

ПРОСВЕЧИВАНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ СКВОЗЬ СВЕРХКОРОНУ СОЛНЦА

Ю. Н. Парийский, Н. С. Соболева, Г. М. Тимофеева

Сообщается об измерениях эффекта Фарадея на волне 8.2 см в сверхкороне Солнца при покрытии ею Крабовидной туманности. Наблюдения выполнены с помощью радиотелескопа РАТАН-600 в период с 30.05 по 20.06.1978. Поворот плоскости поляризации зарегистрирован начиная с расстояний $\sim 12 R_{\odot}$ между Солнцем и Крабовидной туманностью. Максимальный поворот составляет $\sim 3^{\circ}$. Характер наблюдаемого эффекта согласуется с секториальной структурой магнитного поля.

The results of the Faraday rotation measurements at the wavelength of 8.2 cm in solar supercorona which covers Crab nebula are presented. The observations were made by the help of radiotelescope RATAN-600 over the period from 30 V to 20 VI 1978. The rotation of the plane of polarization from about $12 R_{\odot}$ angular separation between Sun and nebula was found. The maximum of the angle rotation is about 3° . The character of the observed effect corresponds to expected one from the sectorial structure of the magnetic field.

Как известно, в разреженной плазме эффект Фарадея (вращение плоскости поляризации) является очень чувствительным индикатором магнитного поля.

Уже в начале 60-х годов были сделаны первые попытки использовать поляризованные космические радиоисточники для оценки характера межпланетного и околосолнечного магнитного поля [1]. Наблюдения просвечивания Крабовидной туманности сверхкоронной Солнца впервые были выполнены в Пулково в 1962 г. [2]. Начиная с 1971 г. систематические наблюдения за поляризованным радиоизлучением этого же источника при покрытии его солнечной сверхкоронной проводились в Японии [3], а в 1968 г. для этой же цели был использован космический аппарат «Пионер-6» [4].

Наблюдения в Пулково [2] установили верхний предел на составляющую общего межпланетного поля вдоль луча зрения. Японские и пулковские [3, 5] наблюдения показали наличие спорадических изменений позиционного угла вектора поляризации излучения Крабовидной туманности, которые авторы связывают с активностью Солнца. Чувствительность этих измерений из-за недостаточного разрешения радиотелескопа не позволила обнаружить регулярной компоненты околосолнечного поля. Впервые такое поле удалось зарегистрировать в космическом эксперименте при просвечивании радиоизлучения «Пионера-6» сквозь околосолнечную плазму [4]. В этом эксперименте было показано, что характер эффекта Фарадея вблизи Солнца отражает секториальную структуру магнитного поля. Были обнаружены также и спорадические изменения позиционного угла электрического вектора, связанные со вспышками.

В 1977 г. мы пытались обнаружить регулярную структуру межпланетного поля с помощью радиотелескопа РАТАН-600 [6], наблюдая за поляризованным излучением Крабовидной туманности при ее покрытии короной Солнца. Высокая разрешающая способность и малый уровень

рассеяния в инструменте позволили уверенно наблюдать Крабовидную туманность на расстояниях в несколько радиусов Солнца, однако на волне 4 см эффект Фарадея оказался не более 1° , хотя характер изменения позиционного угла электрического вектора можно было объяснить только секториальной структурой магнитного поля. Учитывая особый интерес в определении физических условий в зоне, непосредственно примыкающей к области формирования солнечного ветра, недоступность этой области для систематических прямых исследований, отсутствие оптических методов определения магнитного поля в них, мы предприняли новые наблюдения просвечивания Крабовидной туманности. Кроме этого, мы надеялись что использование инструмента с высокой разрешающей способностью позволит определить роль мелкомасштабных неоднородностей с размером, близким к 10^5 — 10^6 км. Как известно, эти неоднородности доминируют при прямых исследованиях ветра, в то время как методы радиоастрономии дают масштабы, близкие к 100 км.

Ниже мы приводим результаты наших наблюдений на волне 8.2 см.

