

СТРУКТУРА АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА VLA И RATAN-600 В ИЮЛЕ 1982 г.

1. AR 3804

*Ш. Б. Азмедов, В. М. Богод, В. Н. Боровик, Р. Ф. Вильсон,
Г. Б. Гельфрейх, В. Н. Дикий, А. Н. Коржавин,
К. Р. Ланг, З. Е. Петров*

Приводятся результаты совместных наблюдений активных областей на Солнце на радиотелескопах RATAN-600 и VLA в июле 1982 г.

Над развитой вспышечно-активной областью (AR 3804) в см-диапазоне волн выделяется ряд ярких ядер на фоне слабосветящегося гало. Большинство ядер — источники магнитно-тормозного излучения в сильных магнитных полях пятен. Два источника связаны с участками волокна, разделявшего области разной магнитной полярности на фотосфере: один — с плоским спектром потоков, характерным для теплового тормозного механизма излучения, другой — с растущим с длиной волны спектром и высокой излучательной способностью.

В дм-диапазоне волн основное излучение создается ярким широким бесструктурным гало, в которое вкраплены слабоналучающие ядра, не совпадающие, однако, с ядрами см-диапазона. Нетепловой спектр гало с максимумом на волнах 10—15 см, равно как и растущий спектр одного из ядер см-излучения, можно объяснить магнитотормозным излучением субрелятивистских электронов с учетом роли рассеяния радиоквантов на плазменных волнах, генерируемых нетепловыми электронами. Флоккулярная компонента источника над областью AR 3804 интерпретируется как повышенное излучение плотной корональной материи, оптически прозрачной в диапазоне 2—20 см.

Над слабо развитой активной областью (AR 3826) в см-диапазоне выделяется лишь флоккулярное повышение яркости, а в дм-диапазоне доминирует излучение гало, причем поток деталей составляет значительную долю от полного потока области.

The results of combined RATAN-600 and VLA observations of solar active regions in July 1982 are discussed. A number of bright core sources surrounded by weaker extended halo were detected above highly developed flaring active region AR 3804. Most of them are identified as sources of the thermal gyroradiation due to strong magnetic fields of sunspots penetrating into corona. Two of the core sources were associated with a filament that lies above the magnetic neutral line in the photosphere. One of these sources has a flat spectrum and is attributed to thermal bremsstrahlung. The other filament-associated source has a very steep spectrum with flux growing with wavelength. The main part of radiation at dm-wavelengths is due to bright extended very smoothed halo with some cores in it which do not coincide with cm-cores. The nonthermal spectrum of halo with maximum at 10—15 cm as well as the steep spectrum of the filament-associated source may be interpreted in terms of gyrosynchrotron radiation of subrelativistic electrons. The plage-associated component of the source above AR 3804 may be interpreted in terms of excess of thermal emission due to coronal plasma with enhanced density transparent through the wavelength range of 2 to 20 cm. A weakly developed active region AR 3826 is only presented in cm-wavelength by flocculae excess and in dm-wavelength range by the halo. The flux of the core-like details in this case constitutes a significant fraction of the total flux of the active region.

1. Введение

Радиоастрономические многоволновые наблюдения Солнца с высоким разрешением позволяют изучать трехмерную структуру активных областей и измерять на разных высотах такие важные параметры плазмы как магнитные поля в верхних слоях атмосферы, недоступные традиционным оптическим методам измерений. Структура локальных источников радиоизлучения активной области весьма сложна, обусловлена несколькими механизмами генерации и имеет много деталей различной физической природы [1, 2]. Поэтому правильная интерпретация наблюдений требует не только высокого разрешения, но и достаточно точных поляризационных измерений и хорошего перекрытия спектра в широком диапазоне волн. При изучении радиокарт активных областей Солнца,

полученных с помощью радиотелескопов апертурного синтеза, лишь в очень ограниченном числе случаев в распоряжении исследователя оказывались наблюдения на 2—3 длинах волн, выполненные параллельно [3, 4]. Сопоставления таких карт показали существенные различия характера деталей ЛИ на волнах 2.6 и 20 см. Во время рабочего совещания по ГСМ в Крыму в марте 1981 г. были также выявлены различия в данных о структуре ЛИ, полученных с высоким разрешением на радиотелескопах апертурного синтеза (VLA и WSRT) и с умеренным разрешением на радиотелескопах с заполненной апертурой (РАТАН-600 и БПР).

В данной работе авторы приводят результаты сопоставления радиоизображений активных областей AR 3804, AR 3826 и AR 3828 (соответствующие группам пятен № 228+229, 253 и 256 по нумерации бюллетеня «Солнечные данные», 1982 г.) на нескольких близких волнах в диапазоне 17—22 см, полученных

ТАБЛИЦА 1

λ , см	$\theta_{0.5}$ E — W, сек. дуги	$\theta_{0.5}$ N — S, мин. дуги
2.0	18	12.5
2.3	21	14.4
2.7	25	16.9
3.2	29	20.0
4.0	36	25.0
13.0	120	81.0
21.0	190	131.0
31.0	279	193.0

на VLA с разрешением $3'' \times 4''$, и одномерных сканов тех же областей, параллельно выполненных на РАТАН-600 на восьми волнах в диапазоне 2—31 см с разрешением от $18''$ до $4'5''$ соответственно. При этом существенным оказался тот факт, что обладая более низким разрешением, РАТАН-600 в то же время обеспечивал в своем пространственно-частотном интервале более полное заполнение uv -плоскости. Это позволило в диапазоне 20 см выявить детали, не регистрировавшиеся на VLA, и таким образом существенно более полно представить структуру ЛИ в этом диапазоне волн.

По наблюдениям на РАТАН-600 на коротких волнах сантиметрового диапазона в ЛИ, связанном с AR 3804, выделяется ряд ярких и узких деталей с сильной круговой поляризацией, по положению совпадающих с отдельными солнечными пятнами. Кроме этого, аналогичные узкие и яркие детали выявлены также в областях раздела магнитных полярностей на уровне фотосферы в районе наибольших их градиентов. Яркие компактные детали, обнаруженные в дециметровом диапазоне с помощью VLA, не совпадают с максимумами сантиметрового излучения. Однако основная часть излучения в диапазоне 20 см генерируется не в этих ярких деталях, а в протяженном гало, перекрывающем всю активную область.

2. Наблюдения Солнца на РАТАН-600

При выполнении данных наблюдений Солнца радиотелескоп РАТАН-600 [5] использовался в режиме работы отражателя Южного сектора совместно с плоским перископическим зеркалом. Радиометры солнечного спектрально-поляризационного комплекса (ССПК) и аппаратура регистрации установлены на облучателе, который может перемещаться по дуговым рельсам и использоваться для наблюдений в различных азимутах по обе стороны от меридиана [6]. В данной программе были реализованы наблюдения в пяти азимутах: 19, 11, 0, 348, 340°. При этом поверхность кругового отражателя выставлялась по параболе с вертикальной образующей, а перископический отражатель устанавливался на угол, соответствующий высоте объекта наблюдений.

В табл. 1 приведены данные о длинах волн радиометров ССПК и о размерах диаграммы по уровню половины от максимальной мощности $\theta_{0.5}$. На каждой волне регистрировались полная интенсивность (параметр Стокса I) и разность двух круговых поляризаций (параметр Стокса V).

Приемные рупорки входных трактов пяти радиометров сантиметрового диапазона располагались на фокальной линии параболического цилиндра вторичного зеркала (облучателя) с небольшим сдвигом от главного фокуса антенны. Три радиометра дециметрового диапазона волн имели специально разработанный совмещенный облучатель нового типа с единым фазовым центром для всех трех волн [7]. Точность совмещения диаграмм не хуже $3''$, величина поляриза-

ционных искажений не превышает 0.5 % при наблюдениях точечного источника. Выносы из главного фокуса, однако, были невелики, обеспечивая невысокий уровень абберационных искажений диаграммы направленности антенны (абберационные лепестки не превосходят 10 % от основного максимума на каждой волне). Наблюдаемый источник последовательно проходит за счет суточного движения диаграммы направленности на каждой волне со сдвигом по времени между крайними волнами около 50 с. На рис. 1 показаны диаграммы направленности на разных волнах и их взаимное расположение в пространстве согласно расчетам, выполненным А. Н. Коржавиным. Исправление абберационных искажений и временного сдвига записей на разных волнах проводится с помощью специально разработанных программ чистки на ЭВМ.

