

УДК 523.947-17/337

## О СОПОСТАВЛЕНИИ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫСОТНОЙ СТРУКТУРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ДАННЫМИ МОДЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ

© 2009 В. М. Богод<sup>1</sup>, Л. В. Яснов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории, Санкт-Петербург, 196140 Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

Поступила в редакцию 27 февраля 2009 г.; принята в печать 7 апреля 2009 г.

В данной работе используются выполненные на радиотелескопе РАТАН-600 многоволновые наблюдения поляризованного излучения активных областей в микроволновом диапазоне для развития метода определения структуры магнитного поля этих областей на корональных высотах. Магнитные поля напряженностью около 1000 Гаусс наблюдаются на достаточно больших высотах в атмосфере Солнца (от 10 до 25 Мм). Это хорошо подтверждается наблюдениями магнитных петель в ультрафиолетовой области спектра, а также согласуется с предыдущими радиоастрономическими измерениями магнитного поля на уровне переходной области и соответствует, в рамках дипольной модели магнитного поля, вертикальным градиентам фотосферного магнитного поля.

Ключевые слова: *радиоисточники*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Величина и структура магнитного поля короны играет ключевую роль в генерации эруптивных явлений, например, корональных выбросов массы, вспышек и эруптивных протуберанцев. К сожалению, прямое измерение величины магнитного поля в короне является чрезвычайно трудным. Можно использовать поляризацию эмиссионных корональных линий, чувствительных к магнитному полю, чтобы сделать выводы о магнитном поле в короне. Эти линии, однако, очень слабы и число их наблюдений невелико (см., например, [1–4]). Несмотря на этот способ, мы оказываемся перед фактом, что в настоящее время и, вероятно, также в ближайшем будущем высококачественные прямые измерения магнитного поля короны оптическими методами малодоступны. Как альтернатива вышеупомянутому методу, многими авторами поле короны моделируется экстраполяцией измерений магнитного поля фотосферы. Делается это, как правило, на основе потенциального и бессилового (линейного и нелинейного) приближения. К сожалению, потенциальные и линейные бессиловые поля не содержат свободную энергию и недостаточно хорошо отражают условия во вспышечно-активной области. Однако нелинейное бессиловое поле может диссипировать к линейному бессиловому полю. Нелинейное бессиловое поле имеет свободную

энергию, необходимую для вспышки. С наблюдательной точки зрения нелинейная реконструкция является более сложной, потому что требуются измерения на вектор-магнитографе. Но обычно трансверсальный компонент магнитного поля фотосферной области измеряется с существенно более низкой точностью, чем компонент вдоль луча зрения. Дополнительная проблема состоит в том, что направление трансверсального магнитного поля известно с точностью 180 градусов. В 90-е годы в радиоастрономии активно разрабатывался метод стереоскопических высотных измерений в наблюдениях на VLA на отдельных волнах преимущественно в дециметровом диапазоне [5, 6]. Было показано, что высоты радиоисточников на волне 20 см могут достигать  $25 \pm 15$  Мм.

Аналогичный метод применялся для анализа трехмерной структуры радиоисточников в диапазоне 12–14 ГГц (в обсерватории OVRO) и были измерены высоты радиоисточников, достигавшие 3.3–11.0 Мм [7].

Мы продолжаем развивать метод стереоскопических высотных измерений, комбинируя его с многочастотными изображениями радиоисточников в поляризованном излучении в широком частотном диапазоне. Это позволяет строить детальную высотную структуру магнитных полей в активных областях на уровнях нижней и средней короны. Высоту коронального магнитного поля можно

определять сопоставлением скорости перемещения данного пятна на уровне фотосферы со скоростью перемещения поляризованного радиоисточника микроволнового излучения. При одновременной регистрации поляризованного излучения на многих волнах появляется возможность построения вертикальной структуры магнитного поля над пятном.

Исследование высотной структуры магнитного поля над пятном в диапазоне высот в несколько тысяч километров представляет собой трудную техническую задачу для других диапазонов волн, включая рентгеновский и ультрафиолетовый. Однако этот высотный диапазон весьма важен при исследовании условий зарождения вспышек, и особенности магнитной структуры здесь вызывают особый интерес.

Ранее подобные попытки измерения магнитных полей на этих высотных уровнях по радиоданным предпринимались также в работах [8–12]. Однако они выполнялись на ограниченном числе длин волн, что не позволяло построить достаточно полную структуру магнитного поля на больших высотах в солнечной атмосфере.

В работе [10] величина напряженности магнитного поля, измеренная для поляризованных источников над пятнами, была сопоставлена с точными измерениями на фотосфере и показано, что напряженность падает всего на 20%. В [10] были использованы наблюдения на пяти длинах волн сантиметрового диапазона РАТАН-600. Оценки магнитного поля проводились в предположении излучения на 3-й гармонике гирочастоты при циклотронном механизме излучения.

Результаты, приведенные в данной работе, получены с использованием значительно большего числа длин волн (56) на спектрально-поляризационном комплексе [13] с частотным разрешением 1–3%. С одной стороны, это дает уникальную возможность более детально изучить структуру магнитного поля, а с другой, увеличивает надежность определения такой структуры. Принципиальным отличием предлагаемой методики расчета магнитного поля активных областей является возможность изучения геометрической структуры силовой трубки магнитного поля, излучающей в микроволновом диапазоне.

## 2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Для определения структуры магнитного поля мы воспользовались сканами в поляризованном излучении активных областей. Сканы диска Солнца выполняются на РАТАН-600 с высокой координатной точностью, что позволяет применить их для детального изучения высотной структуры

излучения радиоисточников. Применяемая методика регистрации поляризованного радиоизлучения допускает одновременный прием как интенсивности  $I = I(R) + I(L)$ , так и параметра Стокса  $V = I(R) - I(L)$ . В наших измерениях регистрацию круговой поляризации по сравнению с интенсивностью излучения использовать более удобно, поскольку, с одной стороны, она соответствует магнитным структурам обеих полярностей, с другой — устраняется в некоторой степени влияние на результат мешающего действия соседних структур попадающих в диаграмму направленности.

В результате обработки сканов Солнца мы получили частотную зависимость изменения положения исследуемой детали активной области в поляризованном излучении с изменением даты и времени наблюдения. В этом исследовании мы анализировали данные наблюдений последовательно в течение двух дней. Для стабильных активных областей (АО) можно использовать и более длинные временные интервалы (несколько дней).

Метод включает достаточно громоздкие тригонометрические вычисления, учитывающие особенности вращения Солнца и прохождения диаграммы радиотелескопа через активную область (см. Рис. 1). Используя гелиошироту  $\varphi$  измеряемой детали АО, мы рассчитали положение этой детали на солнечном диске в координатной системе радиоскана  $x_{theor}(h, \lambda, t_i)$ . При этом мы использовали следующую известную зависимость гелиодолготы источников на фотосфере от времени:

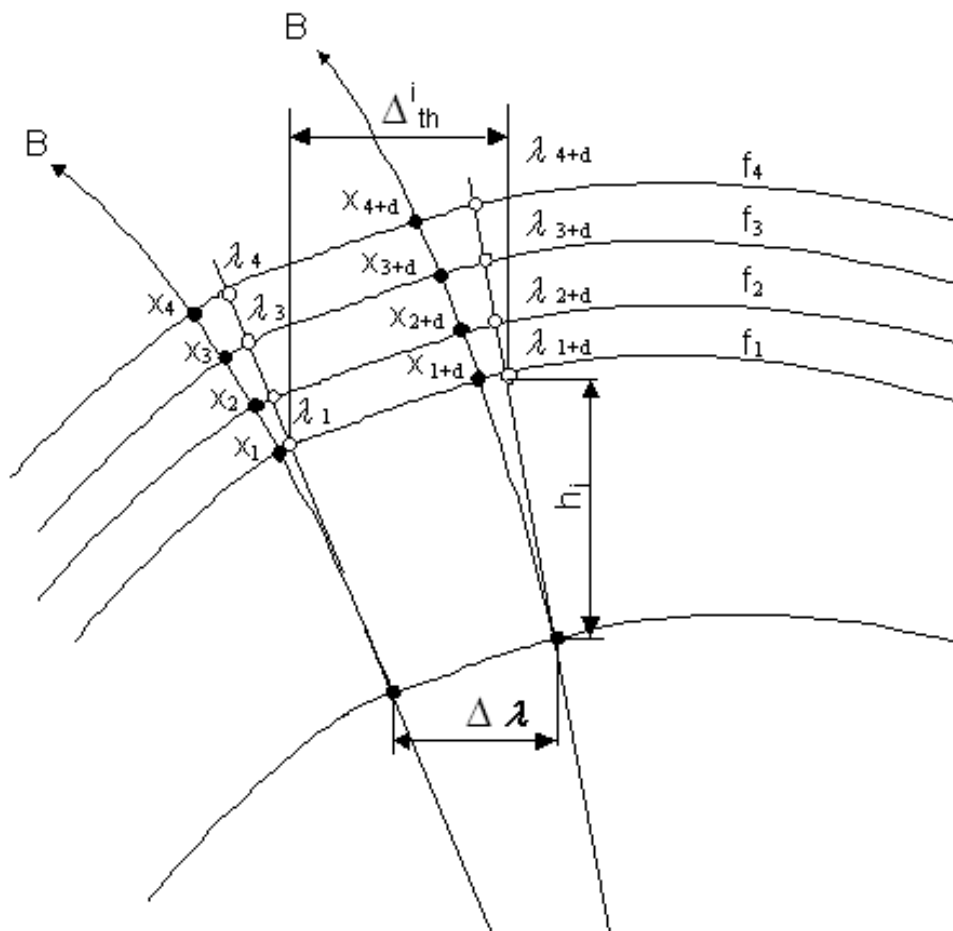
$$\lambda(t_i) = (14.35 - 2.77 \sin^2 \varphi - 0.9856)t_i + \lambda, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — некоторая постоянная долгота, характеризующая положение источника. Была произведена проверка соответствия этой зависимости реальному положению исследуемых деталей активных областей. Во всех рассмотренных ниже случаях в пределах погрешностей определения координат это соответствие выполнялось с высокой точностью. Далее на каждой частоте  $f_k$  мы минимизировали выражение:

$$\sum_{i=1}^N (x_{theor}(h_k, \lambda_k, t_{k_i}) - x_{exp}^k(t_i))^2, \quad (2)$$

где  $x_{exp}^k(t_i)$  — положение выбранной детали источника на радиоскане на частоте  $f_k$ ,  $N$  — число используемых рядов данных (в данной работе  $N = 2$ ), и получали величины  $h_k$  и  $\lambda_k$ .

Соотношение частоты и напряженности магнитного поля над данным пятном определялось по соответствию поляризованного радиоизлучения третьей гармонике гирочастоты  $\omega = 3\omega_H$ . Спектрально-поляризационные измерения на РАТАН-600 позволяют надежно определять для данной активной области спектр степени поляризации и знак поляризованного излучения и сопоставлять их с результатами фотосферных измерений



**Рис. 1.** К объяснению методики измерений. Представлено вертикальное сечение диска Солнца и нижней короны. Здесь:  $\Delta\lambda$  — перемещение пятна по долготе,  $h_k$  — высота радиоисточника,  $\lambda_k$  — расчетные долготы радиоисточников,  $x_k$  — измеряемые долготы радиоисточников,  $f_k$  — радиоизлучающие уровни солнечной короны, соответствующие третьей гармонике гирочастоты.

магнитного поля на космическом аппарате SOHO MDI. Для примера рассмотрим Рис. 2–4. На Рис. 2 приведены магнитограммы активных областей АО NOAA 10933 и АО NOAA 10934 по данным SOHO MDI в течение трех дней 6, 7 и 8 января 2007г. На Рис. 3 представлены многоволновые радиосканы Солнца, которые совмещены за два соседних дня 7 и 8 января 2007г. На Рис. 4а приведены в одинаковом масштабе сканы АО NOAA 10933 на волне 1.98 см для двух дней 7 и 8 января 2007г., а далее — спектры потока интенсивности излучения (б), спектры потока поляризованного излучения (с) и спектры степени поляризации (д). Подобная процедура проводилась и для активной области АО NOAA 10934. Анализ данных, приведенных на этих рисунках, указывает на:

1) стабильную структуру обеих активных областей в фотосфере;

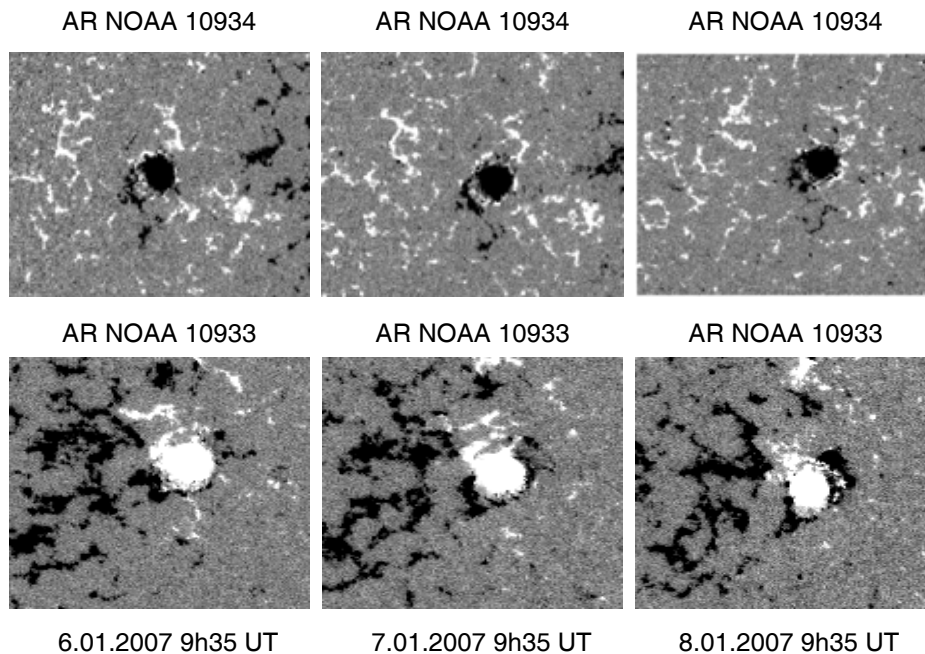
2) их стабильную структуру в широком диапазоне радиоволн;

3) высокую степень поляризации, достигающую 50–100% в диапазоне 10–18 ГГц на примере АО NOAA 10933;

4) излучение радиоисточника АО NOAA 10934 имеет правую поляризацию, тогда как для радиоисточника АО NOAA 10933 поляризация левая.

Эти характеристики соответствуют преимущественному излучению избытка необыкновенной волны в диапазоне 10–18 ГГц. На более низких частотах в диапазоне 6–10 ГГц степень поляризации падает, что объясняется проникновением обыкновенной волны 2-й гармоники гирочастоты на уровень корональных температур.

Для высотных измерений магнитного поля мы использовали два наблюдения Солнца в режиме сканирования его диаграммой направленности радиотелескопа последовательно в течение двух дней. При этом собирающее зеркало радиотелескопа устанавливалось в меридиане (азимут равен 0 градусов). Наилучшие результаты достигались при фиксированном положении фокусирующего



**Рис. 2.** Двумерное изображение двух относительно стабильных магнитных структур в фотосфере по данным SOHO/MDI в течение трех дней.

зеркала в течение двух дней. Однако на практике фокусирующее зеркало в течение суток смещается по дуговым рельсам [14] для решения других наблюдательных задач. Это приводит к тому, что собирающее зеркало радиотелескопа сдвигается с точки первого измерения и с некоторой неконтролируемой погрешностью (в несколько угловых секунд) устанавливается снова в меридиане. Из-за ошибок установки облучателя в фокус возможно появление систематической погрешности в определении абсолютного значения высоты по данному методу. Для сведения этой погрешности к минимуму и получения однородных данных необходимо найти привязку наших спектральных измерений к независимым измерениям высоты магнитного поля. Для таких опорных измерений использовались данные фотосферных измерений спутника SOHO MDI. Процедура привязки основана на модельной экстраполяции магнитного поля в рамках дипольного приближения, предложенной в [15]:

$$B = B_0 / (1 + h/d)^3, \quad (3)$$

где  $B_0$  — напряженность магнитного поля на уровне фотосферы,  $d$  — глубина диполя под фотосферой, равная радиусу пятна ( $d \approx r$ ),  $h$  — высота над фотосферой. Здесь  $B_0$  и  $r$  данные измерений, полученные по SOHO MDI магнитограммам.