Наблюдения проводились с 30.05 по 20.06. 1978 в меридиане в режиме прохождения с помощью системы плоский отражатель, южный сектор радиотелескопа РАТАН-600 [7]. В качестве первичного облучателя использовался «скалярный» облучатель с близкими диаграммами в E - и H -плоскостях. Разрешающая способность радиотелескопа составляла $\sim 1' \times 35'$. При наблюдениях регистрировался только параметр Стокса U . 30 и 31 мая одновременно записывались два параметра — I и U . В конце наблюдательного цикла, когда Крабовидная туманность находилась на расстоянии более 50 радиусов от Солнца, был зарегистрирован также параметр Стокса Q . Паразитные поляризационные сигналы контролировались ежедневно по неполяризованному источнику ЗС 84. Регистрация сигнала производилась на магнитную ленту малой ЭВМ и на самописце типа КСП-4.

На рис. 1 приведены одномерные кривые прохождения Крабовидной туманности на волне 8.2 см (параметры Стокса I , Q , U), полученные вне покрытия солнечной короной. На этот же рисунок нанесено также одномерное распределение по туманности позиционного угла вектора поляризации χ_{cp} ($\operatorname{tg} 2\chi = U/Q$). Кривые прохождения параметра Стокса U , полученные вдали от Солнца, были осреднены, затем средняя кривая прохождения вычиталась из одиночных кривых.

На рис. 2 представлены разности $U - U_{cp}$ для всего цикла наблюдений. Критерием того, что разность $U - U_{cp}$ не является паразитным сигналом, является тот факт, что эта разность отлична от нуля только в тех точках, где отлична от нуля величина параметра Q . Согласно этому критерию мы считаем, что ощутимые изменения позиционного угла имеются только 13, 14 и 17 июня. Предполагая, что при покрытии Крабовидной туманности сверхкоронной Солнца изменение параметра U происходит только за счет поворота электрического вектора при неизменном проценте поляризации, можно по значению $U - U_{cp}$ определить величину этого поворота в каждой точке кривой прохождения.

На рис. 3 приведены одномерные распределения по туманности изменения позиционного угла электрического вектора $\Delta\chi$ при прохождении луча сквозь сверхкорону Солнца 13, 14, 16 и 17. 06. 1978. Из этого рисунка видно, что величина $\Delta\chi$ приблизительно постоянна по туманности, однако имеется некоторое систематическое изменение позиционного угла по туманности. Причем, в те дни, когда Крабовидная туманность находится к западу от Солнца и к востоку от Солнца, это изменение имеет противоположный знак. На рисунке прямыми линиями показаны средние значения поворота позиционного угла на данный день, штрихами — аппроксимация изменения по туманности линейной зависимостью. Средние по туманности значения углов поворота позиционного угла электрического вектора, угловые расстояния между Солнцем и Крабовидной туманностью, средняя

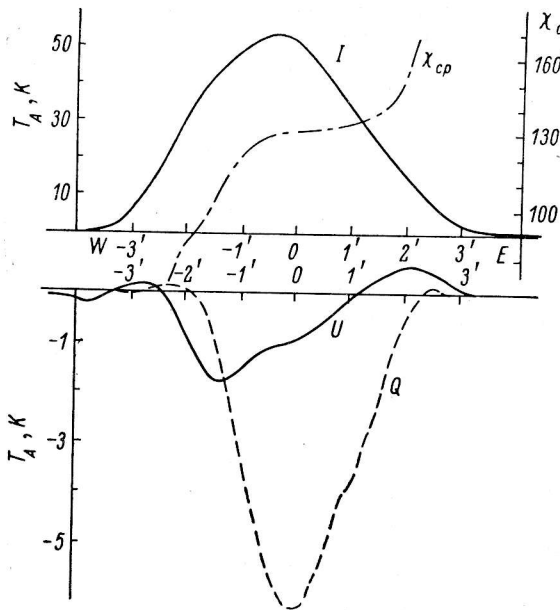
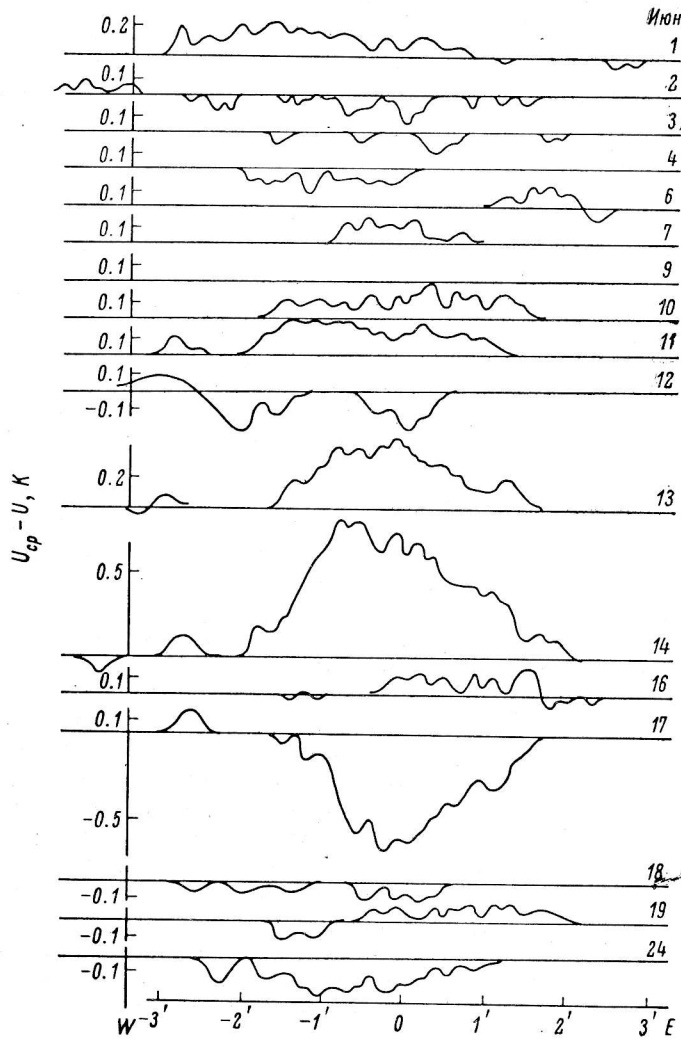