Система регистрации информации, поступающей с радиометров, основана на использовании компьютера совместно с необходимой периферией и аппаратуры аналогового и цифрового преобразования, выполненной в стандарте

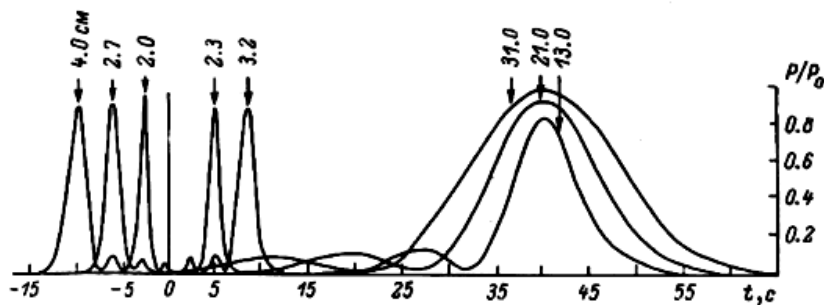


Рис. 1. Взаимное расположение в пространстве откликов диаграммы направленности на прохождение точечного источника на разных волнах при наблюдениях Солнца на РАТАН-600 с помощью ССПК.

САМАС. Для удобства пользования система оснащена дисплеем и графопостроителем. Поступающая информация индицируется на дисплее одновременно на всех 16 каналах и заносится в накопитель на магнитной ленте. Результат наблюдений после экспресс-обработки выводится на графопостроитель. Такой режим используется для оперативного выбора объекта наблюдений. Полная обработка, учитывающая искажения записи, вносимые антенной, калибровки по потокам и координатам проводятся на более крупной ЭВМ, и результат также представляется на графопостроителе. Для определения потоков радиоизлучения локальных источников в качестве опорного объекта использовался радиоисточник Крабовидной туманности. Наблюдения Солнца на РАТАН-600 выполнялись ежедневно в период с 7 июля по 2 августа 1982 г. На VLA были получены карты активных областей за 12, 13, 19, 20, 27 и 28 июля 1982 г.

Большая группа пятен на Солнце в июле 1982 г. № 228+229 (ПЦМ 15 июля на широте $+15^\circ$ [8]) развилась в активной области AR 3804, проходившей по диску Солнца по крайней мере 5 раз, причем в июле эта группа достигла максимального развития. 8 июля группа пятен появилась на восточном краю Солнца в виде большого скопления ядер в общей полутени. 9 июля в ней произошла протонная вспышка, следующее протонное событие произошло 12 июля. 13 июля площадь группы достигла максимального значения 3300 мдп (миллионные доли полусферы). В это время наблюдаются большие собственные движения пятен [9]. К 19 июля ее площадь уменьшилась до 1200 мдп, а протяженность по долготе достигла 27° . За все время нахождения на диске с 8 по 22 июля, согласно Солнечным данным [8] и Solar Geophysical Data [10], в этой активной области наблюдалось более 240 вспышек. В целом эта АО была одной из самых мощных за последние два цикла солнечной активности.

В период 27—28 июля общий уровень солнечной активности был низким. Исследовавшиеся активные области AR 3826 и AR 3828, включавшие в себя группы пятен № 253 и 256 на широтах -15° и $+6^\circ$ соответственно, были слабо развитыми.

3. Структура локального источника AR 3804 в сантиметровом диапазоне волн

Структура исследуемой АО была очень сложной, поэтому при наблюдениях с одномерным разрешением радиотелескопа РАТАН-600 удается выделить лишь часть достаточно четко проявляющихся отдельных деталей (компонентов) локального источника. Для получения более уверенного разделения ЛИ на отдельные компоненты подробный анализ записей был произведен для 15 июля

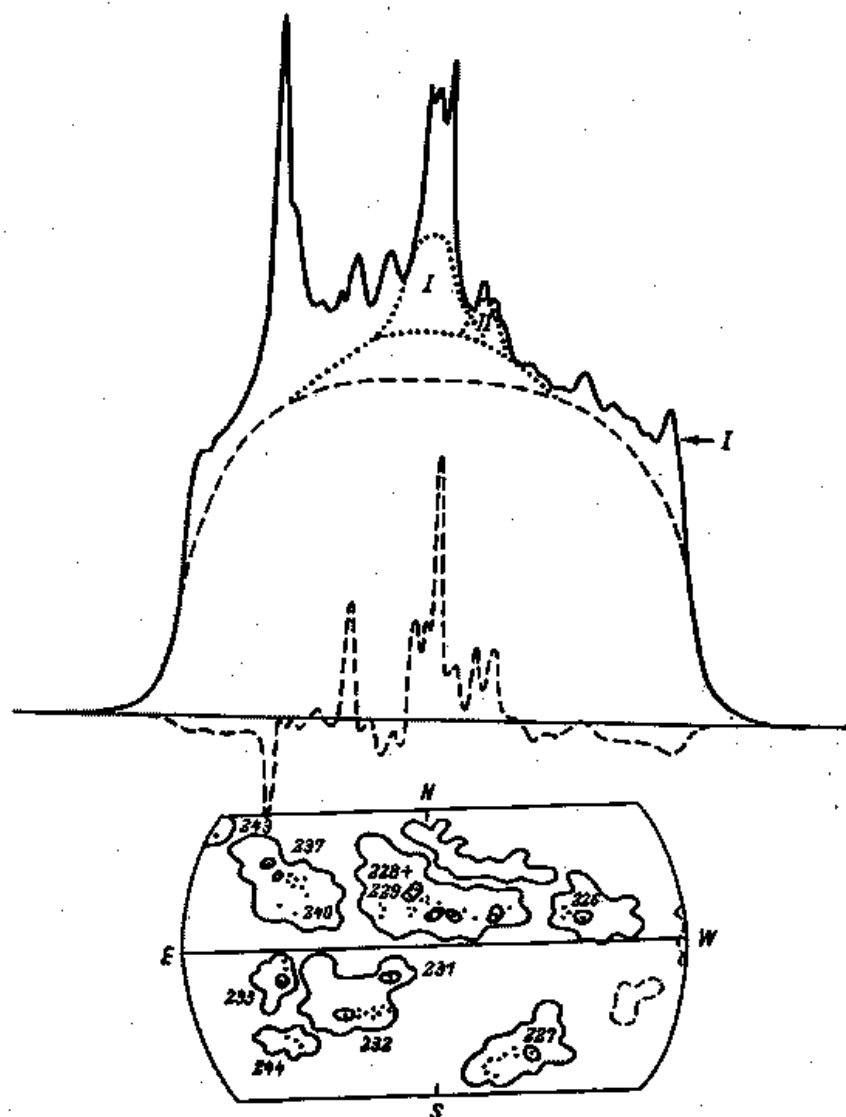


Рис. 2. Запись Солнца на волне 2,3 см в каналах интенсивности (I) и круговой поляризации (V) по наблюдениям на РАТАН-600.

Внизу — часть диска Солнца с контурами флоккул и групп пятен.

(а не для дней наблюдений на VLA), поскольку в этот день АО была расположена близко к центру диска Солнца и имела сильно вытянутую по долготе структуру, что уменьшало неоднозначность при оптическом отождествлении отдельных деталей радиоизображения. На рис. 2 приведена запись Солнца на волне 2,3 см в каналах I и V по наблюдениям в меридиане ($A=0^\circ$) на РАТАН-600 15 июля 1982 г. Пунктирная линия показывает уровень излучения спокойного Солнца, штриховая — способ выделения гало и флоккулярного излучения вокруг группы пятен № 228+229. Под записью Солнца показана часть диска Солнца с изображением групп пятен и контуров флоккул на ту же дату, согласно бюллетеню «Солнечные данные», 1982 г. Кроме наблюдений в меридиане 15 июля

были получены записи Солнца еще в двух азимутах — 19 и 11°, что позволило измерить вторую координату максимумов яркостей деталей, достаточно четко проявившихся на записях.

