

УДК 523.98

## Мелкомасштабная структура магнитного поля в активных областях

*С.И. Гопасюк, О.С. Гопасюк*

Крымская астрофизическая обсерватория, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 07 июля 2003 г.

**Аннотация.** Представлены результаты исследований структуры магнитного поля активных областей вне пятен по данным наблюдений 8 дней. Наблюдения проведены с цифровым Крымским магнитографом продольного магнитного поля в трех линиях FeI 5253 Å, FeII 5234 Å и TiI 5193 Å. 84% магнитных элементов имеют размеры до 2". Самый малый размер элементов, зарегистрированных нами, составляет 0.5" и средняя напряженность поля в них ~75 Гс. Меньшую наблюдаемую напряженность поля имеют элементы в линиях FeI 5253 Å и TiI 5193 Å, большую – в FeII 5234 Å. Линия FeII 5234 Å образуется в местах повышенной температуры по сравнению с другими линиями. Построен энергетический спектр. Максимум энергии магнитного поля активной области (вне пятен) приходится на элементы размером 4 – 7". При малых размерах элементов показатель спектра близко соответствует случаю стационарной изотропной турбулентности.

SMALL-SCALE MAGNETIC FIELD STRUCTURE IN ACTIVE REGIONS, *by S.I. Gopasyuk, O.S. Gopasyuk*. We present the results of investigations of a magnetic field structure in active regions (excluding sunspots) using the observations of 8 days. The observations of the longitudinal magnetic field were made in the FeI 5253 Å, FeII 5234 Å, and TiI 5193 Å lines by means of the modern digital Crimean magnetograph. About 84% of magnetic elements had the sizes up to 2". The smallest size of the magnetic elements that we registered was 0.5" and average strength of magnetic field in them was ~75 G. The smallest field strengths show elements in the FeI 5253 Å and TiI 5193 Å lines, the stronger – in the FeII 5234 Å line. The line FeII 5234 Å formed in places with high temperature in comparison with the others. The energy spectrum was calculated. The maximum of a magnetic energy in an active region (excluding sunspots) is concentrated in the elements of sizes 4 – 7". Under small sizes of elements the index of spectrum is very close corresponded to case of stationary isentropic turbulence.

**Ключевые слова:** Солнце, активные области, магнитные поля

---

### 1 Введение

В течение последних 50 лет проводятся интенсивные исследования тонкой структуры различных образований в атмосфере Солнца. Одним из начинателей исследований в этой области был Андрей Борисович Северный. В настоящее время нет сомнений в том, что магнитные поля тонкоструктурны. Главная проблема сводится к тому, до каких размеров простирается тонкая структура.

Наблюдения, проведенные в невозмущенной области с магнитографом одновременно в двух спектральных линиях FeI 5233 Å и FeI 5250 Å, различающихся по интенсивности примерно в 5.6 раза

(Мур и др., 1966), показали различия в измеренной напряженности поля в 2 – 3 раза (Харвей, Ливингстон, 1969). Результаты по различию напряженности поля, измеренного по разным фотосферным линиям, были подтверждены на большом наблюдательном материале (Лозицкий, 1980, Гопасюк и др., 1973, Стенфло, 1973). Магнитографический метод наблюдения поля одновременно в двух линиях стал основополагающим для исследования сверхтонкой структуры поля, которая не разрешается обычными наземными наблюдениями. По таким данным в предположении, что различие в наблюдаемых напряженностях обусловлено чистым эффектом насыщения сигнала магнитографа, были построены модели мелкомасштабных элементов. Обзор таких моделей дан Соланки (1987). Однако проблема в различии напряженностей, измеренных одновременно в нескольких линиях намного сложнее (Гопасюк, 1985; Гопасюк, Северный, 1983; Семел, 1981). Оказалось, что величина измеряемого поля вне пятен зависит от эквивалентной ширины линии, а именно, чем больше эквивалентная ширина спектральной линии, формирующейся в фотосфере, тем выше измеряемая напряженность. Наибольшую напряженность показывают линии с эквивалентной шириной 330 – 480  $m\text{\AA}$  (Гопасюк, 1985).

Здесь мы приводим результаты исследования структуры магнитного поля активных областей (АО) вне пятен, какой она получается из наблюдений с быстродействующим цифровым магнитографом.

