes parameters profiles of magnetoactive Fraunhofer lines // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1976.—**25**.—P. 379—390.
5. *Landi Degl'Innocenti E., Landolfi M.* Polarization in spectral lines. — Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.—**307**.—890 p.
6. *Martinez Pillet V.* Solar surface and atmospheric dynamics. The photosphere // *Space Sci. Revs.*—2013.—**178**.—P. 141—162.
7. *Orozco Suarez D., Bellot Rubio L. R., Vogler A., Del Toro Iniesta J. C.* Applicability of Milne-Eddington inversions to high spatial resolution observations of the quiet Sun // *Astron. and Astrophys.*—2010.—**518**.—11 p.
8. *Rees D. E., Durrant C. J., Murphy G. A.* Stokes profile analysis and vector magnetic fields. II. Formal numerical solutions of the Stokes transfer equations // *Astrophys. J.*—1989.—**339**.—P. 1093—1106.
9. *Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C.* Inversion of Stokes profiles // *Astrophys. J.*—1992.—**398**.—P. 375—385.
10. *Socas-Navarro H., Trujillo Bueno J., Ruiz Cobo B.* Non-LTE inversion of Stokes profiles induced by the Zeeman effect // *Astrophys. J.*—2000.—**530**.—P. 977—993.
11. *Stein R. F.* Solar surface magneto-convection // *Living Rev. Solar Phys.* —2012.—**9**.—P. 1—51.
12. *Stein R., Lagerfjord A., Nordlund A., et al.* Solar magneto-convection simulations // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—2009.—**41**.—P. 810—826.
13. *Stenflo J. O.* Magnetic-field structure of the photospheric network // *Solar Phys.*—1973.—**32**.—P. 41—63.
14. *Stenflo J. O.* The Hanle effect and the diagnostics of turbulent magnetic fields in the solar atmosphere // *Solar Phys.*—1982.—**80**.—P. 209—226.
15. *Stenflo J. O.* Basal magnetic flux and the local solar dynamo // *Astron. and Astrophys.*—2012.—**547**, A93.—P. 1—11.
16. *Trujillo Bueno J., Shchukina N., Asensio Ramos A.* A substantial amount of hidden magnetic energy in the quiet Sun // *Nature*.—2004.—**430**.—P. 326—329.
17. *Vögler A., Schussler M. A.* Solar surface dynamo // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**465**.—P. L43—L46.

Статья поступила в редакцию 06.03.14