На рис. 3 представлены одномерные изображения локального источника AR 3804 по наблюдениям на РАТАН-600 в 9:19 UT на волнах 2.0 и 2.3 см

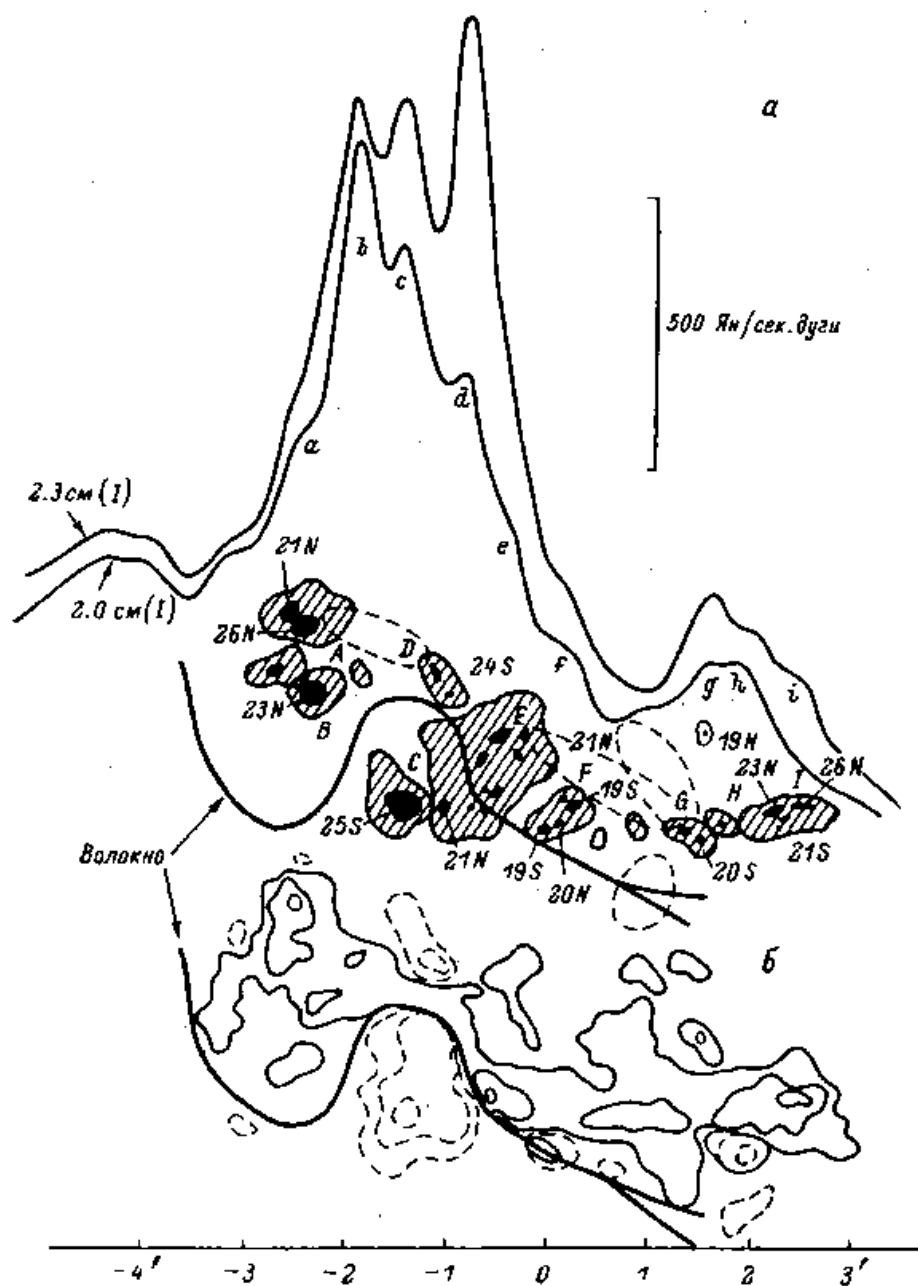


Рис. 3.

Пояснения см. в тексте.

15 июля 1982 г. Малыми буквами от *a* до *i* обозначены отдельные пики радиояркости в ЛИ. Под ними дано схематическое изображение группы пятен № 228+229 согласно фотогелиограмме на 3:38 UT, любезно предоставленной М. Н. Гневышевым (ГАС ГАО). Максимальные значения магнитного поля в пятнах в сотнях гаусс указаны согласно бюллетеню «Солнечные данные». Сплошной заливкой показаны тени пятен, штриховкой — полутени. Отдельные пятна обозначены большими буквами от *A* до *I*. Под изображением группы пятен дана карта магнитного поля, полученная в Потсдамской солнечной обсерватории [11]

в линии Fe I 5250 Å на интервале времени 13 : 22—14 : 13 UT. Сплошные линии соответствуют северной полярности магнитного поля, штриховые — южной; уровни соответствуют 65, 200 и 500 Гс. Видно, что имеет место сильный разбаланс магнитных потоков с преобладанием северной полярности.

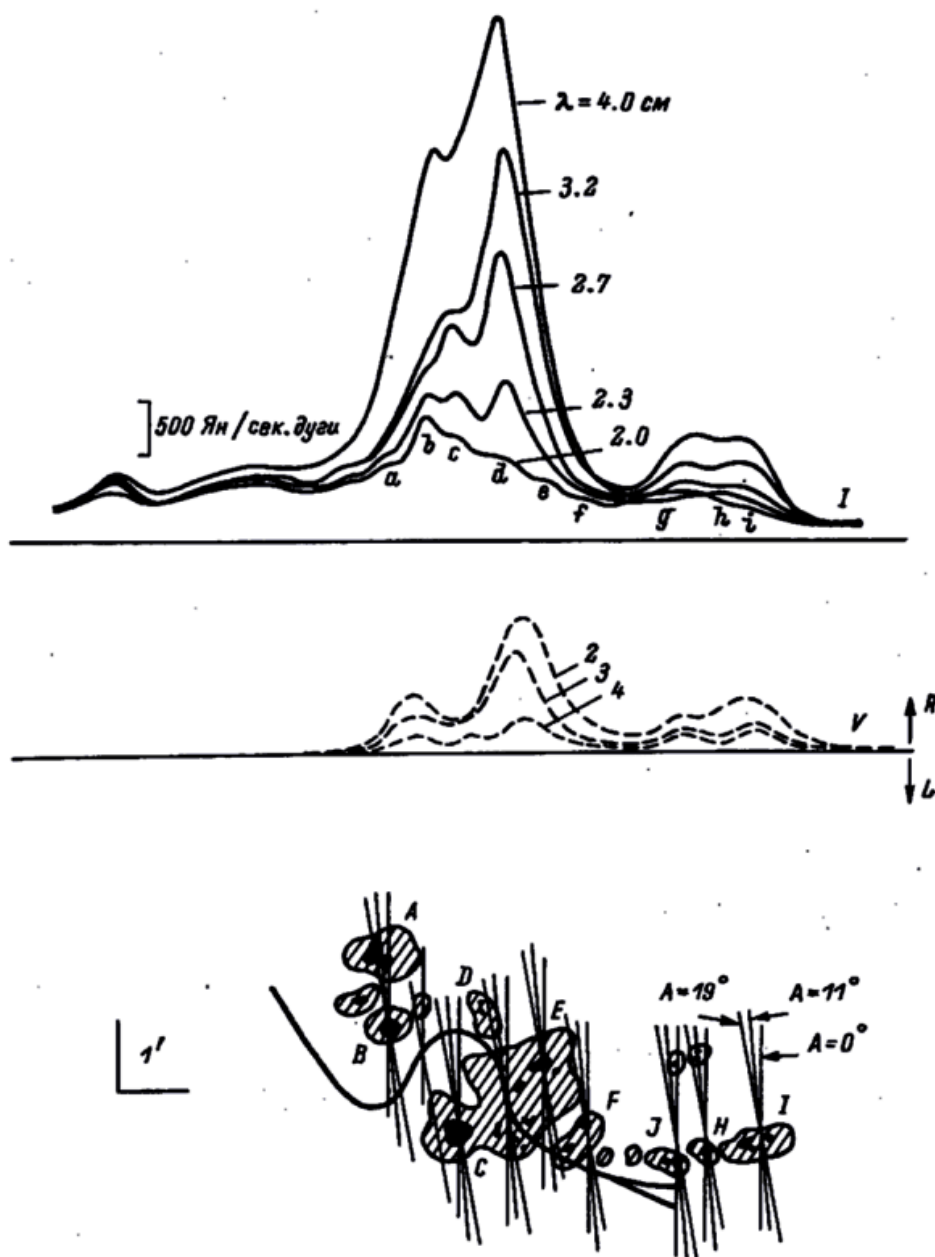


Рис. 4. Изображение ЛЯ AR 3804 по наблюдениям на пяти волнах на РАТАН-600 и его оптическое отождествление.

Сплошной жирной линией показано волокно согласно H_{α} -фильтрограмме на момент времени 7 : 33 UT [11]. Важно отметить, что волокно, расположенное, как обычно, вдоль нулевой линии продольного магнитного поля, устойчиво существовало в течение всего времени нахождения АО на диске Солнца, сохраняя характерную S-образную форму (как следует из наблюдений этой АО в линии H_{α} , выполненных в ИЗМИРАНе Э. И. Могилевским и др.).

На изображениях пятен наложены контуры деталей синтезированных на VLA радиокарт области AR 3804 на частоте 1380 МГц за 12 и 19 июля 1982 г., при этом кроме вращения Солнца, учтены также собственные движения пятен.