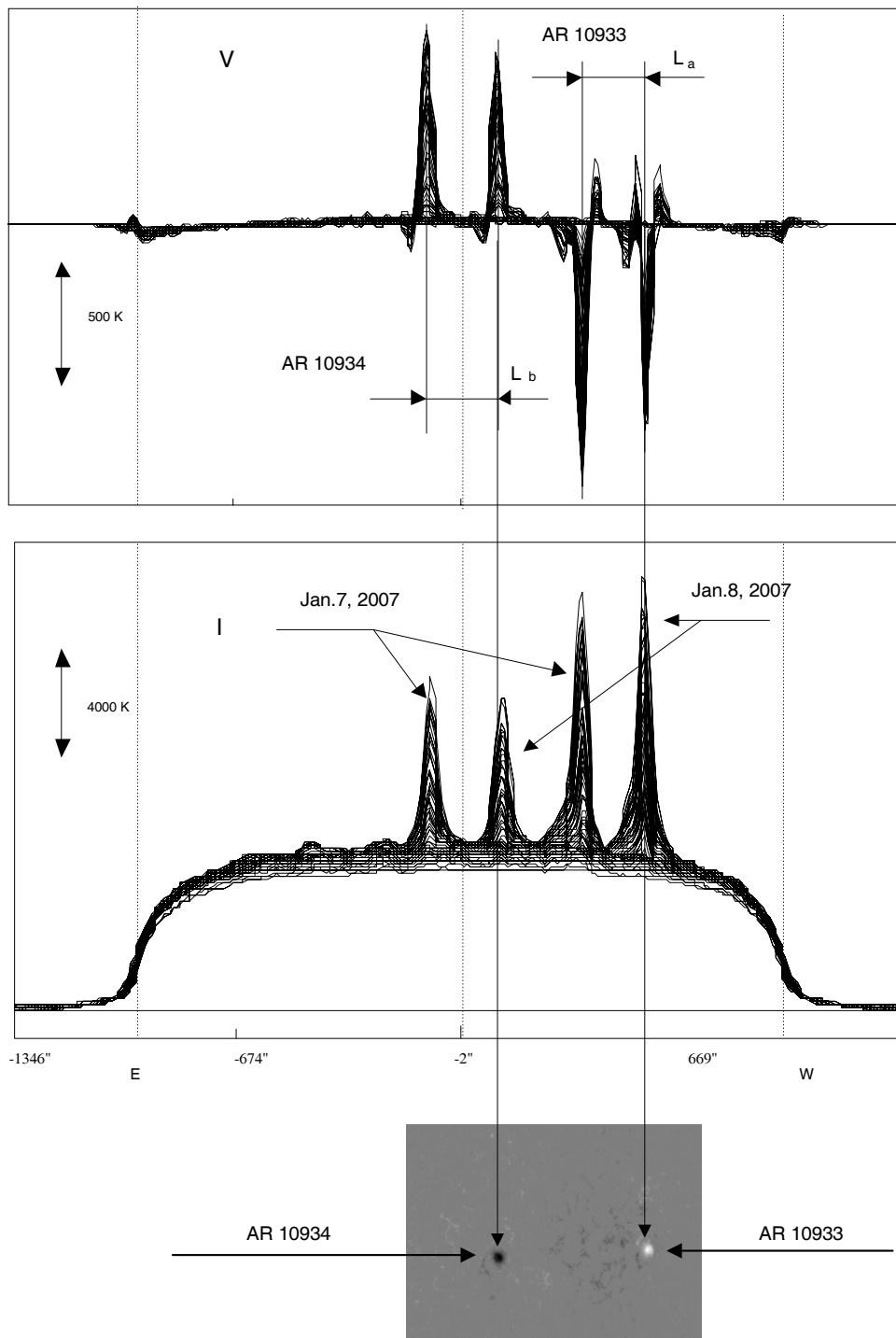
Далее по поляризационным наблюдениям источника над пятном на наибольшей частоте определяем величину магнитного поля по радиоизлучению в наиболее низкой для данной структуры точке  $B_R$ . По данным  $B_0$ ,  $B_R$  и  $d \approx r$  определяем по

формуле (3) высоту  $h_r$ . Такие измерения делались в течение двух соседних дней, и вычислялась средняя высота. Разброс в определении указан на Рис. 5–9 в виде вертикальной черты в точке максимального магнитного поля. Практически во всех случаях, как это видно из рисунков, он был незначительным.

Следует отметить, что благодаря широкому перекрытию по частотному диапазону, большому количеству одновременно регистрирующих каналов и хорошему частотному разрешению, получаемый высотный профиль сохраняет свою структуру независимо от точности установки собирающего зеркала. Описанная выше привязка высотного профиля с использованием модельной экстраполяции и измерений на оптических магнитографах значительно приближает результаты измерения к оптическим в единой шкале. Естественно, на точность измерений влияют также ошибки, связанные с точностью знания антенных и частотных характеристик приемной системы, но они достаточно малы по сравнению с изменениями, возникающими из-за собственного движения пятен. Такие движения характерны для активных областей в период активной фазы и малы для стабильных невопшечных областей.

#### Основные достоинства метода

- Возможность получения мгновенного спектра поляризации на многих частотах.
- Высокая внутренняя сходимость метода для стабильных структур.



**Рис. 3.** Многоволновые радионаблюдения Солнца на РАТАН-600. Сканы за 7 и 8 января 2007г. совмещены, как для каналов интенсивности (параметр Стокса I, внизу), так и (вверху) для каналов поляризации (параметр Стокса V) на следующих волнах: 1.84 см, 1.93 см, 1.98 см, 2.00 см, 2.02 см, 2.05 см, 2.08 см, 2.11 см, 2.13 см, 2.16 см, 2.20 см, 2.23 см, 2.26 см, 2.28 см, 2.32 см, 2.39 см, 2.43 см, 2.47 см, 2.51 см, 2.54 см, 2.58 см, 2.63 см, 2.67 см, 2.72 см, 2.76 см, 2.81 см, 2.87 см, 2.90 см, 2.96 см, 3.02 см, 3.08 см, 3.14 см, 3.21 см, 3.27 см, 3.35 см, 3.40 см, 3.48 см, 3.55 см, 3.64 см, 3.73 см, 3.81 см, 3.91 см, 4.02 см, 4.10 см, 4.21 см, 4.32 см, 4.45 см, 4.73 см, 5.02 см. Здесь:  $L_a$  — суточное перемещение АО NOAA 10933,  $L_b$  — суточное перемещение АО NOAA 10934.

- Возможность определения наклонного профиля магнитного поля.

### Основные ошибки метода

- Ошибки наведения луча диаграммы.
- Аберрационные ошибки вследствие выноса из фокуса, зависящие от длины волны.
- Ошибки, связанные с переменностью измеряемых источников.
- Для измерений в одной шкале с оптически данными необходимы привязки одной из точек спектра.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

Определение вертикальной структуры магнитного поля мы проводили в период минимума солнечной активности, при котором характерно присутствие относительно стабильных одиночных активных областей. В качестве примера такой магнитной структуры продолжим рассмотрение активных областей АО NOAA 10933 и 10934, представленных на Рис. 2, которые наблюдались 6, 7 и 8 января 2007г. Что касается развитых активных областей, в них часто происходят значительные перемещения во времени, что делает предлагаемый метод трудно реализуемым.

На Рис. 3 показаны радио наблюдения Солнца в интенсивности излучения (нижний рисунок) и круговой поляризации (верхний рисунок) совместно для 7 и 8 января 2007г. На диске регистрировались обе активные области AR NOAA 10933 (западная) и следующая за ней AR 10934. Эти области были близки по интенсивности радиоизлучения, но различались по знаку поляризации, который соответствовал избытку излучения необыкновенной волны. В каналах V показаны смещения радиоисточников  $L_a$  и  $L_b$  по диску Солнца за одни сутки для обеих областей.