Рис. 1. Одномерные кривые прохождения параметров Стокса I , Q , U , полученные по наблюдениям вдали от Солнца.

По оси абсцисс — угловое расстояние от центральной звезды Крабовидной туманности.

Рис. 2. Разность $U_{ср} - U$ по туманности для всего цикла наблюдений.



Показатель	Июнь				
	12	13	14	16	17
Угловое расстояние между Солнцем и туманностью по α , R/R_{\odot}	11.96	-8.35	-4.74	2.48	6.09
Угловое расстояние между Солнцем и туманностью по δ , R/R_{\odot}	4.17	4.41	4.61	4.97	5.11
Наименьшее угловое расстояние от центра Солнца до луча зрения на Крабовидную туманность R/R_{\odot}	12.75	9.45	6.62	5.54	7.95
Средний поворот позиционного угла вектора поляризации, град	D +0.15	-1.35 +0.09	-3.14 +0.14	0 +0.15	2.27 +0.15
Положение Крабовидной туманности относительно Солнца	K E	K E	K E	K W	K W
Средняя мера вращения по туманности, рад \cdot м ⁻²	—	-3.51	-8.15	0	5.89
Направление составляющей магнитного поля по лучу зрения	—	От нас	От нас	—	На нас

мера вращения, направление составляющей магнитного поля по лучу зрения сведены в таблице.

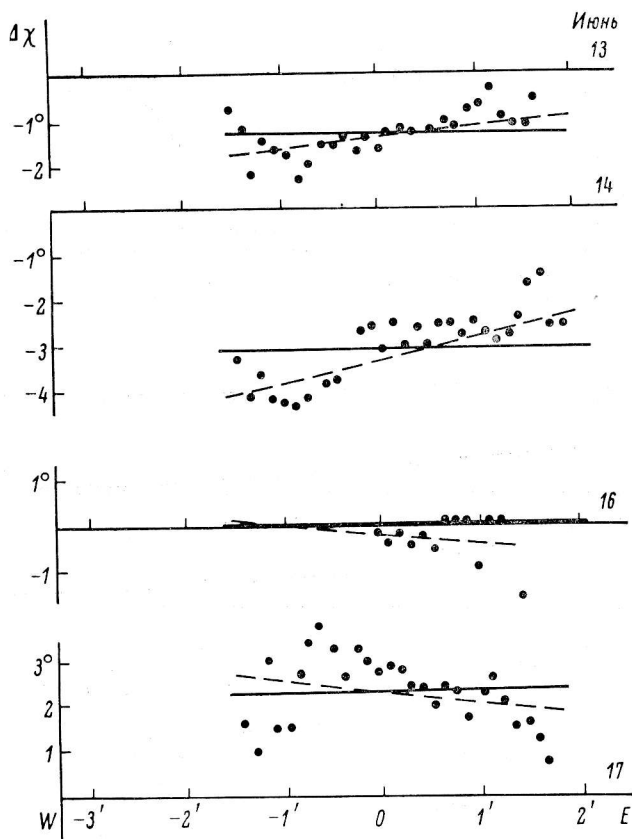


Рис. 3. Одномерные распределения изменения позиционного угла электрического вектора $\Delta\chi = \chi - \chi_{\text{ср}}$ по области сильной поляризации Крабовидной туманности при покрытии ее сверхкороной Солнца.