Угловая шкала по горизонтали на рис. 3 показана минутными марками, нуль соответствует положению центра диска Солнца.

Можно видеть, что на сканах четко выделяется ряд узких источников *a, b, c, d, e, f, g, h, i*, наложенных на более широкую и менее контрастную область излучения — гало, которое разбивается на две части, обозначенные римскими цифрами *I* и *II* (рис. 2). Это гало, в свою очередь, накладывается на еще более широкую и слабую подложку, которая вызвана повышенным свечением флоккульного поля, окружавшего активную область AR 3804 и слившегося на одномерных сканах с аналогичным свечением вокруг других активных областей в единое образование на всей восточной половине диска Солнца (рис. 2). Большинство узких источников удается отождествлять с пятнами, которые обозначены буквами *A, B, C, D, E, F, G, H, J* и *I* на рис. 3 и 4.

На рис. 4 дано изображение локального источника AR 3804 по наблюдениям на РАТАН-600 в меридиане ($A=0^\circ$) на пяти волнах диапазона 2—4 см в интенсивности (*I*) и круговой поляризации (*V*) на 15 июля 1982 г. Записи по каналу *V* на волнах 2.0 и 4.0 см в этот день отсутствовали. Под кривыми показано отождествление отдельных деталей ЛИ с оптическими образованиями на основе наблюдений в трех азимутах: $A=19^\circ$ (7 : 55 UT), $A=11^\circ$ (8 : 29 UT) и $A=0^\circ$ (9 : 19 UT).

Разнообразие спектров для разных деталей ЛИ бросается в глаза, что говорит о разнообразии физических условий и механизмов генерации радиоизлучения в соответствующих областях. Общим, однако, является в диапазоне 2—4 см рост потока с длиной волны во всех точках профиля ЛИ (рис. 4). Как видно из рис. 3 и 4, на волнах 2.0 и 2.3 см, где разрешение РАТАН-600 наиболее высокое, на сканах АО практически однозначно выделяются восемь узких деталей, шесть из которых являются источниками ядерного (пятенного) типа. На более длинных волнах 2.7, 3.2 и 4.0 см из-за некоторого падения разрешения, с одной стороны, и увеличения размеров деталей — с другой, кривые выглядят более сглаженными. В предположении, что все восемь узких деталей существуют и на этих волнах, было проведено их выделение на соответствующих сканах, при этом удалось выделить на волнах 3.2 и 4.0 см еще одно ядро (*h*), связанное с пятном *H*. Окончательный результат разделения профиля ЛИ на детали показан на рис. 5, *a—d*.

На рис. 5 нулевой уровень соответствует уровню спокойного Солнца, повышение радиоизлучения над которым и является собственным радиоизлучением активной области. Штрихпунктирной линией показана оценка уровня флоккульного излучения, а штриховой — разделение профиля ЛИ на отдельные детали. Для сравнения с данными на сантиметровых волнах здесь же показаны профили ЛИ и на волнах 13 и 21 см, полученные на РАТАН-600 15 июля 1982 г., а также данные наблюдений этой АО 12 июля 1982 г. на волне 21.7 см (1380 МГц) на радиотелескопе VLA. На волнах 13 и 21 см, в отличие от более коротких, ЛИ представляет собой широкое бесструктурное образование, охватывающее собой всю активную область. Такие образования на VLA не регистрируются, а наблюдаемые на этом инструменте тонкие детали структуры ЛИ (размером 10—30'') по потоку составляют лишь около 5 % от полного потока АО на волне 21 см.

Определение количественных характеристик для отдельных деталей ЛИ выполнено с учетом того факта, что их одномерные профили на рис. 5 не слишком отличаются от гауссианы. Результаты измерений приведены в табл. 2. Одномерное сглаженное диаграммой антенны наблюдаемое гауссовское распределение интенсивности можно описать следующей формулой:

$$F_y(x) = F_y^0 \exp(-2.773x^2/B^2). \quad (1)$$

Параметрами, описывающими гауссиану (1), являются ее высота F_y^0 , Ян/сек. дуги, и ширина B , сек. дуги, на уровне половины от максимального значения интенсивности. Эти две величины непосредственно измеряются, например, на основании рис. 5 и приведены в колонках 3 и 4 табл. 2. Из сопоставления кривых *I* и *V* оказалось, что ширины профилей отдельных деталей как в интенсивности, так и в поляризации практически совпадают, отличаясь только лишь

высотой. Это означает, что в пределах всего профиля степень поляризации постоянна, и она может быть вычислена по формуле

$$p = (F_y^0)^V / (F_y^0)^I. \quad (2)$$

Эта третья, непосредственно измеряемая характеристика приведена в колонке 5 табл. 2. Все остальные величины в колонках 6—10 табл. 2 являются

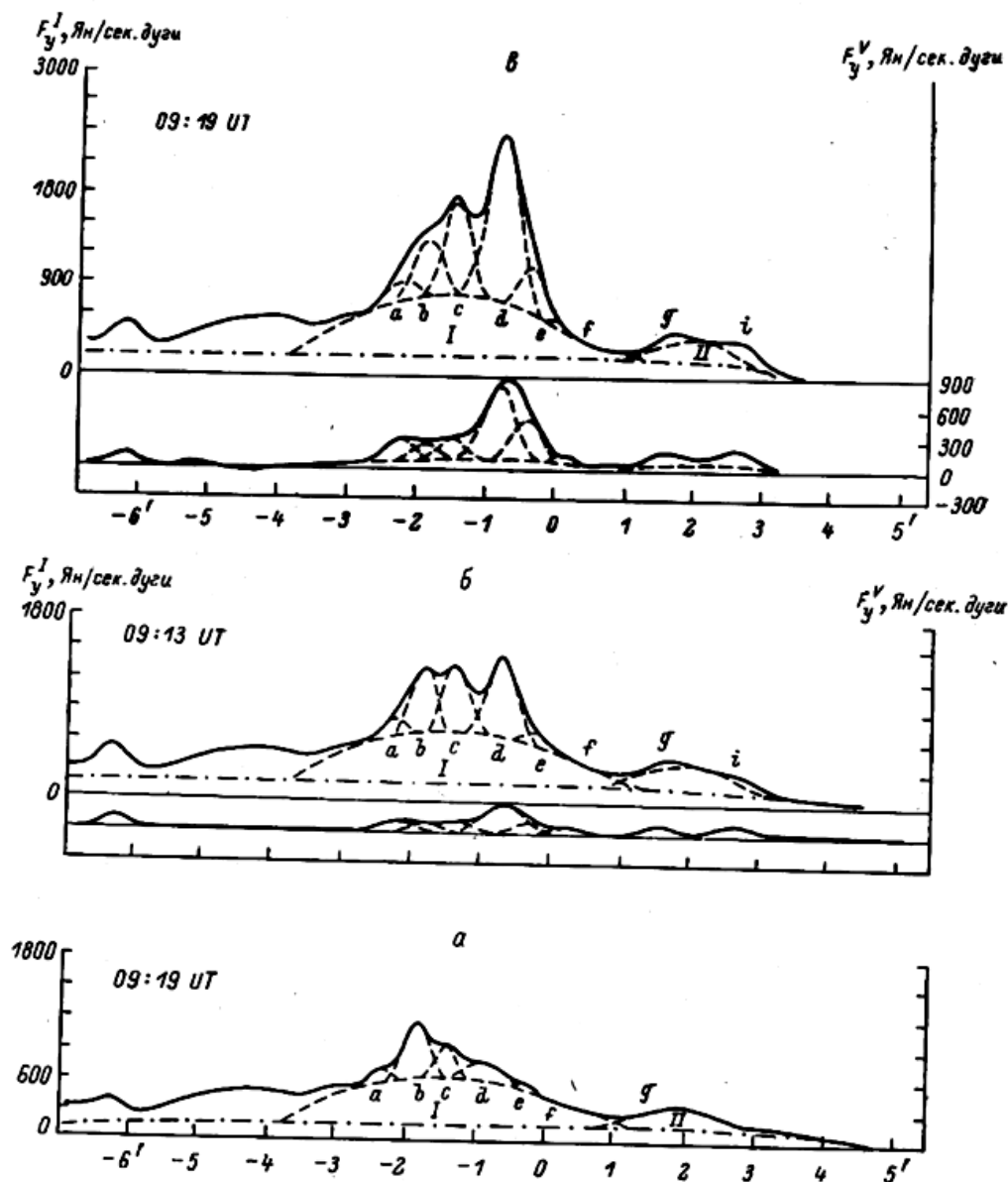


Рис. 5. Разделение на детали изображения ЛИ AR 3804 согласно наблюдениям на РАТАН-600 на волне 2.0 см (а) и волнах 2.3 см (б), 2.7 см (в), 3.2 см (г), 4.0 см (д), 13.0 см (е) и 21.0 см (ж).