Приведем результаты расчетов структуры магнитного поля этих активных областей по многоволновым радионаблюдениям для этого периода. Напряженность магнитного поля получена в предположении, что излучение возникает на третьей гармонике гирочастоты  $\omega = 3\omega_H$ . Как показывают многочисленные модельные расчеты, именно на этой гармонике наиболее эффективно генерируется микроволновое излучение активных областей (см., например, [16–18]).

На Рис. 5 представлены результаты измерений высотной структуры поля для АО NOAA 10933. На левых рисунках напряженность магнитного поля

в Гауссах рассчитана для излучения на третьей гармонике гирочастоты  $\omega = 3\omega_H$ .

Для расчетов высот магнитного поля для каждой длины волны мы использовали смещения положения измеренного максимума поляризованного радиоисточника от расчетного положения за время, равное одним суткам. По оси ординат отложены результаты высотных измерений, которые получены с использованием формул (1) и (2). В наших измерениях мы регистрируем яркую центральную часть поляризованного радиоисточника и связываем его положение с максимальной величиной магнитного поля на данной длине волны. При этом, по многоволновым наблюдениям можно рассчитать положения радиоисточника на следующий день и сопоставить это расчетное положение с измеренным. Вновь обратимся к Рис.4(с). Экстраполяция высокочастотного спада потока поляризованного излучения на  $V = 0$ , в соответствии с методикой, описанной в [10], определяет максимальную величину магнитного поля пятна, которое проникает в область корональных температур.

Для АО NOAA 10933 оценка максимальной величины магнитного поля в короне по 3-й гармонике гирочастоты дает 1960 Гс, а оценка магнитного поля на уровне фотосферы по данным магнитографа SOHO MDI дает величину 2440 Гс. Т.е. величина поля по данным микроволновых наблюдений всего лишь на 19.5% меньше полученной по оптическим данным. Таким образом, оценки, сделанные в ранней работе [10], подтверждаются.

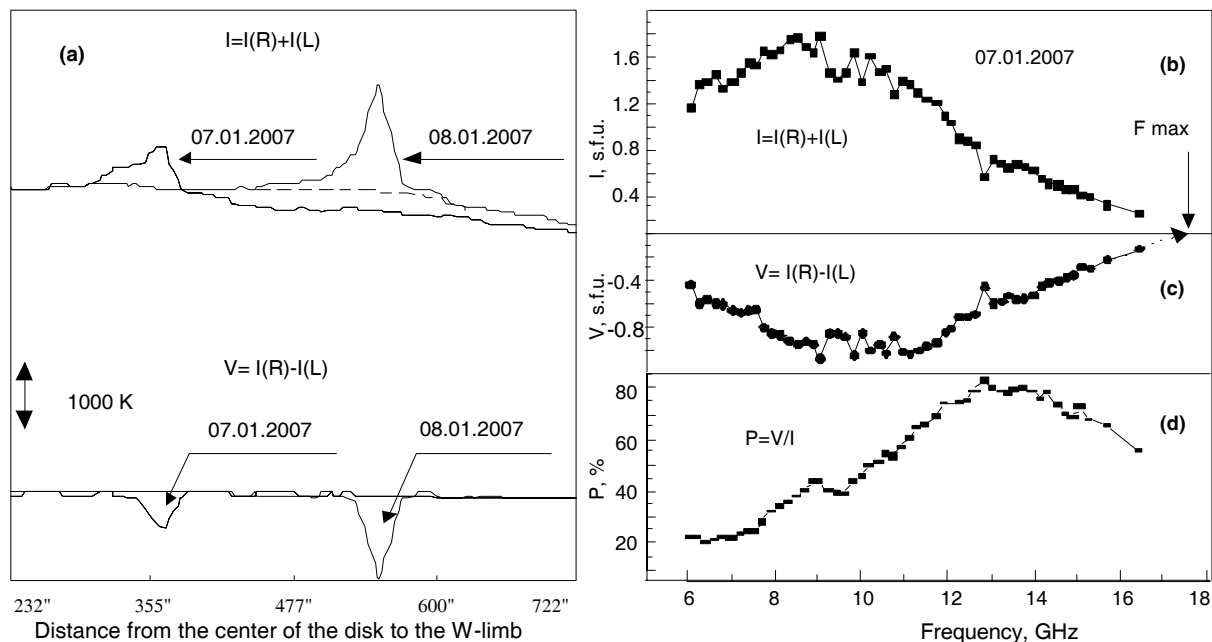
Важным фактором становится измерение величины:

$$x = (\lambda(f) - \lambda(f_{max}))/360 \times 43 \times 10^{10}, \quad (4)$$

где  $\lambda(f)$  — расчетная долгота на частоте  $f$  и  $\lambda(f_{max})$  — расчетная долгота на частоте  $f_{max}$ . Это позволяет определять форму силовой линии магнитного поля по максимальному уровню поляризации в радиоисточнике в двух направлениях: по высоте и долготе. На Рис. 5 (справа) по оси абсцисс отложена величина  $x$ , характеризующая долготное отклонение в зависимости от высоты  $h$ .

На Рис. 5 (слева) видно, что величина магнитного поля уменьшается с высотой от 1800 Гс до 700 Гс в диапазоне высот от 2 Мм до 25 Мм. В период с 1 по 8 января это изменение магнитного поля с высотой происходило практически монотонно.

Расположение радиоисточников поляризованного излучения отражает структуру магнитных полей пятен как по высоте, так и по долготе. Важно также знать расположение одномерной диаграммы направленности РАТАН-600 на всех работающих волнах относительно измеряемого источника поляризации над пятном. В наших измерениях мы используем первичные облучатели в виде пары



**Рис. 4.** Слева приведены: а) совмещенные сканы радиоисточников АО NOAA 10933 за 7 и 8 января 2007г. в одинаковом масштабе для каналов интенсивности (вверху) и круговой поляризации (внизу) на волне 1.98 см в шкале антенных температур. Справа, для АО NOAA 10933 на 7 января 2007г. приведены: б) спектр интенсивности потока излучения в солнечных единицах потока излучения [s.f.u.]; в) спектр поляризации в s.f.u., Экстраполяция коротковолновой части спектра на ось абсцисс дает максимальную величину магнитного поля в короне Fmax; д) спектр степени поляризации.

широкодиапазонных двухзаходных спиралей, которые имеют совмещенный фазовый центр для всех волн как для правой, так и для левой круговых поляризации. Оба первичных облучателя смещены по горизонтали друг относительно друга на величину 34.5 мм. Это смещение мало и может привести к увеличению aberrаций на волнах короче 2 см на величину не более 10%. Максимальные aberrации могут возникать лишь при наблюдениях радиоисточника с размерами близкими к размеру диаграммы. Aberrации могут уменьшать амплитуду сигнала и смещать максимум диаграммы, однако эти изменения могут быть значимы лишь при больших выносах первичного облучателя из фокуса (более одной длины волны). В таких случаях коррекция aberrаций достигается расчетными методами [19].