На рис. 4, а приведены значения поворота позиционного угла $\Delta\chi_{\text{ср}}$ электрического вектора в зависимости от углового расстояния R/R_{\odot} Крабовидной туманности и Солнца для настоящего цикла наблюдений.

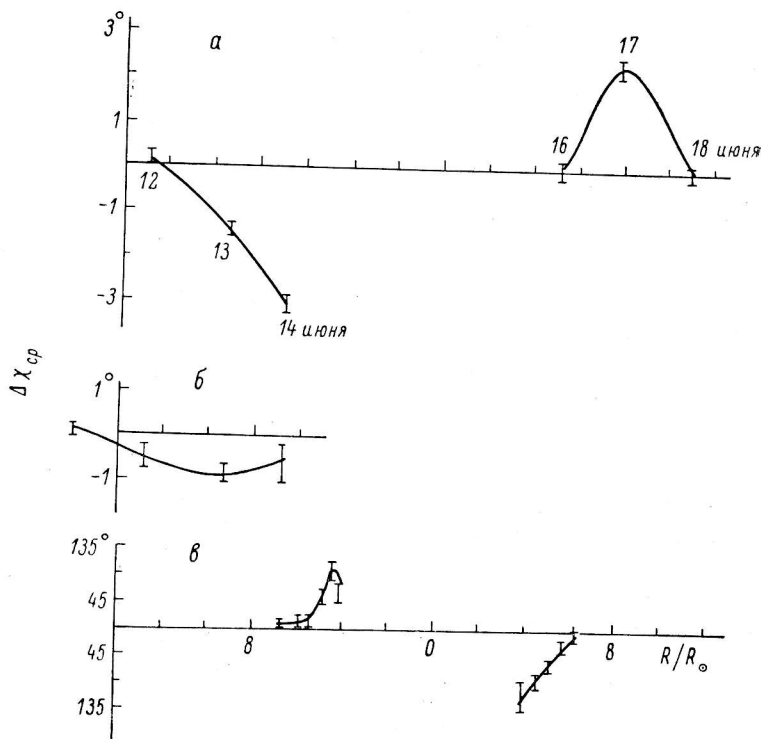


Рис. 4. Средний по туманности поворот позиционного угла электрического вектора $\Delta\chi_{ср}$ в зависимости от углового расстояния Крабовидной туманности, «Пионера-6» и Солнца в долях радиуса Солнца.

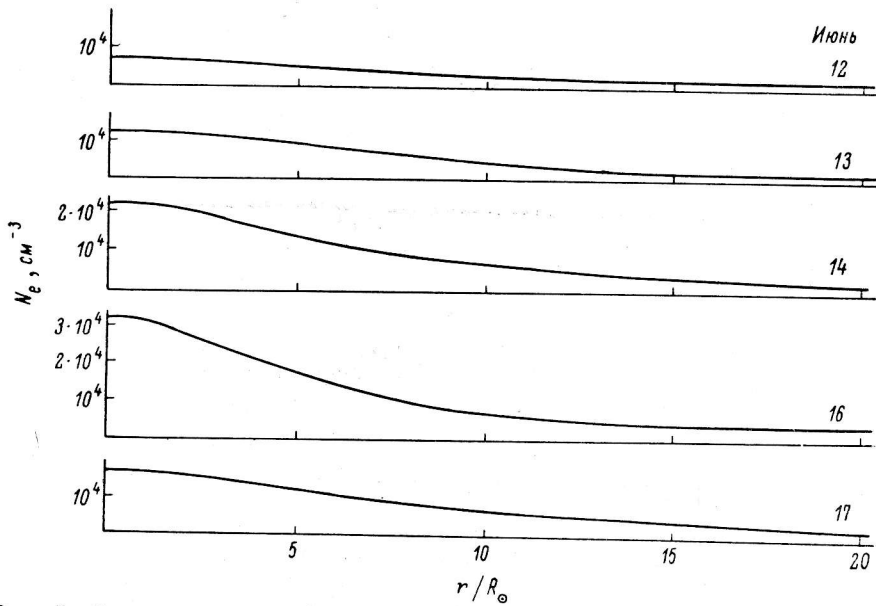


Рис. 5. Распределение электронной плотности по лучу зрения, полученное по модифицированной формуле Баумбаха—Аллена.
 r/R_{\odot} — расстояние по лучу зрения от ближайшей к Солнцу точке, выраженное в солнечных радиусах.