производными от этих измерений. Полный поток F (колонка 6) равен площади под гауссианой:

$$F = 1.064 F_y^0 B / 10^4, \text{ с. е. п.} \quad (3)$$

Учитывая, что в отсутствие aberrаций форма диаграммы направленности радиотелескопа близка к гауссиане с шириной $\theta_{0.5}$ на уровне половины от максимума (табл. 1), и полагая, что «истинное» распределение одномерной интенсивности $I_y(x)$ по источнику также описывается гауссианой, аналогично (1),

но с параметрами I_y^0 и B_0 , эти величины, приведенные в колонках 7, 8 табл. 2, можно вычислить следующим образом:

$$B_0 = \sqrt{B^2 - \theta_{0.5}^2}, \text{ сек. дуги;} \quad (4)$$

$$I_y^0 = F_y^0 B / B_0, \text{ Ян/сек. дуги.} \quad (5)$$

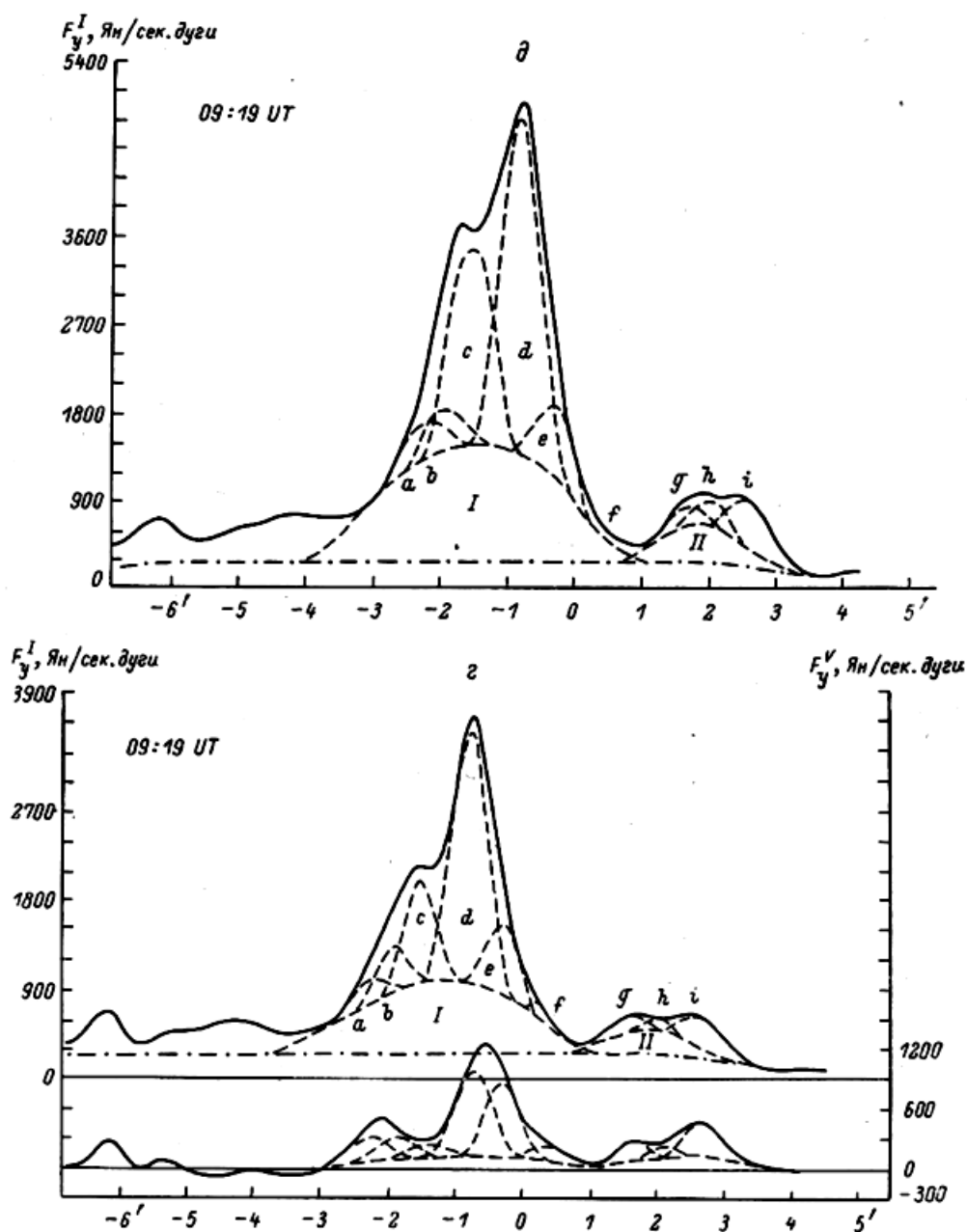


Рис. 5 (продолжение).

Далее, считаем, что «истинное» распределение яркостной температуры $T_*(x, y)$ описывается двумерной гауссианой с круговой симметрией и с шириной B_0 на уровне половины от максимального значения T_*^0 :

$$T_*(x, y) = T_*^0 \exp[-2.773(x^2 + y^2)/B_0^2], \text{ К.} \quad (6)$$

Интегрируя (6), по y получаем одномерное распределение интенсивности:

$$I_y(x) = 6.91 \cdot 10^{-4} T_*^0 B_0 \exp(-2.773x^2/B_0^2)/\lambda^2. \quad (7)$$

Поскольку для этого распределения максимальное значение I_y^0 уже известно (5), то получаем формулу для T_y^0 :

$$T_y^0 = 1.443 I_y^0 \lambda^2 / B_0. \text{ К.} \quad (8)$$

Результаты вычислений по (8) приведены в колонке 9 табл. 2. На рис. 6 на основании данных, приведенных в табл. 2, показаны спектры потоков и яркостных температур T_y^0 для всех деталей локального источника AR 3804. При этом следует иметь в виду следующее. Потоки радиоизлучения по существу являются непосредственно наблюдаемыми величинами [см. формулу (3)], и поэтому они менее всего искажены, в частности антенным сглаживанием. Наиболее важные поправки к этим величинам, связанные с методикой обработки, заключаются в том, что эти характеристики являются на самом деле приращенными потоками над соответствующим фоном. Так, для ярких источников фоном

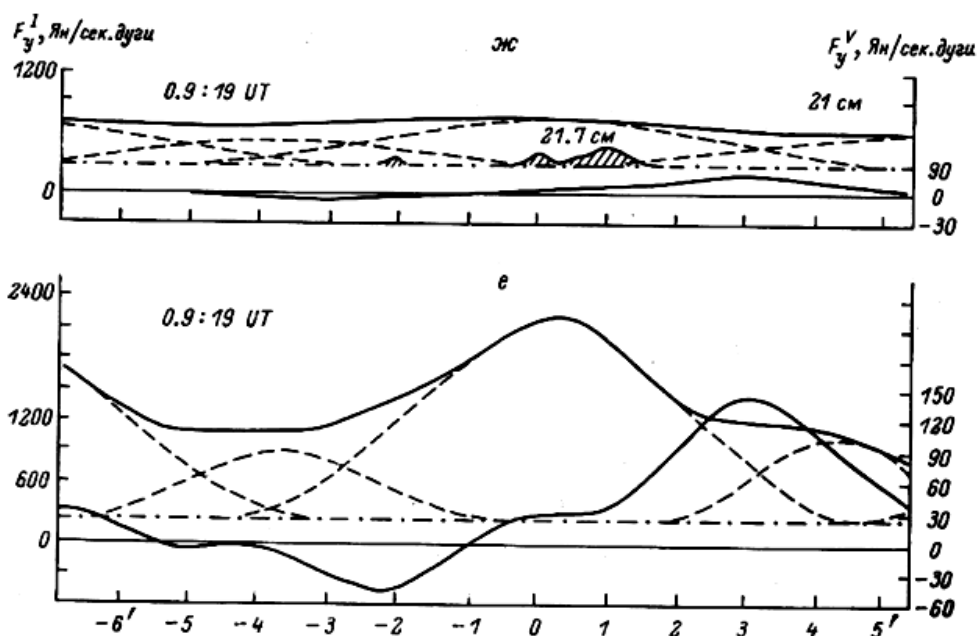


Рис. 5 (продолжение).

служит гало, для гало — флоккулярный фон и, наконец, для флоккулярных повышений радиояркости — фон спокойного Солнца.