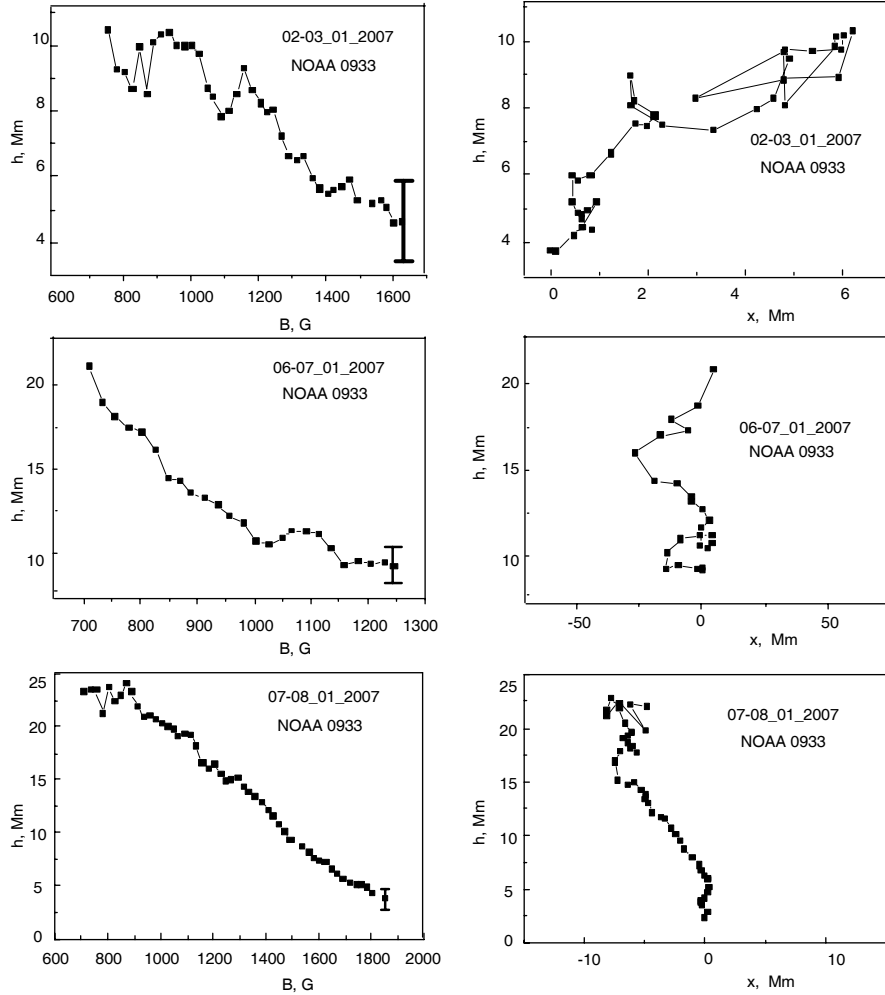
Важную роль при высотных измерениях играет многоволновость наблюдений (в данном случае, с частотным разрешением 1–3%). Это дает возможность оперировать параметром спектральной монотонности данных и отличать инструментальные особенности наблюдений от явлений, имеющих солнечную природу. На Рис. 5 (справа) приведены расчеты формы такой двумерной структуры магнитного поля для АО NOAA 10933 для нескольких измерений в январе 2007г. Видно, что структура активной области и наклон силовой трубки 6–8 января 2007 г. существенно изменились по сравне-

нию с периодом 2–3 января 2007 г. Монотонность результатов измерений указывает на высокую относительную точность измерений до долей Мм. В этот же период наблюдалась и другая активная область NOAA 10935. Магнитная структура этой области 3–4 января 2007 г. изображена на Рис. 6.

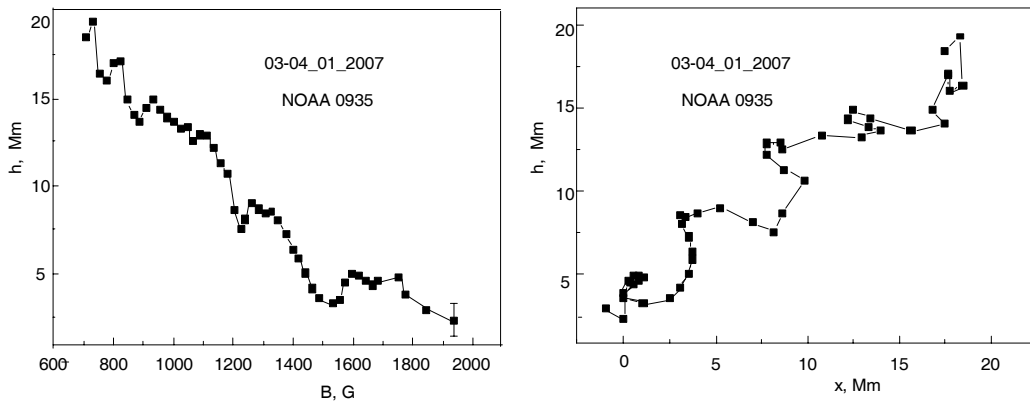
Из сопоставления Рис. 5 и 6 видно, что структура магнитного поля для АО 10935 подобна АО 10933 (рисунки слева), однако она отличалась большей долготной протяженностью по высоте (рисунки справа). Аналогичные вычисления мы провели и для периода с 1 по 8 февраля 2007 г., когда наблюдались активные области NOAA 10940 и 10941. Результаты представлены на Рис. 7.

Интересная двумерная структура магнитного поля над пятном была обнаружена по радионаблюдениям на РАТАН-600 в мае 2007г. для активной области АО NOAA 10953 (см. Рис. 8), которая имела выраженную спиралевидную форму.

На Рис. 9 приведены результаты измерения высотной зависимости магнитного поля для АО NOAA 10953, которая имела относительно стабильный характер в течение времени наблюдений. Слева на Рис. 9 представлены вычисленные по измерениям высоты для каждой длины волны многоволнового комплекса, которые были сопоставлены с соответствующими значениями магнитного поля, рассчитанные для 3-й гармоники гирочастоты.



**Рис. 5.** Результаты расчетов для АО NOAA 10933, которая наблюдалась в период 2–8 января 2007г. Слева — изменение магнитного поля с высотой для трех измерений. Вертикальный отрезок обозначает систематическую ошибку радиоизмерений, связанную с качеством установки диаграммы антенны. Справа приведена высотно-долготная структура магнитного поля над пятном.