На рис. 4, б для сравнения показаны результаты наблюдений на волне 3.9 в 1977 г. [6], а на рис. 4, в — данные, полученные в 1968 г. на волне 13 см по измерению фарадеевского вращения от «Пионера-6» [4], покрываемого солнечной короной. Как следует из рис. 4, а и таблицы, мера вращения имеет разные знаки с запада и востока от Солнца, а 16 июня мера вращения равна нулю. Характер изменения угла поворота близок на всех трех графиках рис. 4.

Для оценки ожидаемого эффекта поворота позиционного угла электрического вектора при изменении углового расстояния между Солнцем и

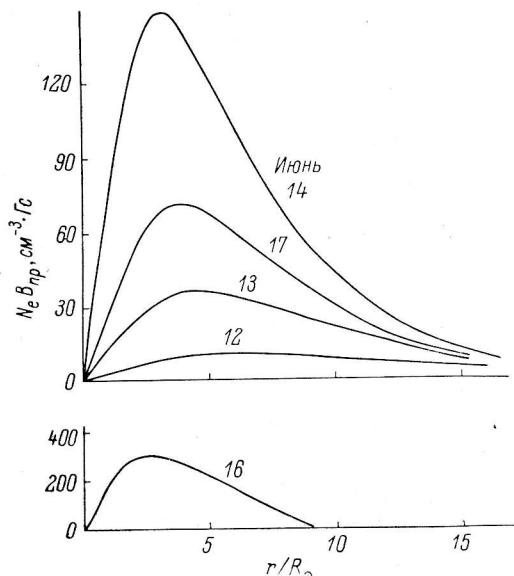


Рис. 6. Расчетное распределение произведения электронной плотности и составляющей магнитного поля по лучу зрения.

Значение электронной плотности принималось в соответствии с рис. 5, а магнитное поле предполагалось радиальным со значением на фотосфере $B=1$ Гс и законом изменения, пропорциональным R^{-2} .

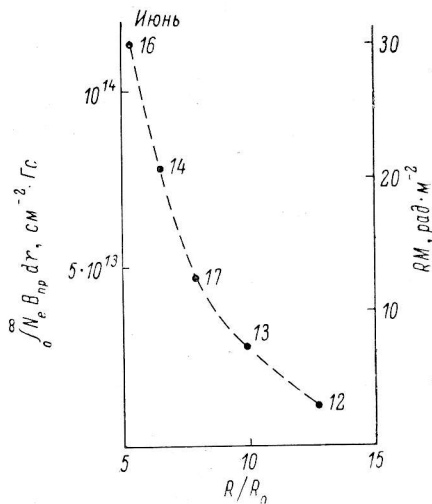


Рис. 7. Ожидаемое значение меры вращения на период 12—17.06.1978, полученное на основании рис. 6 интегрированием по лучу зрения от ближайшей точки к Солнцу до бесконечности.

Кротовидной туманностью были определены значения электронной плотности на луче зрения для конкретных угловых расстояний между Солнцем и Кротовидной туманностью. Расчет электронной плотности, как и в работе [4], проводился по модифицированной формуле Баумбаха—Аллена

$$N_e = 10^8 (1.55/R^6 + 0.01/R^2) \text{ см}^{-3},$$

где R — расстояние в единицах солнечного радиуса.

Зависимости электронной плотности от расстояния по лучу зрения для угловых расстояний между Солнцем и Кротовидной туманностью 12, 13, 14, 16 и 17 июня приведены на рис. 5.