На рис. 6, а приведены спектры именно приращений потока, т. е. непосредственно величины, приведенные в колонке 6 табл. 2. Яркостные температуры прямо связаны с физическими условиями генерации радиоизлучения, но они сильнее всего искажаются антенным сглаживанием. Методика деконволюции, основанная на предположении о гауссовской форме «истинных распределений», описана выше. Методика выделения отдельных деталей, как и в случае потоков F , дает на самом деле приращение яркостной температуры над соответствующим фоном. Полная наблюдаемая яркостная температура является суммой этого приращения и яркостной температуры окружающего фона с учетом иерархии фонов, упомянутой выше.

В отличие от колонки 9 табл. 2 на рис. 6, б приведены спектры полных яркостных температур соответствующих деталей. Базовым фоном при этих расчетах здесь является уровень излучения спокойного Солнца. Сведения о потоках, размерах и яркостных температурах спокойного Солнца также приведены в табл. 2. В качестве наблюдаемых величин приняты значения потока и размеры, а яркостная температура вычислена в предположении о Спокойном Солнце как равномерно светящемся диске с радиусом, равным указанному в табл. 2. Это предположение кажется вполне справедливым на волнах 2—4 см, как это следует, например, из наблюдений на РАТАН-600 [12]. Отклонения от равномер-

ТАБЛИЦА 2

Деталь ЛД	λ , см	$R_{\text{гг}}$ Ян/сек. дуги	B сек. дуги	p , %	F , с. в. п.	$B_{\text{гг}}$ сек. дуги	$I_{\text{гг}}$ Ян/сек. дуги	$T_{\text{в}}$, 10^3 К	Отождествление и некоторые параметры
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ядро а	2.0	140	18	—	0.27	≤ 8	≥ 315	≥ 230	Пятна А и В $H_{\text{опт}} = 2100 \div 2600$ Гс, N $H_{\text{раз}} = 1690$ Гс, N $EM(2.0) = 3.7 \cdot 10^{29}$ см ⁻⁵ $N_e = 2.4 \cdot 10^{10}$ см ⁻³
	2.3	150	24	53R	0.38	10	360	280	
	2.7	240	29	100R	0.74	13	535	430	
	3.2	280	34	100R	1.01	17	560	490	
	4.0	400	44	—	1.87	23	765	770	
Ядро б	13.0	—	—	—	(1.17)	(41)	(268)	(1600)	Часть волокна между пятнами В и С $EM(2.0) = 5.6 \cdot 10^{29}$ см ⁻⁵ $N_e = 2.1 \cdot 10^{10}$ см ⁻³ $H(2.3) = 190$ Гс $H(2.7) = 590$ Гс $H(3.2) = 670$ Гс
	21.0	—	—	—	(0.75)	(53)	(133)	(1600)	
	2.0	640	25	—	1.70	17	941	320	
	2.3	740	26	8R	2.05	14	1374	750	
	2.7	600	31	30R	1.98	16	1162	770	
Ядро с	3.2	500	35	40R	1.86	18	972	800	Пятно С $H_{\text{опт}} = 2500$ Гс, S
	4.0	440	42	—	1.97	18	1027	1320	
	13.0	—	—	—	(0.35)	(20)	(163)	(2000)	
	21.0	—	—	—	(0.13)	(20)	(62)	(2000)	
	2.0	440	22	—	1.03	12	807	390	
Ядро д	2.3	730	26	7R	2.02	14	1356	740	Часть волокна между тенями пятен С и Е внутри общей полушени $EM(2.0) = 1.9 \cdot 10^{29}$ см ⁻⁵ $N_e = 0.9 \cdot 10^{10}$ см ⁻³ $H(2.3) = 650$ Гс $\epsilon_0(4.0) = 6.0 \cdot 10^{-20}$ эрг/(см ³ ·с·Гс·ср)
	2.7	1040	30	19R	3.32	15	2080	1460	
	3.2	1080	36	11R	4.14	20	1944	1440	
	4.0	2140	45	—	10.25	24	4012	3880	
	13.0	—	—	—	(4.02)	(43)	(878)	(5000)	
Ядро е	21.0	—	—	—	(2.52)	(55)	(430)	(5000)	Пятно Е $H_{\text{опт}} = 2100$ Гс, N $H_{\text{раз}} = 1615$ Гс, N $EM(2.0) = 5.0 \cdot 10^{29}$ см ⁻⁵
	2.0	270	35	—	1.01	30	315	60	
	2.3	940	32	28R	3.20	23	1308	440	
	2.7	1740	35	45R	6.48	23	2648	1220	
	3.2	2700	39	33R	11.21	25	4212	2500	
Ядро е	4.0	3560	45	—	17.05	24	6675	6450	
	13.0	—	—	—	(2.17)	(25)	(817)	(8000)	
	21.0	—	—	—	(0.83)	(25)	(313)	(8000)	
	2.0	80	17	—	0.14	≤ 8	≥ 170	≥ 120	
	2.3	80	24	100R	0.20	10	192	150	
Ядро е	2.7	460	29	100R	1.42	13	1026	830	
	3.2	780	34	100R	2.82	17	1560	1360	
	4.0	900	44	—	4.22	22	1800	1900	

Т А Б Л И Ц А 2 (продолжение)

Деталь или	λ , см	F_{gr}^0 нм/сек. дуги	B , сек. дуги	p , %	F , с. е. п.	H_0 сек. дуги	I_{gr}^0 нм/сек. дуги	T_{gr} , 10^4 К	Относительные и некоторые параметры
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Даро /	13.0	—	—	—	(2.09) (1.25)	(40) (50)	(490) (236)	(3000) (3000)	$N_0=0.9 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$
	21.0	—	—	—	—	—	—	—	—
	2.0	20	17	—	0.04	≤ 8	> 42	> 30	Питио F
	2.3	25	20	100R	0.05	≤ 9	≥ 56	≥ 48	$H_{out}=2000$ Гс, N
	2.7	60	24	100R	0.15	≤ 10	≥ 144	≥ 152	$H_{out}=1725$ Гс, N
Даро /	3.2	160	29	100R	0.49	≤ 11	> 422	> 369	$EM(2.0)=5.3 \cdot 10^{22}$ см $^{-3}$
	4.0	220	35	—	0.82	≤ 12	≥ 642	≥ 1240	$N_0=0.9 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$
	13.0	—	—	—	(0.38)	(21)	(172)	(2000)	—
	21.0	—	—	—	(0.25)	(27)	(85)	(2000)	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Даро /	2.0	470	200	—	10.06	200	470	14	Магнитосфера планет A, B, C, D, E, F
	2.3	500	200	16R	10.70	200	500	19	$EM(2.0)=2.1 \cdot 10^{23}$ см $^{-3}$
	2.7	660	200	15R	14.19	200	660	35	$N_0=1.2 \cdot 10^9$ см $^{-3}$
	3.2	760	205	21R	16.42	200	770	57	$H(2.3)=370$ Гс
	4.0	1140	205	—	24.76	200	1160	135	—
Даро / Продолжение	13.0	1200	—	5L	—	—	—	1270	$\% (4.0)=1.5 \cdot 10^{-22}$ эрг/(см 3 ·с·лн·ср)
	21.0	330	—	3L	—	—	—	800	$\% (13.0)=1.3 \cdot 10^{-22}$ эрг/(см 3 ·с·лн·ср)
	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2.0	20	16	(100R)	0.03	≤ 8	40	> 29	Питио J
	2.3	70	21	100R	0.16	≤ 9	≥ 163	≥ 139	$H_{out}=2000$ Гс, S
Даро g	2.7	140	27	100R	0.40	≤ 10	≥ 378	≥ 400	$H_{out}=1820$ Гс, N
	3.2	160	33	100R	0.56	14	377	400	—
	4.0	220	41	—	0.96	16	564	817	—
	13.0	—	—	—	(0.58)	(29)	(189)	(1600)	—
	21.0	—	—	—	(0.36)	(37)	(93)	(1600)	—
Даро h	2.0	< 5	—	—	—	—	—	—	Питио H
	2.3	< 5	—	—	—	—	—	—	$H_{out}=2100$ Гс, S
	2.7	< 5	—	—	—	—	—	—	$H_{out}=1370$ Гс, N
	3.2	120	31	100R	0.40	≤ 11	≥ 338	≥ 456	—
	4.0	260	38	100R	1.05	≤ 12	≥ 823	≥ 1580	—
Даро i	13.0	—	—	—	(0.53)	(22)	(225)	(2500)	—
	21.0	—	—	—	(0.30)	(27)	(106)	(2500)	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2.0	< 5	—	—	—	—	—	—	Питио I
	2.3	60	26	100R	0.17	14	11	60	$H_{out}=2600$ Гс, N

Т А Б Л И Ц А 2 (продолжение)