## 2 Наблюдения

Материал наблюдений был получен на быстродействующем цифровом магнитографе (Гопасюк, Залесов, 1996) Башенного солнечного телескопа. Съём информации с каждого ФЭУ проводился в течении 100 мкс с частотой 1 кГц. Параллельно с регистрацией сигналов поля записывались сигналы яркости в каждом ФЭУ. Запись сигналов калибровки проводилась посредством поворота прокалиброванной плоскопараллельной пластинки. В конце каждой записи регистрировались темновой ток и шумы ФЭУ.

Входная щель спектрографа при наблюдениях была шириной 1'' и высотой 2''. Сканирование изображения Солнца относительно щели спектрографа осуществлялось с помощью фотогида (Границкий и др., 1976) вдоль суточной параллели со скоростью 10''/. Угол между линией сканирования и нормалью к высоте щели не превышал 15°. Наблюдения каждой АО проводились поочередно в линиях FeI 5253 Å, FeII 5234 Å и TiI 5193 Å.

Линия FeI 5253 Å имеет простое магнитное расщепление, фактор Ланде  $g = 1.5$ . Эквивалентная ширина ее в центре солнечного диска составляет 75  $m\text{\AA}$ . Потенциал возбуждения нижнего уровня  $E = 3.28$  эВ. Она слабо чувствительна к температуре, в пятне несколько усиливается (Мур и др., 1966).

У линии FeII 5234 Å сложное магнитное расщепление. Средневзвешенное по интенсивности  $\sigma$ -компонент  $\langle g \rangle = 0.929$ . Потенциал возбуждения  $E = 3.22$  эВ. В центре солнечного диска эквивалентная ширина равна 81  $m\text{\AA}$ . С переходом к пятну она сильно ослабляется (Мур и др., 1966).

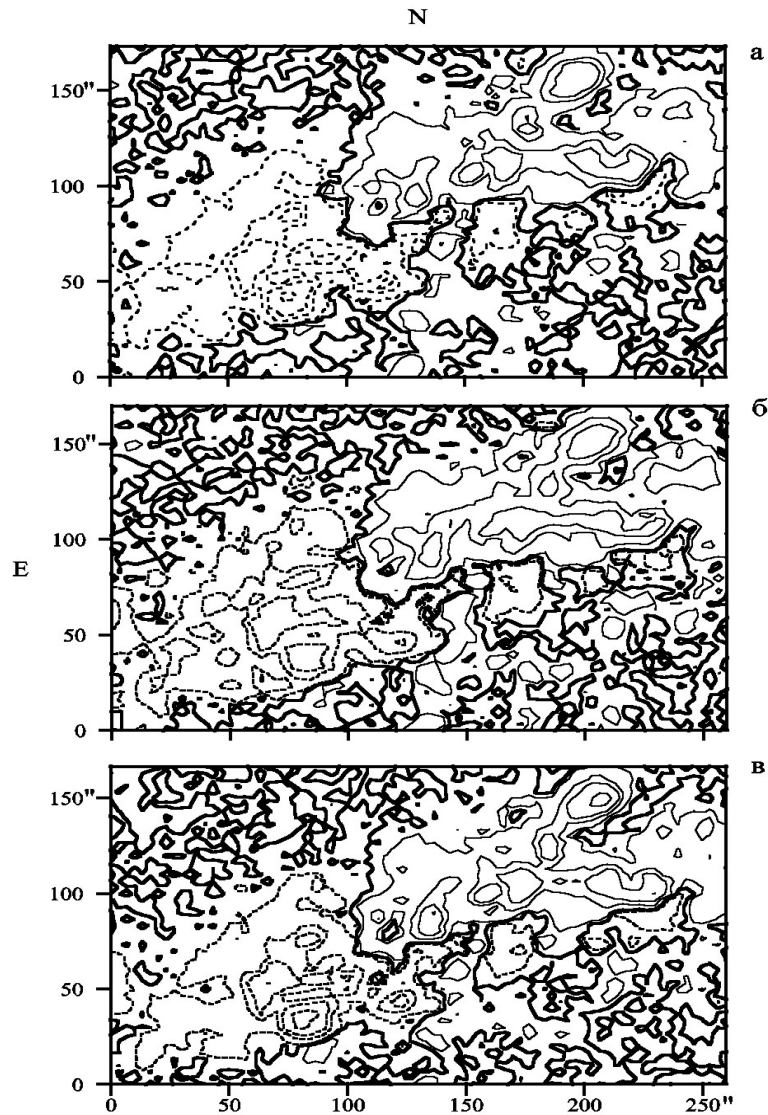
Линия TiI 5193 Å имеет простое магнитное расщепление с  $g = 1.083$ . Эквивалентная ширина этой линии 80  $m\text{\AA}$ , а потенциал возбуждения  $E = 0.02$  эВ. В пятне по сравнению с фотосферой она значительно сильнее (Мур и др., 1966).