Величина магнитного поля по лучу зрения считалась для двух случаев: 1) напряженность поля B падает обратно пропорционально кубу расстояния от центра Солнца; 2) поле падает обратно пропорционально квадрату того же расстояния. Для второго случая расчетные значения произведения электронной плотности на продольную составляющую по лучу зрения 12—14, 16 и 17 приведены на рис. 6. На рис. 7 представлено значение $\int_0^{\infty} N_e B_{\parallel} dr$ по половине луча зрения в зависимости от

Солнца. При расчете предполагалось, что напряженность магнитного поля на фотосфере равна 1 Гс. (Отметим, что случай радиально симмет-

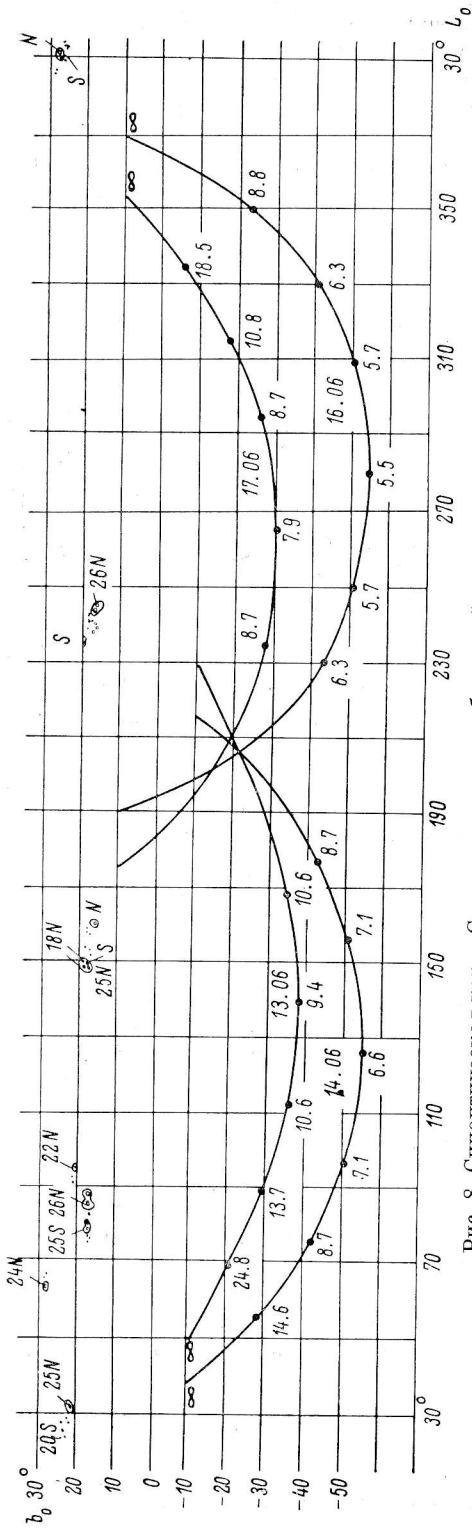


Рис. 8. Синоптическая карта Солнца на период наблюдений, построенная на основе [8].

Сплошные линии — проекция луча зрения на поверхность Солнца. Цифры вдоль линии — дата наблюдения и радиальное расстояние точек на луче зрения от центра Солнца.

ричного поля дает значение этого интеграла по лучу зрения, равное нулю). Сравнение расчетной зависимости изменения среднего по туманности позиционного угла поляризованного излучения при приближении Крабовидной туманности к Солнцу с наблюдаемыми изменениями 12—14 июня показывает, что закон падения магнитного поля с изменением углового расстояния близок к R^{-2} . Используя эту зависимость и приравнявая меру вращения из наблюдений расчетному значению с соответствующим коэффициентом, получаем

$$RM = 2.7 \cdot 10^{-13} \cdot K \int_0^8 N_e B_{np} dr.$$

здесь RM — в рад·м⁻², N_e — в см⁻³, B_{np} — в Гс, dr — в см. Коэффициент K показывает, во сколько раз магнитное поле на фотосфере отличается от 1 Гс. Для 14 июня этот коэффициент равен 0.39, для 17 и 13 июня — 0.47. Однако это — нижняя граница магнитного поля на фотосфере. Как уже было отмечено ранее, наличие секторов с противоположными знаками магнитного поля может значительно уменьшить наблюдаемую меру вращения.