**Рис. 6.** То же, что и на Рис. 5 для АО NOAA 10935 наблюдавшейся 3–4 января 2007г.



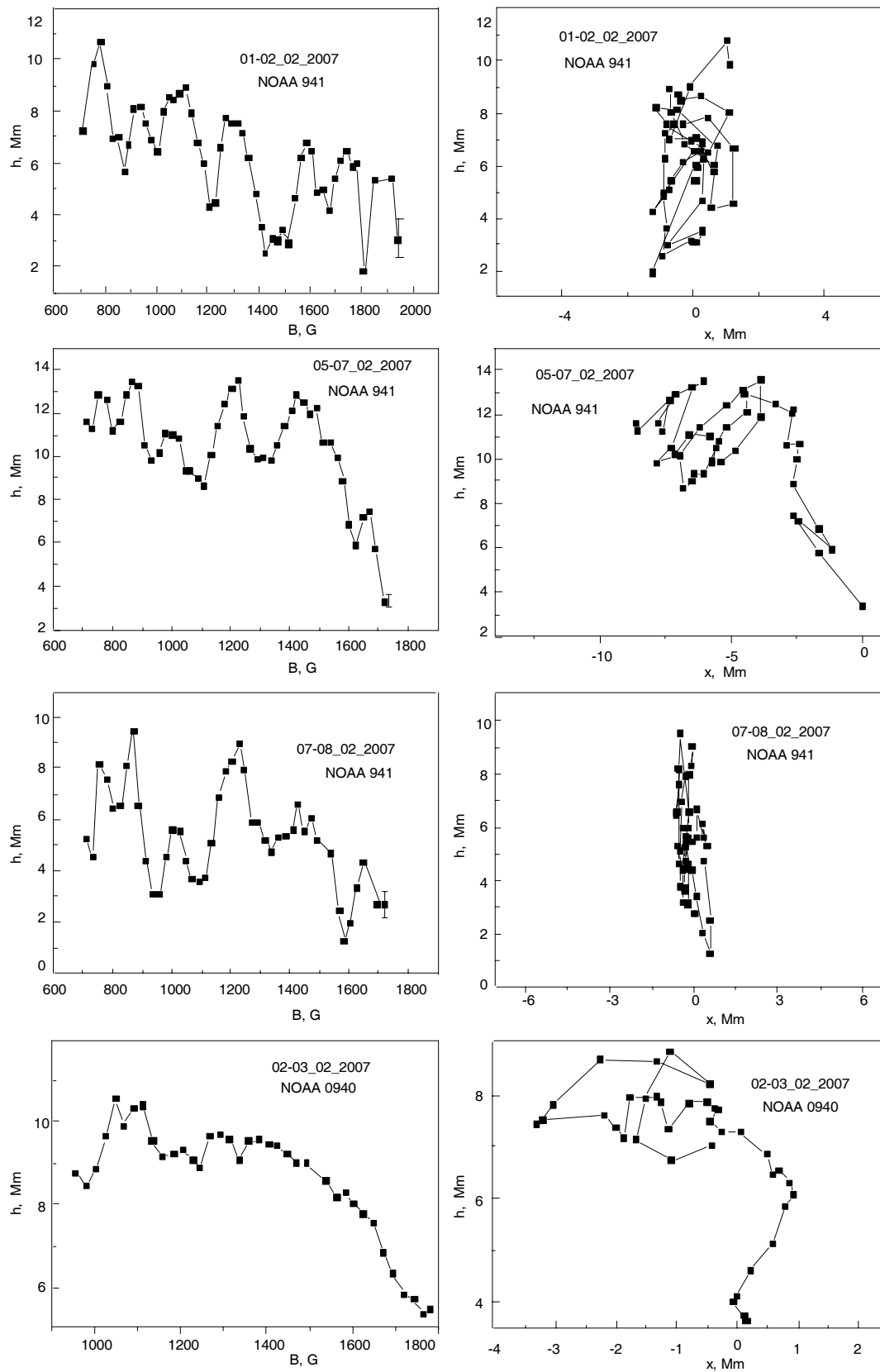
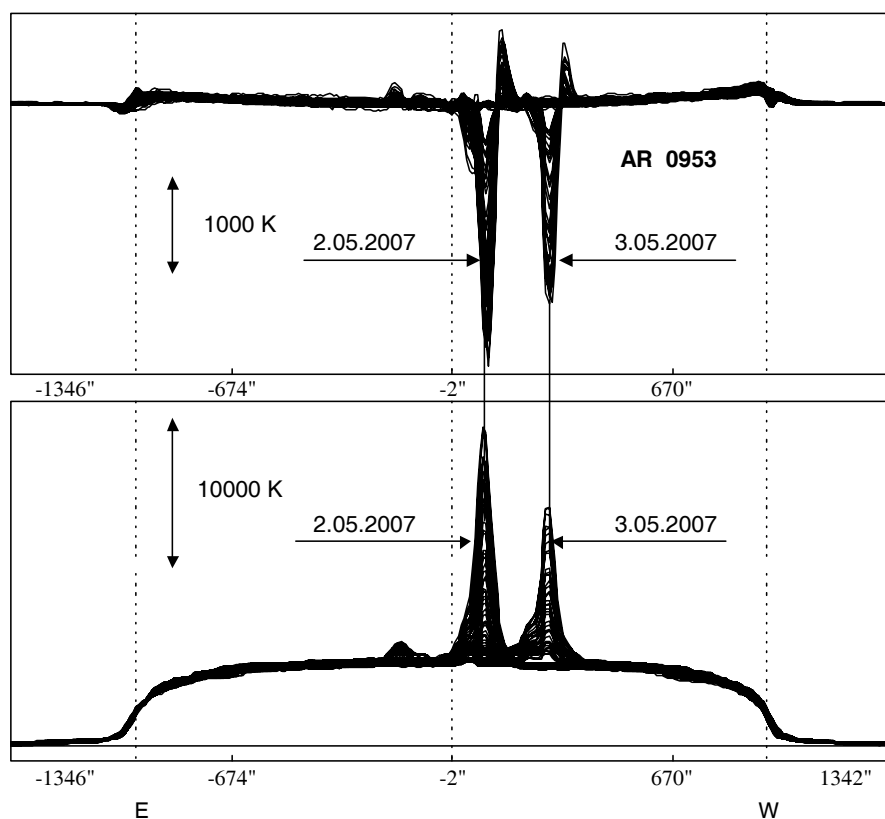


Рис. 7. То же, что на Рис. 5 для активных областей NOAA 10940 и 10941, наблюдавшихся в феврале 2007 г., в разные периоды времени.



**Рис. 8.** Многоволновые радионаблюдения АО NOAA 10953 на РАТАН-600. Сканы за 2 и 3 мая 2007г. совмещены как для каналов интенсивности (внизу), так и (вверху) для каналов поляризации (параметр Стокса V).

Средняя линия показывает ход монотонного изменения магнитного поля с высотой, а отклонения от нее указывают на существование более сложной высотной структуры.

Расчеты по формулам (1) и (2) можно представить также в виде высотного изменения магнитного поля с изменением долготы. Эти расчеты представлены на Рис. 10 (слева). Хорошо видна зависимость напряженности магнитного поля от долготы источника. Отметим, что хотя высота и долгота определяются в процессе минимизации независимо, но вполне вероятно, что с учетом процедуры высотной привязки, абсолютные значения долготы реально могут быть несколько иными. Но поскольку нас интересует лишь относительное изменение долготы источника с высотой (что достаточно для выявления наклона силовой трубки или ее скрученности), то здесь никаких изменений в таких результатах не произойдет.

Рисунок 10 (слева) указывает на явно монотонный ход магнитного поля с высотой в виде раскручивающейся с высотой спирали. Если объединить две зависимости (на Рис. 9 и 10 слева), то можно получить двумерную проекцию силовой трубки магнитного поля над пятном (Рис. 10 справа), которая в данном случае имеет винтовую форму,

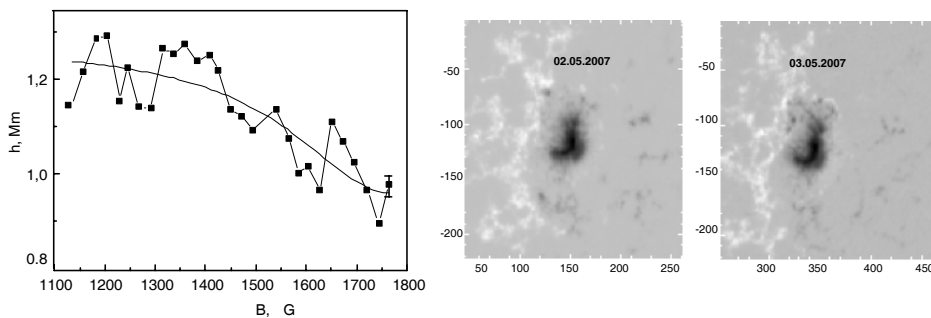
как следует это из направления стрелок, идущих от коротковолновых измерений к длинноволновым.

Отметим, что такая структура не уникальна. На Рис. 5 для АО NOAA 10933 за 6–7 января 2007 г. и на Рис. 6 для АО NOAA 10935 также можно увидеть структуры, которые могут отражать винтовой характер в двумерной плоскости.

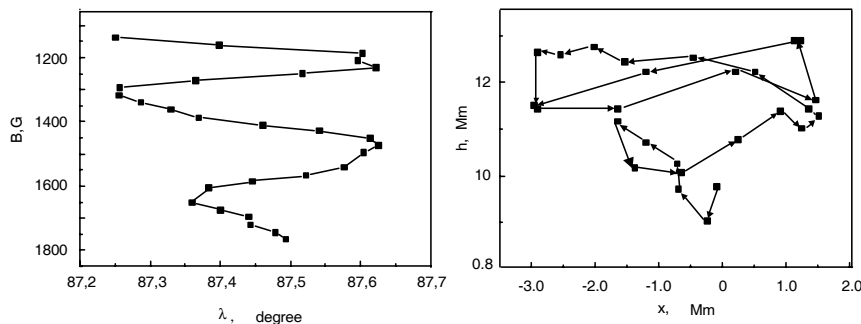
#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Для сравнения результатов наших измерений с модельными экстраполяциями магнитного поля (дипольные и потенциальные) из фотосферы в корону обратимся к Рис. 11, взятому из работы [20].

По некоторым моделям [21], высота короны над активной областью составляет 2–4 Мм. Из приведенного рисунка следует, что если поле в пятне на уровне фотосферы составляет 3000 Гс, то на этих высотах оно составляет  $B=400–700$  Гс. Но, как отмечено во Введении, измерения магнитного поля по радионаблюдениям показали, что для большинства групп пятен напряженность поля, достигаемая в короне или переходной области, всего на 20% ниже значений на уровне фотосферы. Эта особенность интерпретируется как опускание короны над пятном [22].