Величина магнитного поля, при котором центры  $\sigma$ -компонент линии FeI 5253 Å сдвигались на середину щелей фотометра, соответствовала напряженности 3238 Гс.

Калибровочные кривые для перевода сигналов поля в напряженности были построены на основании фотоэлектрических записей профилей линий на двойном магнитографе (Котов и др., 1982). Метод вычисления калибровочной кривой кратко изложен ранее (Ганджа и др., 1994).

## 3 Размеры магнитных элементов

Для исследования структуры магнитного поля были отобраны записи АО вблизи центра солнечного диска с лучшим качеством изображений.



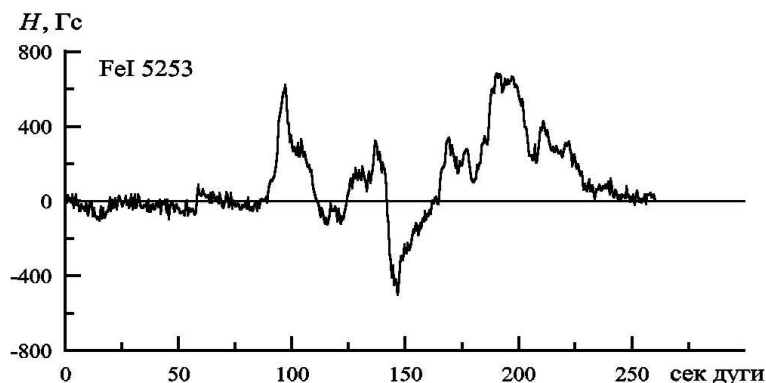
**Рис. 1.** Карты магнитного поля активной области 9.08.98. (а) – FeI 5253 Å; (б) – FeII 5234 Å; (в) – TiI 5193 Å. Жирной сплошной линией разделены области противоположных полярностей. Сплошными тонкими линиями показана S-полярность, пунктирными – N-полярность. Изолинии проведены через 100; 500; 1000; 2000 Гс

Данные усреднены по 50 периодам. На рис. 1 приведены построенные с сеткой  $3.3'' \times 3.3''$  карты, показывающие общую структуру магнитного поля АО и соответствие ее по наблюдениям в разных линиях.

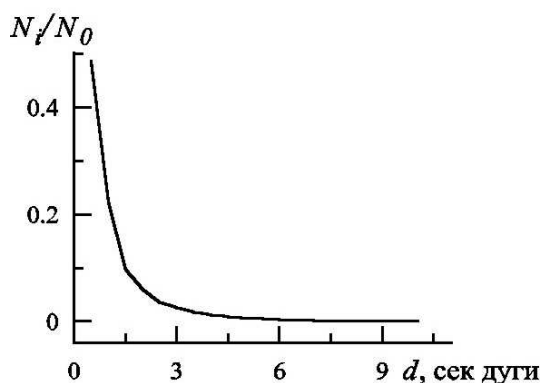
Карты не являются представительными для выделения мелкомасштабных структур.

На рис. 2 в качестве примера приведен скан через АО вне пятен, который позволяет видеть отдельные мелкомасштабные элементы.

По отдельным сканам каждой записи выделялись вне пятен элементы, поле в которых превышало среднеквадратичное отклонение в 2.5 раза и более. Определялись размеры ( $d$ ) элементов и пиковые значения поля ( $Hm$ ) в них. Для изолированных элементов за размер  $d$  бралось его значение на половине максимальной напряженности. В сложных структурах поля за размер элемента при-



**Рис. 2.** Распределение напряженности поля вдоль скана в активной области 9.08.98 г. вне пятен, измерения в линии FeI 5253 Å