Для того чтобы выяснить, какие области на Солнце ответственны за вращение поляризованного излучения Крабовидной туманности, мы нанесли проекцию луча зрения (пересечение плоскости, проходящей через центр Солнца и луч зрения на Крабовидную туманность, с фотосферой) на синоптическую карту Солнца для 13, 14, 16 и 17 июня (рис. 8). Рис. 8 показывает, что эти проекции проходят в южном полушарии Солнца, где в период наблюдений отсутствовали активные области. Поэтому и изменения в мере вращения,

происшедшие с 16 на 17 июня, и смена знака меры вращения до и после прохождения Крабовидной туманности вблизи Солнца вряд ли связаны с какими-либо отдельными активными областями (такими как солнечные пятна или флоккулы) на Солнце.

Обсуждение результатов. Итак, перечислим некоторые выводы.

1. Основной наблюдаемый эффект связан с регулярной структурой околосолнечного поля, закон спадающего которого примерно R^{-2} в области $12R_{\odot} < R < 6R_{\odot}$. Экстраполируя это поле на поверхность Солнца, получаем $V_{\text{фотосф}} = 0.4$ Гс. Характер наблюдаемого эффекта согласуется с секториальной структурой поля, так же как в [4, 6].

2. Масштабы неоднородностей солнечного ветра, имеющие угловой размер, сравнимый с размером Крабовидной туманности (~ 3.5), регистрируются неуверенно, а масштабы $\ll 3.5$ дают пренебрежимо малый вклад в регистрируемый эффект.

3. Нам не удалось обнаружить связи наблюдаемого характера изменения меры вращения с фотосферной активностью Солнца. По-видимому, основной вклад в поле ветра дают слабые распределенные поля на фотосфере.

4. Широкое использование метода поляризованного просвечивания для построения структуры межпланетного поля встречает практические трудности, а именно: сложность наблюдения слабых внегалактических источников вблизи Солнца, быстрое падение эффекта Фарадея при удалении от Солнца. Следует отметить, что использование более длинных волн вряд ли улучшит положение в связи с падением процента поляризации в источниках и увеличением дифракционного рассеяния в радиотелескопах.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность сотрудникам САО, усилия которых дали возможность провести настоящие поляризационные наблюдения на радиотелескопе, — А. Б. Берлину, Д. В. Королькову, В. Я. Гольневу, Н. Н. Нижельскому, Е. Е. Спангенбергу, а также С. Юсуповой за участие в наблюдениях опорного источника, Т. Казаниной за регистрацию данных на ЭВМ и М. Кушнир за помощь в подборе материалов по солнечным пятнам.

Список литературы

1. Гинзбург В. Л. О возможности определения напряженности магнитного поля по внешней солнечной короне при ее просвечивании поляризованным радиоизлучением дискретных источников. — Изв. вузов. Радиофизика, 1960, 3, № 2, с. 341—342.
2. Гольнев В. Я., Парийский Ю. Н., Соболева Н. С. Поляризационные наблюдения покрытия Крабовидной туманности сверхкоронной Солнца на волне 6.3 см. — Изв. ГАО, 1964, 23, № 172, с. 22—24.
3. Sofue J., Kawabata K., Takahashi F., Kawajiri N. Coronal Faraday rotation of the Crab nebula 1971—1975. — Solar Phys., 1976, 50, No 2, p. 465—480.
4. Stelzried C. T., Lery G. S., Sato T., Rusch W. V. T., Ohlson J. E., Schatten K. H., Wilcox J. M. The quasi-stationary coronal magnetic field and electron density as determined from a Faraday rotation experiment. — Solar Phys., 1970, 14, p. 440—465.
5. Соболева Н. С. Наблюдение фарадеевского вращения линейно поляризованного радиоизлучения Крабовидной туманности в сверхкороне Солнца на волне 4 см с помощью Большого пулковского радиотелескопа. — Астрон. циркуляр, 1975, № 881, с. 1—3.
6. Берлин А. Б., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н., Соболева Н. С., Тимофеева Г. М. Поляризационное «просвечивание» солнечной короны в период слабой активности Солнца. — Письма в АЖ, 1978, 4, № 4, с. 191—192.
7. Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н., Корольков Д. В., Берлин А. Б., Кайдановский Н. Л., Есепкина Н. А., Зверев Ю. К., Копылов А. И., Коркин Э. И., Лавров А. П., Соболева Н. С., Стоцкий А. А., Тимофеева Г. М. Радиотелескоп РАТАН-600. Ввод в действие и исследование первой очереди. — Изв. вузов. Радиофизика, 1976, 19, № 11, с. 1581—1593.
8. Солнечные данные, 1978, № 5, № 6.