**Рис. 9.** Справа показана относительно стабильная структура магнитного поля пятна на уровне фотосферы 2 и 3 мая 2007 г. по данным спутника SOHO MDI. Слева представлены радио измерения высот для каждой длины волны многоволнового комплекса, которые сопоставлены с соответствующими значениями магнитного поля, рассчитанные для 3-й гармоники гирочастоты. Средняя линия показывает ход монотонного изменения магнитного поля с высотой.



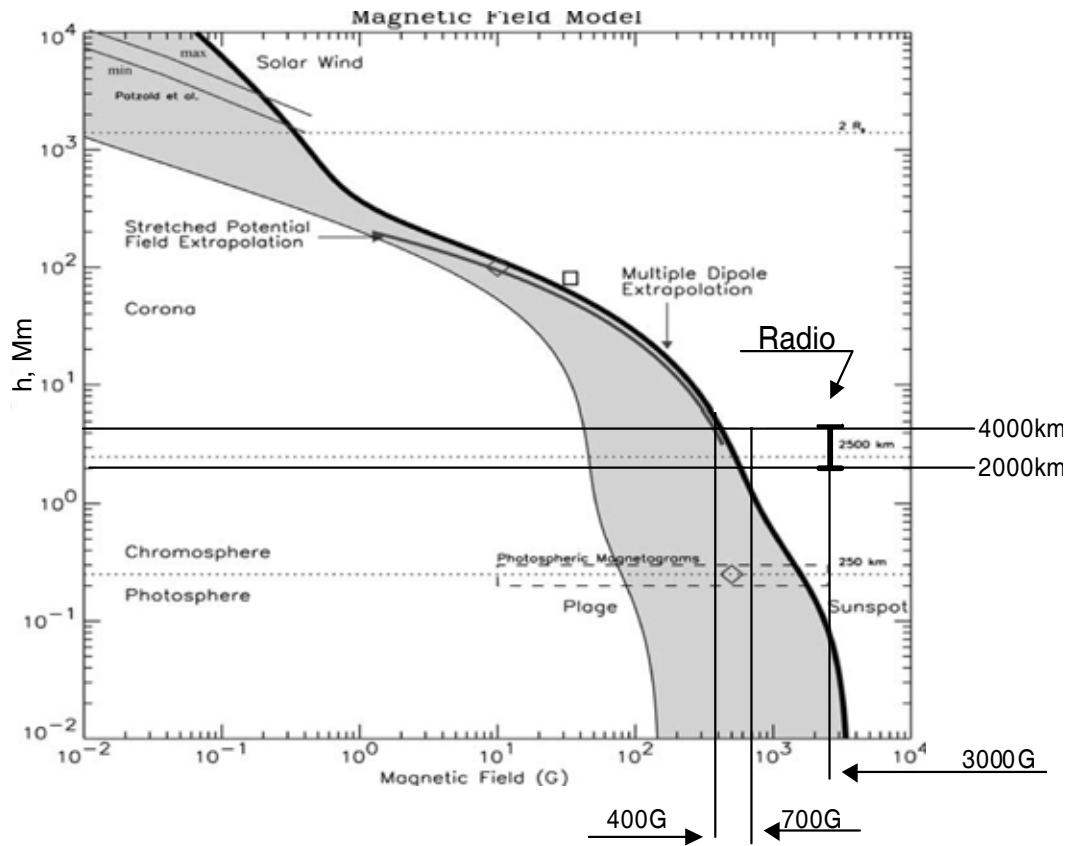
**Рис. 10.** Слева показано изменение напряженности магнитного поля с изменением долготы источника. Справа — представление (с учетом Рис. 9) двумерной высотной структуры магнитного поля, как проекции винтовой формы силовой трубки магнитного поля над пятном.

По нашим измерениям, напряженность магнитного поля в переходной области и нижней короне также уменьшается на величину не более 20%, то есть до значений  $B \approx 2400$  Гс, если поле на уровне фотосферы  $B = 3000$  Гс. Получается, что дипольная и потенциальная экстраполяция фотосферного поля дают существенно заниженные напряженности магнитного поля в переходной области и нижней короне. Реконструкция магнитного поля на основе модели бессилового поля за счет произвольно выбираемого параметра  $\alpha$  (в уравнении  $\text{rot } \vec{B} = \alpha \vec{B}$ ) заметно улучшает структуру силовых линий (до совпадения с петлями, наблюдаемыми в ультрафиолете), но расходимость этих линий велика и напряженность магнитного поля на корональных высотах остается такой же, как и в потенциальном приближении.

Вполне возможно, что магнитное поле в хромосфере и короне сильно структурировано. То, что такое действительно имеет место во вспышечных петлях, показано, например, в работе [23]. В этом случае радиоизлучение, исходящее из структур с максимальной напряженностью магнитного поля, должно отличаться от реконструированных магнитных полей, дающих усредненную величину маг-

нитного поля. Приведем дополнительные аргументы в пользу того, что магнитные поля распространяются высоко в корону. Петли, излучающие в мягком рентгене, обычно, только на 30% шире в вершинах, чем в основаниях. При такой форме петель ни одна из теоретических идей о магнитной структуре и нагревании петель не способна объяснить все их наблюдаемые свойства [24]. Петли же, наблюдаемые в линиях  $171\text{\AA}$  и  $195\text{\AA}$ , имеют еще меньшее расширение к вершинам: 0% для вневышечных петель и 13% для после-вспышечных [25]. Таким образом, имеет место и структурирование петель по температуре. Радиоизлучение связано с более высокотемпературной частью петли и, тем самым, должно также иметь место незначительное увеличение размеров этой области с увеличением длины волны. Расширение петель однозначно отражает степень уменьшения напряженности магнитного поля вдоль петли. Указанное расширение ультрафиолетовых петель должно приводить к уменьшению магнитного поля в вершине петли по сравнению с ее основанием на 0%–27%.

Неточность реконструкции магнитного поля, возможно, связана с предположением о низком



**Рис. 11.** Магнитное поле над активной областью. Дипольная и потенциальная экстраполяция магнитного поля фотосферы. Измеряемые значения магнитного поля по радиоданным находятся в стороне от модельных реконструкций на больших высотах.

отношении газового давления к магнитному ( $\beta < 1$ ) во всей анализируемой части атмосферы Солнца. Если это справедливо в хромосфере и в значительной части короны, то на уровне фотосферы и в нижней хромосфере это предположение неверно, так как здесь  $\beta > 1$ . Это обстоятельство, в частности, может приводить к немонотонному изменению напряженности магнитного поля с высотой в нижней атмосфере Солнца. Так в работах [26–29] показано, что максимальные величины магнитного поля достигаются не на уровне фотосферы, а в хромосфере. В работе [24] также показано, что наименьшим расширением обладают петли наибольшей длины (до  $3 \times 10^{10}$  см). Низкие петли могут иметь как небольшое расширение (они составляют подавляющее большинство), так и расширение, которое может быть согласовано с реконструированным магнитным полем. Последнее обстоятельство оправдывает те немногочисленные работы, в которых реконструированные силовые линии магнитного поля хорошо соответствуют наблюдаемым петлям.

Наличие слабо расходящихся силовых трубок теоретически может быть объяснено наличием в них сильной скрученности магнитного поля. В этом

случае поле должно сжиматься (например, [30, 31]) и тем самым должно уменьшаться расширение трубки и увеличиваться напряженность магнитного поля.

Длины исследованных в работе [24] петель составляли от 50 Мм до 330 Мм. Это значит, что напряженность магнитного поля в наиболее горячих частях силовых трубок (излучающих в линиях  $171\text{\AA}$  и  $195\text{\AA}$ ) не должна увеличиваться в их вершинах, то есть на высотах до 150 Мм, более чем на 30%. А измерения на микроволнах показывают, что напряженность магнитного поля изменяется с высотой хотя и заметно, но значительно медленнее, чем по теоретическим модельным расчетам.