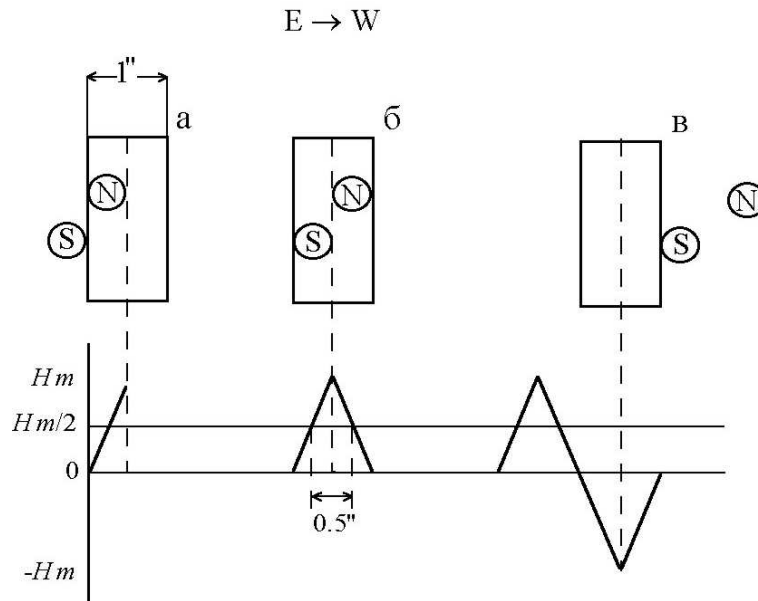


**Рис. 3.** Результирующее распределение магнитных элементов по размерам.  $N_0$  – общее число элементов по которому построено распределение

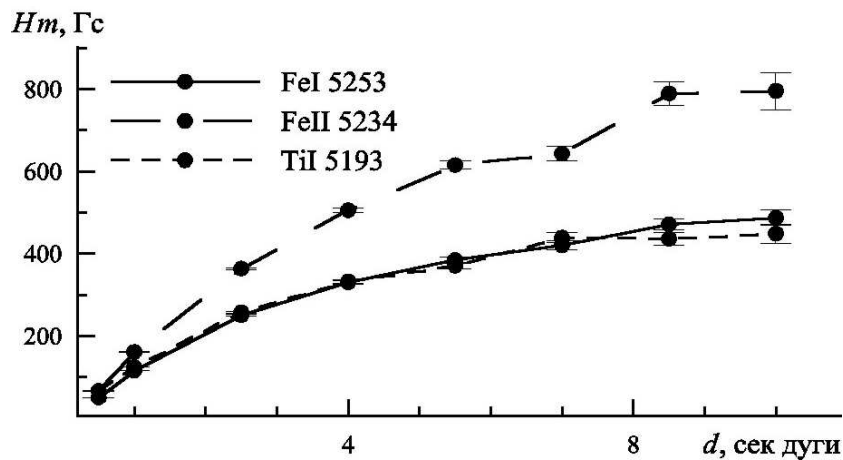
нималось расстояние между двумя соседними минимумами напряженности. Распределение числа элементов по размерам  $d$  приведено на рис. 3.

Согласно рис. 3 подавляющее большинство элементов (84% от общего числа) имеют размеры до  $2''$ . Отсутствие максимума в распределении говорит о том, что в АО имеется довольно много элементов с размерами меньше  $0.5''$ . Возникает вопрос, реальны ли размеры элементов с  $d < 2''$  при наблюдениях с разрешением  $1'' \times 2''$ . Приведем доводы, которые обосновывают их реальность. Во-первых, отношение максимальной напряженности поля в элементах к среднеквадратичному отклонению превышало в среднем 3.0. Во-вторых, на рис. 4 показано прохождение пары элементов поперечным размером  $0.5''$  каждый, но разных полярностей через щель спектрографа шириной  $1''$ . Магнитные потоки их приняты одинаковыми. При сканировании, как это показано на рис. 4, в щель спектрографа попадает сначала один элемент, например, положительный. Он

создает во временной развертке сигнал поля, приведенный на рис. 4а. Когда на щели находится пара элементов, зарегистрированный сигнал отвечает рис. 4б. После прохождения щели парой элементов сигнал поля принимает вид, показанный на рис. 4в. Ширина сигнала от каждого элемента на высоте  $Hm/2$  соответствует поперечному размеру  $0.5''$ . При прохождении по щели спектрографа одного элемента поперечным размером  $1''$ , размер элемента, который регистрируется на высоте  $Hm/2$ , оказывается равным  $1''$ . Так что размеры элементов  $0.5''$ ,  $1''$ , получаемые из наблюдений при ширине щели спектрографа  $1''$  вполне возможны.