Деталь ЛП	λ , см	$F_{\text{дл}}^{\circ}$ Ян/сек. дуги	B , сек. дуги	p , %	F , п. с. в. п.	$B_{\text{дл}}$ сек. дуги	$I_{\text{дл}}^{\circ}$ Ян/сек. дуги	$T_{\text{дл}}$, 10^3 К	Отождествление и некоторые параметры
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ядро i	2.7 3.2 4.0 13.0 21.0	180 340 500 — —	35 40 46 — —	100R 100R — — —	0.67 1.45 2.45 (1.44) (0.90)	23 26 26 (47) (60)	274 523 885 (288) (141)	128 298 789 (1500) (1500)	$H_{\text{дл}} = 1680$ Гс, N
Гало II	2.0 2.3 2.7 3.2 4.0 13.0 21.0	270 290 280 280 400 990 300	76 81 86 90 95 — —	— 15R 25R 28R — 26R 9R	2.18 2.50 2.56 2.49 4.04 — —	74 78 82 84 87 — —	277 301 294 279 437 — —	22 30 39 49 116 1270 800	Магнитосфера пятен G, H, J, I $EM(2.0) = 3.2 \cdot 10^{26}$ см ⁻⁶ $N_{\text{с}} = 2.4 \cdot 10^9$ см ⁻³ $H(2.3) = 350$ Гс $H(3.2) = 470$ Гс $e_0(4.0) = 3.0 \cdot 10^{-22}$ эрг/(см ³ ·с·Гц·ср)
Дм-гало	2.0 2.3 2.7 3.2 4.0 13.0 21.0	120 120 110 130 200 2020 450	— — — — 280 330	— — — — 1.5R 1.0R	— — — — 55.88 15.80	— — — — 228 266	— — — — 2300 560	— — — — 2470 1350	Магнитосфера всего комплекса активности $e_0(13.0) = 2.3 \cdot 10^{-22}$ эрг/(см ³ ·с·Гц·ср)
Флокулярное увеличение яркости	2.0 2.3 2.7 3.2 4.0 13.0 21.0	230 230 230 240 240 220 270	600 600 600 600 600 600 600	— — — — — — —	14.68 14.68 14.68 15.32 15.32 14.04 17.24	600 600 600 600 600 600 600	230 230 230 240 240 220 270	2.2 2.9 4.0 5.9 9.3 89.0 288.0	Флокулярная комплекс актив- ности $EM(2.0) = 3.4 \cdot 10^{27}$ см ⁻⁶ $N_{\text{с}} = 2.7 \cdot 10^8$ см ⁻³
Спокойное Солнце	2.0 2.3 2.7 3.2 4.0 13.0 21.0	— — — — — — —	— — — — — — —	— — — — — — —	500 410 320 255 182 55 46	980 989 988 1003 1008 1035 1050	— — — — — — —	10.2 10.9 11.6 12.6 14.0 42.5 90.0	

ности свечения спокойного Солнца на дециметровых волнах (эллиптичность уярчение на краю) с точки зрения лишь учета вклада в полную наблюдаемую яркостную температуру деталей АО можно считать несущественными.

Зависимость радиорadiusа от длины волны также основана на наблюдениях на РАТАН-600 [12]. Значения потоков спокойного Солнца, приведенные в табл. 2, основаны на абсолютных измерениях интегрального потока Солнца на обсерваториях Тойокава и Оттава [13] и являются минимальными из изме-

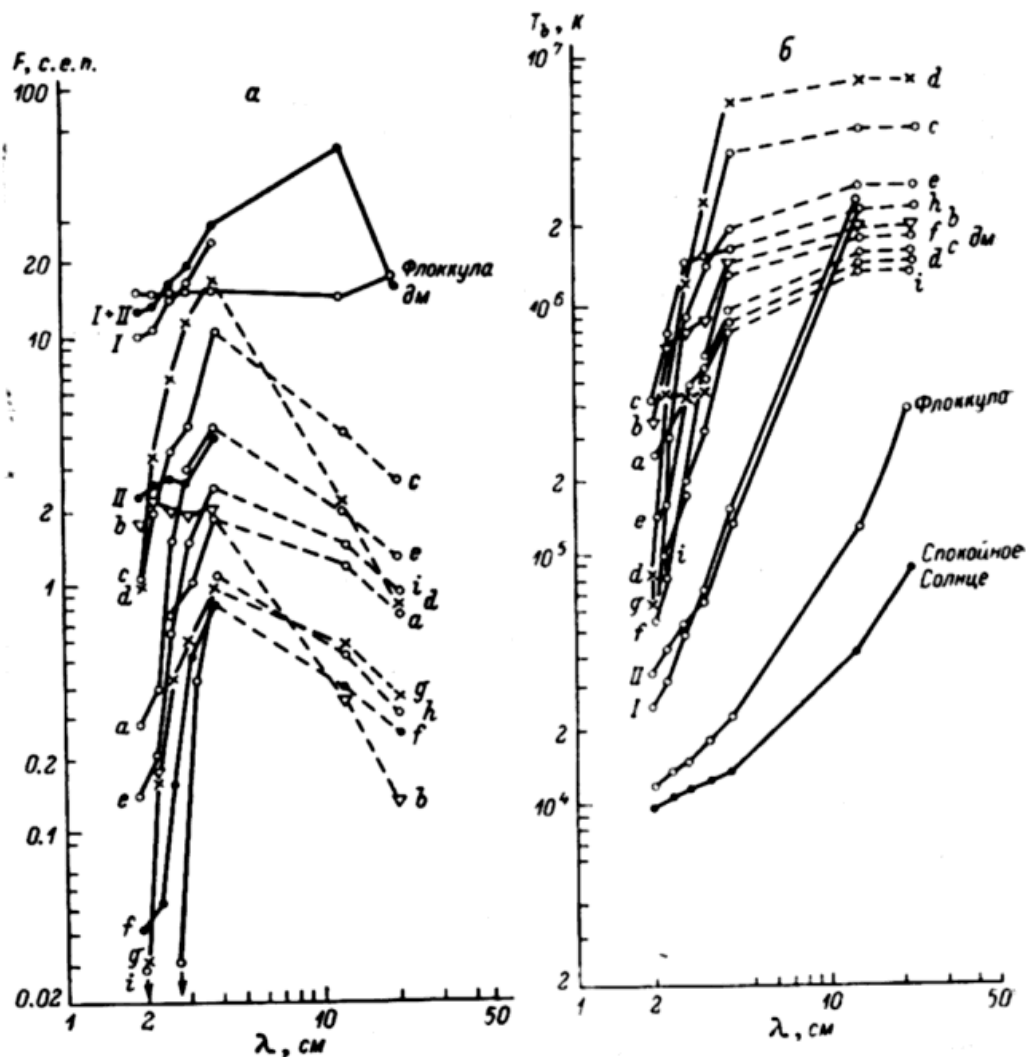


Рис. 6. Спектры потоков (а) и яркостных температур (б) деталей ЛИ AR3804.

ренных в период минимума солнечной активности 1974—1975 гг. Эти величины потоков в табл. 2 отнесены к одной астрономической единице, равно как и радиорadiusы ($R_{\text{солн}} = 960''$).

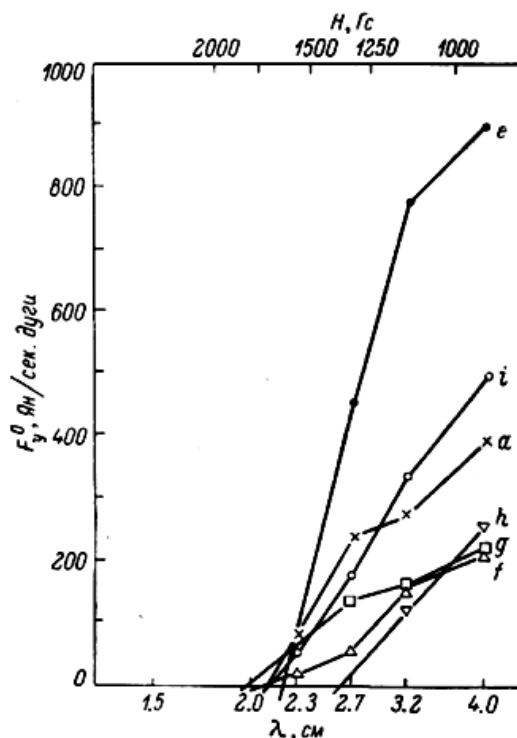
В колонке 10 табл. 2 указаны объекты, с которыми удалось наиболее вероятным образом отождествить детали ЛИ. Отождествление проводилось на основе сопоставления положения максимума радиоизлучения, нанесенного на оптическую картину АО (рис. 4) с соответствующими оптическими деталями. Положение же максимумов яркости на двумерном оптическом изображении определялось как точка пересечения трех прямых, на которых оказался максимум одномерного скана в каждом из трех азимутов наблюдения. Для всех узких деталей ЛИ разброс точек пересечения не выходит за пределы случайных ошибок, что говорит о том, что за промежуток времени между наблюдениями в крайних азимутах (около 1.5 ч) положение источников не менялось. Точность привязки

оптического и радиоизображений составляет при этом около $5''$ в направлении E—W и $10\text{--}15''$ в направлении N—S.