Проведем простейшую экстраполяцию магнитного поля в корону, используя достаточно надежно установленный факт, что поле в переходной области должно составлять не менее 80–85% от продольной компоненты фотосферного поля [27]. Вновь воспользуемся одномерным дипольным приближением магнитного поля по формуле (2) и вычислим вертикальный градиент магнитного поля на уровне фотосферы как  $B' = -3B_0/d$ . Отсюда можно определить величину  $d$ , используя

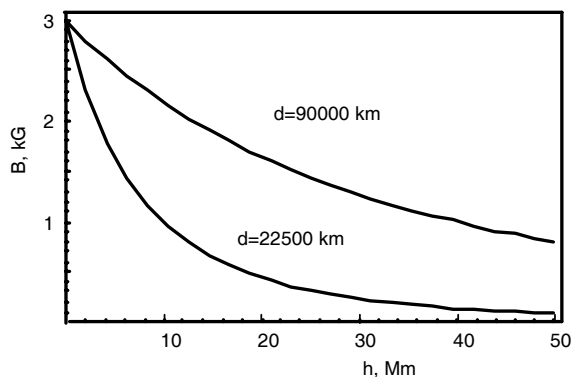


Рис. 12. Магнитное поле над активной областью в приближении (1). Верхняя кривая построена для  $d = 90000$  км, нижняя — для  $d = 22500$  км.

известные данные работы [32]  $B' = 0.1$  Гс/км, либо работ [33, 34], где величина градиента магнитного поля достигала около  $B' = 0.3-0.5$  Гс/км. Тогда для  $B' = 0.1$  Гс/км и  $B_0 = 3000$  Гс получим  $d = 90000$  км, а для  $B' = 0.4$  Гс/км и  $B_0 = 3000$  Гс получим  $d = 22500$  км. На Рис. 12 построена зависимость  $B_0$  от  $h$  для полученных значений  $d$ .

Таким образом, магнитное поле напряженностью в 1000 Гс должно находиться на высотах от 10 Мм до 25 Мм, что очень хорошо соответствует нашим измерениям, приведенным на Рис. 7–10. При этом напряженность магнитного поля на уровне переходной области ( $\approx 2000$  км) уменьшается не более чем на 20%, как это и следует из многочисленных радиоизмерений активных областей. Однако следует отметить, что хотя дипольное магнитное поле полученной величины и согласуется с нашими результатами, но плохо соответствует дипольной модели, в которой высота должна быть примерно равна радиусу пятна. Такие размеры пятна, конечно, маловероятны. Так, для  $h = 90$  Мм размер пятна должен составлять около 4 угловых минут.

## 5. ВЫВОДЫ

Разработан метод оценки структуры магнитного поля в короне активных областей по многоволновым спектрально-поляризационным радионаблюдениям. Метод дает не только изменение напряженности магнитного поля с высотой, но и двумерную форму силовой трубки, излучающей в микроволновом диапазоне длин волн. Магнитные поля напряженностью около 1000 Гаусс находятся на достаточно больших высотах в атмосфере Солнца (от 10 до 25 Мм), что хорошо подтверждает наблюдения в ультрафиолете, по которым расходимость силовых трубок мала (не более 15% в

вершинах магнитных петель), а также соответствует ранним радиоастрономическим измерениям магнитного поля на уровне переходной области [10]. Топология излучающей на микроволнах силовой трубки в некоторых исследованных случаях может иметь винтовую (жгут) структуру.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа частично поддерживалась Программами ОФН-15 и ПАН-16 и грантами РФФИ 08-02-00378 и 09-02-00111а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. L. House, *Astrophys. J.* **214**, 632 (1977).
2. J. Arnaud and Jr. G. Newkirk, *Astronom. and Astrophys.* **178**, 263 (1987).
3. P. G. Judge, *Astrophys. J.* **500**, 1009 (1998).
4. H. Lin, J. R. Kuhn, and R. Coulter, *Astrophys. J.* **613**, L177 (2004).
5. M. J. Aschwanden and T. S. Bastian, *Astrophys. J.* **426**, 425 (1994).
6. M. J. Aschwanden and T. S. Bastian, *Astrophys. J.* **426**, 434 (1994).
7. M. J. Aschwanden, J. Lim, D. E. Gary, et al., *Astrophys. J.* **454**, 512 (1995).
8. О. А. Голубчина, В. Н. Ихсанова, В. М. Богод и Г. С. Голубчин, *Солнечные данные №4*, 108 (1981).
9. G. J. Hurford, R. B. Read, and H. Zirin, *Solar Physics* **94**, 413 (1984).
10. S. B. Akhmedov, G. B. Gelfreikh, V. M. Bogod, et al., *Solar Physics* **79**, 41 (1982).
11. K. A. Lang and R. F. Willson, *Adv. Space Res.* **6**, 97 (1986).
12. K. Shibasaki, *Astroph. Space Sci.* **119**, 21 (1986).
13. V.M. Bogod, V.I. Garaimov, N.P. Komar, et al., in *Proceedings of 9-th European Meeting on Solar Physics* (ESA SP-448, December 1999), 1253 (1999).
14. В. М. Богод, Г. Н. Жеканис, М. Г. Мингалиев и С. Х. Тохчукова, *Изв. ВУЗов "Радиофизика"* **XLVII**, 1 (2004).
15. T. Takakura, *Solar Physics* **26**, 151 (1972).
16. V. V. Zheleznyakov, *Radio Emission of the Sun and Planets* (Oxford, Pergamon Press, 1970) [in Russian].
17. E. Ya. Zlotnik, *Radiophys. Quantum Electron.* **44**, 53 (2001).
18. S. M. White, *Solar and space weather radiophysics* **113**, 89 (2004).
19. А. Н. Коржавин, *Сообщения САО* **16**, 43 (1979).
20. G. A. Gary, *Solar Physics* **203**, 71 (2001).
21. M. J. Aschwanden and C. J. Schrijver, *Astrophys. J. Suppl.* **142**, 269 (2002).
22. М. А. Лившиц, В. Н. Обридко и С. Б. Пикельнер, *Астрон. ж.* **43**, 1135 (1966).
23. Л. В. Ясннов и Ю. Ю. Хохлов, *Астрон. ж.* **75**, 445 (1998).
24. J. A. Klimchuk, *Solar Physics* **193**, 53 (2000).

25. J. A. Watko and J. A. Klimchuk, *Solar Physics* **193**, 77 (2000).
26. Г. Б. Гельфрейх, А. Н. Коваль и Н.Н. Степанян, *Материалы международной конференции, Москва, Россия, 1981*(ИЗМИРАН, Москва, 1981), с.193.
27. В. М. Богод, Г. Ф. Вяльшин, Г. Б. Гельфрейх и Н. С. Петрова, *Солнечные данные* №1, 104 (1982).
28. V. E. Abramov-Maksimov, G. F. Vyalshin, G. B. Gelfreikh, and V. A. Shatilov, *Solar Physics* **164**, 333 (1996).
29. В. Е.Абрамов-Максимов, В. М. Богод, В. Н. Боровик и др., *Изв. ВУЗов "Радиофизика"*, **XXXIX**, 1436 (1996).
30. E. G. Zweibel and A. H. Boozer, *Astrophys. J.* **295**, 642 (1985).
31. J. A. Robertson, A. W. Hood, and R. M. Lothian, *Solar Physics* **137**, 273 (1992).
32. А. Б. Северный, *Изв. Крым. астроф. обс.* **33**, 34 (1965).
33. Б. А. Иошпа и В. Н. Обридко, *Солнечные данные* №3, 54 (1965).
34. Б. А. Иошпа и В. Н. Обридко, *Солнечные данные* №5, 62 (1965).

## ON THE COMPARISON OF RADIO-ASTRONOMICAL MEASUREMENTS OF THE HEIGHT STRUCTURE OF MAGNETIC FIELD WITH RESULTS OF MODEL APPROXIMATIONS

V. M. Bogod, L. V. Yasnov

The results of microwave observations of the polarized emission of active regions made with the RATAN-600 radio telescope are used to develop the method for determining the structure of the magnetic field of these regions at coronal heights. About 1000-G-strong magnetic fields are observed in the solar atmosphere at rather high altitudes (from 10 to 25 Mm). This result is confirmed fairly well by the ultraviolet observations of magnetic loops, it is consistent with earlier radio-astronomical observations of the magnetic field at the height of the transition region, and it corresponds as well, if interpreted in terms of the dipole magnetic field model, to the vertical gradients of the photospheric magnetic field.

Key words: *radiosources*