**Рис. 4.** Схематическое представление перемещающихся в направлении  $E - W$  относительно входной щели спектрографа двух одинаковых по размерам и величине напряженности поля магнитных элементов  $N$ - и  $S$ -полярностей (вверху) и создаваемого этими элементами сигнала магнитографа (внизу). (а) – попадание в щель элемента  $N$ -полярности; (б) – попадание в щель обоих элементов; (в) – оба элемента вне щели.  $Hm$  – максимальная величина сигнала поля элемента



**Рис. 5.** Зависимость средней за все дни наблюдений максимальной напряженности поля в элементах от их размеров. Указаны вероятные ошибки

#### 4 Напряженность поля в элементах

По наблюдениям в каждой линии максимальная напряженность увеличивается с ростом размера элемента (рис. 5).

Примерно одинаковую напряженность в элементах дали наблюдения по FeI 5253 Å и TiI 5193 Å линиям, сильно различающимся по чувствительности к температуре. Поля, измеренные по линии FeII 5234 Å, существенно выше: они примерно в 1.33 – 1.60 раза превышают во всем интервале размеров  $d$  напряженности, измеренные по двум другим линиям.

Уменьшение сигнала поля магнитографа может быть связано, главным образом, с двумя причинами:

- 1) эффектом насыщения, т.е. спадом сигнала поля магнитографа с ростом напряженности поля после достижения им максимальной величины;
- 2) эффектом изменения крутизны профиля линии с переходом от мест без поля, где обычно делается калибровка, к местам с полем.

В нашем случае щели фотометра были такими, что порог насыщения сигнала поля наступал при напряженности  $\sim 3240$  Гс для FeI 5253 Å, при  $\sim 4590$  Гс для TiI 5193 Å и  $\sim 5270$  Гс для FeII 5234 Å. Вероятно, приведенные значения поля очень велики, чтобы принимать во внимание эффект насыщения при наблюдениях в этих линиях.

Для установления второго эффекта были проведены фотоэлектрические записи профилей линий в центральной зоне солнечного диска. Регистрация профилей линий выполнена в левой и отдельно в правой круговой поляризациях при щели спектрографа  $1'' \times 2''$ . Учет поправочных коэффициентов уменьшил различия в напряженности полей. В результате, в темных образованиях (с пониженной температурой – наблюдения в линии TiI 5193 Å) напряженность поля близка к той, что и в ярких структурах (а следовательно, более горячих – наблюдения в FeII 5234 Å), но в ярких образованиях напряженность поля выше, чем в местах образования линии FeI 5253 Å.

## 5 Энергетический спектр магнитного поля

По данным, приведенным на рис. 3 и рис. 5, построен спектр, который дает величину энергии магнитного поля АО, заключенной в каждом структурном масштабе (Гопасюк, 2000):

$$W(d) = \frac{H^2(d)}{32} d^2 \frac{N_i}{N_0}(d) \quad (1)$$

Спектр имеет размерность эрг/см. Форма элементов взята круглой, толщина слоя по вертикали 1 см.

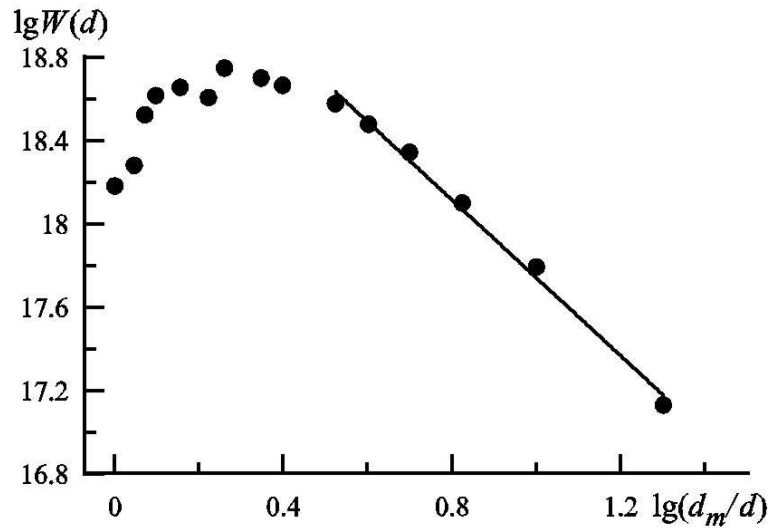
На основании выражения (1) и данных рис. 3 и рис. 5 для линии FeI 5253 Å построена зависимость  $\lg W(d)$  от  $\lg(d_m/d)$  при  $d_m = 10''$  (рис. 6).

Рис. 6 показывает спектр подобный спектру стационарной изотропной турбулентности (Ландау, Лифшиц, 1954; Таунсенд, 1959). Наибольшая величина энергии в АО приходится на элементы размером 4 – 7''. В области размеров от 0''5 до 3'' данные наблюдений располагаются практически на прямой, коэффициент наклона которой равен  $k = -1.87$  (Гопасюк, 2000). Это значение близко к  $k = -5/3$ , которое характерно для стационарной и изотропной турбулентности (Кадомцев, 1976; Ландау, Лифшиц, 1954; Таунсенд, 1959).

Наблюдениями пока не установлен нижний предел размера магнитных элементов. Несомненно, этот предел меньше 0''5, ибо распределение числа магнитных элементов по размерам не имеет максимума и число их наибольшее при 0''5 (Гопасюк и др., 1999). В стационарном случае равновесное состояние по числу элементов должно установиться для размеров, для которых число образовавшихся элементов за счет генерации мелкомасштабных и распада более крупных не сравняется с числом исчезающих в результате магнитной вязкости.

## 6 Заключение

Наблюдения показали, что быстродействующий магнитограф позволяет регистрировать элементы, размеры которых меньше ширины входной щели спектрографа. Большинство из них  $\sim 84\%$  имеют размеры до 2''. Наибольшее число элементов  $\sim 46\%$  от общего числа приходится на размер 0.5 – 1''. Число элементов с размерами больше 3'' невелико, они приходятся, как правило, на области сильных магнитных полей и, вероятно, состоят из более мелких образований.



**Рис. 6.** Распределение магнитной энергии по размерам магнитных элементов в активной области в зависимости от обратной величины размера элементов  $d_m/d$ ,  $d_m = 10''$ . Шкалы по обеим осям логарифмические. Распределение построено по 8 сериям наблюдений активных областей в линии FeI 5253 Å

Характерным процессом эволюции солнечных магнитных полей является, как показывают наблюдения (Гопасюк, 1967; Ермакова, 1982; Стенфло, 1979; Гокхале, Зваан, 1972), распад крупномасштабных структур на более мелкие образования. Распад магнитных структур на мелкомасштабные образования может происходить за счет различных магнитогидродинамических неустойчивостей, в частности, токово – конвективной или перегревной неустойчивости или, как это было предположено Пиддингтоном (1975а,б), под действием желобковой неустойчивости. Однако далеко не ясно, до каких размеров идет процесс распада магнитных структур. Отсутствие максимума в распределении на рис. 3, а число элементов с размером  $0.5 - 1''$  наибольшее, дает основание полагать, что имеется довольно много магнитных элементов с меньшими размерами. Процесс распада магнитных структур на мелкомасштабные из-за магнитогидродинамической неустойчивости – процесс довольно быстрый. Максимальная величина энергии магнитного поля АО приходится на элементы размером  $4 - 7''$ . Энергетический спектр в области элементов размером от  $0.5$  до  $3''$  отвечает случаю стационарной и изотропной турбулентности. Магнитный поток, зарегистрированный нами по линии FeI 5253 Å в самых малых элементах равен  $4 \cdot 10^{17}$  Мкс.

Наименьший размер элементов установится за счет процессов диффузии поля. Надо полагать, что время жизни мелкомасштабных элементов определяется временем диффузии поля, а следовательно, временем затухания электрического тока. Время затухания магнитного поля или электрического тока отдельного элемента размером  $d$

$$t = \frac{4\pi d^2}{c^2} \sigma,$$

где  $\sigma$  – электропроводимость плазмы.

Размеры элементов не могут быть чрезмерно малы. Так при классическом значении электропроводности в фотосфере  $\sigma \simeq 10^{11}$  cgs (Копецкий, 1971) и  $d \simeq 200$  км  $t \simeq 1.6$  суток, а время жизни элемента размером  $d \simeq 20$  км составит всего лишь 0.4 часа. В неоднородной плазме, особенно такой как фотосферная, при наличии электрических токов возможны различного вида плазменные колебания. В этом случае электропроводность плазмы понизится за счет турбулентности на 1 – 2 порядка (Кадомцев, 1976). Время жизни элементов размером 200 км в результате уменьшится до 0.4 часа, а элементов размером 20 км – до 15 с. В связи с этим встает очень остро проблема генерации магнитных полей.

Измеряемая напряженность фотосферного поля в АО вне пятен зависит от используемой спектральной линии. В линиях ионизованных элементов, которые сильно ослабляются в пятне (FeII 5234 Å), напряженность поля оказалась наибольшей. Линия TiII 5193 Å, сильно усиливающаяся в пятне дает скорее всего промежуточную напряженность поля. Самую низкую напряженность поля показывают наблюдения в линии нейтрального железа FeI 5253 Å, которая незначительно усиливается в пятне. Если напряженности поля такие как они измеряются, то в ярких структурах, а следовательно более горячих (FeII 5234 Å), напряженность поля наибольшая. В наиболее темных, самых холодных местах, в которых предпочтительнее образуется линия TiII 5193 Å, напряженность поля ниже. Но она выше, чем в среднем по участку промежуточной яркости, отвечающей образованию FeI 5253 Å.

## Литература

- Ганджа С.И., Гопасюк С.И., Тарасова Т.Н. // Кинематика и физика небес. тел. 1994. Т. 10. N. 4. С. 36.
- Гокхале, Зваан (Gokhale M.H., Zwaan C.) // Solar Phys. 1972. V. 26. N. 1. P. 52.
- Гопасюк С.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1967. Т. 36. С. 56.
- Гопасюк С.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1985. Т. 72. С. 159.
- Гопасюк С. И. // Кинематика и физика небес. тел. 2000. Т. 16. N. 2. С. 138.
- Гопасюк С. И., Гопасюк О. С., Залесов И. П., Каркач Д. В., Свистельников В. В., Шаховская А. Н. // Кинематика и физика небес. тел. 1999. Т. 15, N. 3. С. 243.
- Гопасюк и др. (Gorasyuk S.I., Kotov V.A., Severny A.B., Tsap T.T.) // Solar Phys. 1973. V. 31. N. 2. P. 307.
- Гопасюк С.И., Залесов И.П. // Кинематика и физика небес. тел. 1996. Т. 12. N. 5. С. 48.
- Гопасюк С.И., Северный А.Б. // Письма в Астрон. Журн. 1983. Т. 9. N. 2. С. 120.
- Границкий Л.В., Границкая Л.А., Дидковский Л.В., Никулин Н.С. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 56. С. 181.
- Ермакова Л.В. // Исследования по геомагнетизму, аэроном. и физ. Солнца. 1982. N. 62. С. 257.
- Кадомцев Б.Б. // Коллективные явления в плазме. М.: Наука. 1976.
- Копецки (Korecky M. T.) // Bull. Astron. Inst. Czech. 1971. V. 22. N. 6. P. 343.
- Котов В.А., Северный А.Б., Цап Т.Т. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1982. Т. 65. С.3.
- Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. // Теоретическая физика. Механика сплошных сред. М.: ГИТТЛ. 1954.
- Лозицкий В.Г. // Phys. Solariterr. 1980. N. 14. P. 88.
- Мур и др. (Moore Ch.E., Minnaert M.G.J., Houtgast J.) // The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å. Washington. 1966.
- Пиддингтон (Piddington J.H.) // Astrophys.Space Sci. 1975. V. 34. N. 2. P. 347.
- Пиддингтон (Piddington J.H.) // Astrophys.Space Sci. 1975. V. 35. N. 2. P. 269.
- Семел (Semel M.) // Astron. and Astrophys. 1981. V. 97. N. 1. P. 75.
- Соланки (Solanki S.K.) // 10th European Regional Astronomy Meeting of the IAU 1987. The Sun. Proceeding. V. 1. / Eds. Hejna L., Sobotka M. 1987. P. 95.
- Стенфло (Stenflo J.O.) // Solar Phys. 1973. V. 32. N. 1. P. 41.
- Стенфло Дж.О. // Мелкомасштабные магнитные поля на Солнце. Проблемы солнечной активности Ред. Бумба В., Клечек И. М: Мир. 1979.
- Таунсенд А.А. // Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом. М.: ИИЛ. 1959.
- Харвей, Ливингстон (Harvey J.W., Livingston W.) // Solar Phys. 1969 V. 10. N. 2. P. 283.