Как видно из рис. 4, 5 и табл. 2, из девяти источников ядерного типа семь (a, c, e, f, g, h, i) отождествляются с пятнами, а два (b и d) — с участками волокна, разделяющего области разных полярностей продольной компоненты магнитного поля на уровне фотосферы. Гало I и гало II по своим размерам и положению могут быть связаны с комплексами, образованными соответственно пятнами A, B, C, D, E и F, G, H, I, J, а источник на волнах 13 и 21 см — со всей активной областью. Таким образом, в отличие от результатов Вебба и др. [14] в диапазоне 6 см из наблюдений на РАТАН-600 на волнах 2—4 см следует, что все крупные тени пятен имеют связанные с ними радиоисточники.

Кроме отождествления в колонке 10 табл. 2 для каждой детали приводятся еще некоторые другие параметры. Так, для шести ядер (a, c, f, g, h, i), которые отождествляются с пятнами и у которых степень поляризации излучения близка к 100 %, указано значение магнитного поля на уровне фотосферы $H_{\text{фот}}$ [8] и на уровне основания короны над пятном $H_{\text{рад}}$ с указанием знака магнитного поля (N или S). Величина $H_{\text{рад}}$ определялась по методу, предложенному Ахмедовым и др. [15] и основанному на оценке наиболее короткой волны λ_c , на которой еще можно выделить поляризованное по кругу магнито-тормозное излучение соответствующей детали ЛИ.

Рис. 7. Спектры потоков поляризованного излучения для отдельных деталей ЛИ AR3804.



Значение λ_c получалось графической экстраполяцией на нулевой уровень измеренных одномерных интенсивностей $(F_y^0)^V$. Эта процедура показана на рис. 7. Далее, связывая λ_c с третьей гармоникой гирочастоты, имеем:

$$H_{\text{рад}} = 3570/\lambda_c, \text{ Гс.} \quad (9)$$

Радиоастрономические значения магнитного поля для этих деталей ЛИ в среднем составляют около 75 % от значения поля на уровне фотосферы, что хорошо согласуется с соответствующим выводом, приведенным в работе Ахмедова и др. [15]. Однако какой-либо корреляции между $H_{\text{фот}}$ и $H_{\text{рад}}$ по этим шести измерениям обнаружить не удастся, в то время как в работе Ахмедова и др. [15], основанной на гораздо большей выборке, получено, что коэффициент корреляции между $H_{\text{фот}}$ и $H_{\text{рад}}$ достигает $r=0.8$. Отметим здесь еще, что для пятенных источников c, g и h имеется несоответствие между знаками поляризации и магнитного поля на уровне фотосферы, причем у ядра c весьма низкая степень поляризации $p=10\text{--}20\%$. Это можно связать с явлением инверсии знака поляризации при распространении радиоизлучения через области с поперечными магнитными полями. Обсуждение данного явления будет сделано позже.

Для ядер b, d и гало I и II в табл. 2 оценки магнитного поля основаны на предположении, что на самых коротких волнах их радиоизлучение обязано в основном тепловому тормозному механизму генерации излучения. В этом случае по измеренной степени поляризации и наклону спектра яркостных температур n [16] величина магнитного поля определяется как

$$H(\lambda) = 10714p/n, \text{ Гс.} \quad (10)$$

При вычислениях всюду принималось, что $n=2$, что соответствует оптически тонкому источнику.

В рамках предположения о тепловом тормозном излучении на самых коротких волнах λ в табл. 2 для ядер b , d , гало I и II , а также пятенных источников a , e , f сделаны оценки меры эмиссии $EM(\lambda)$ вдоль луча зрения:

$$EM(\lambda) = \frac{7.57 \cdot 10^{22}}{\ln(T_e^{3/2}/\lambda) - 6.60} \cdot \frac{T_e^0 \sqrt{T_e}}{\lambda^2}, \text{ см}^{-5}; \quad (11)$$

при этом использованы оценки T_e^0 на самой короткой волне $\lambda=2.0$ см, а в качестве T_e взяты оценки T_e^0 на самых длинных волнах.

Далее, считая, что вдоль луча зрения распределение квадрата электронной плотности $[N_e(z)]^2$ описывается гауссианой с шириной B_0 , сделаны оценки максимальных значений N_e^0 для таких распределений:

$$N_e^0 = 1.14 \cdot 10^{-4} \sqrt{EM/B_0}, \text{ см}^{-3}. \quad (12)$$

И наконец, для тех деталей ЛИ, для которых предположение о тепловых механизмах генерации излучения не может считаться справедливым на некоторой волне λ (ядро d , гало I и II , дм-гало), сделаны оценки излучательной способности $\epsilon_0(\lambda)$ также в предположении о гауссовской форме распределения этой величины вдоль луча зрения:

$$\epsilon_0(\lambda) = 3.56 \cdot 10^{-24} T_e^0 / (B_0 \lambda^2), \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Гц} \cdot \text{ср}). \quad (13)$$

Определения меры эмиссии и следующей отсюда электронной плотности, а также излучательной способности по формулам (11)–(13) основаны на измерениях яркостных температур. При вычислениях по этим формулам использовались значения T_e^0 из колонки 9 табл. 2, т. е. приращения яркостных температур над соответствующим фоном. Эти вычисления вполне справедливы для модели оптически прозрачного источника, расположенного над областью генерации фоновое излучения. В нашем случае это соответствует более или менее изолированным корональным структурам, существование которых должно мало сказываться на ниже расположенных слоях атмосферы Солнца. Такую модель можно принять, по-видимому, для источников нетеплового излучения, т. е. для тех деталей, для которых выше выполнены оценки излучательной способности ϵ_0 по (13).

Для источников теплового тормозного излучения, для которых выше сделаны оценки меры эмиссии EM , необходимо учесть следующие обстоятельства. Мера эмиссии может быть определена из радионаблюдений только для оптически прозрачных объектов. Выбор для вычислений самой короткой волны 2 см гарантирует прозрачность наиболее высоко расположенных на луче зрения корональных слоев. Однако в формуле (11) при этом следует использовать значение яркостной температуры именно этих корональных областей источника. Это значение является некоторой долей от полной яркостной температуры, причем эта доля может совсем не совпадать со значением приращения яркостной температуры над фоном T_e^0 , получающимся как следствие примененной методики обработки наблюдений. Таким образом, приведенные в табл. 2 значения меры эмиссии можно вполне использовать для интерпретации излучения только в модели с высоко расположенным изолированным корональным источником, например для вершины петлеобразной конденсации.

Для модели источника с гидростатическим равновесием эти оценки могут оказаться неприменимыми. В этом случае, предполагая еще постоянство теплового потока в переходной области между короной и хромосферой, полную наблюдаемую яркостную температуру T_λ можно представить как [18, 17]:

$$T_\lambda = T_c(\tau_{ef} + \tau_c), \quad (14)$$

где T_c — температура изотермической корональной части источника; τ_c — ее оптическая толщина; τ_{ef} — эффективная оптическая толщина переходной области.

Как показывают прямые вычисления [2] для различных моделей переходной области на волнах 2 см, отношение упомянутых толщин $\tau_{et}/\tau_c = 5 \div 30$, т. е. лишь менее одной десятой части от наблюдаемой яркостной температуры на этих волнах возникает в короне. Иначе говоря, практически полностью в рассматриваемой модели излучение генерируется в переходной области, причем в слоях, где $T_e \approx T_p$. Согласно данным табл. 2 отношение полной яркости T_p к ее приращению T_p^0 лежит в пределах от 5 (для флоккулов) до 1.5—2.0 (для других деталей). Это означает, что в рамках модели с гидростатическим равновесием оценки меры эмиссии корональной конденсации, данные в табл. 2; вероятно, оказываются сильно завышенными. Это же замечание относится и к оценкам электронной плотности N_e . Что касается расхождения между предположениями о гауссовой форме распределения $[N_e(z)]^2$ и гидростатическим равновесием, то, учитывая неопределенности в знании размеров источника вдоль луча зрения, можно пока рассматривать это расхождение как не очень существенное.

Заканчивая описание данных табл. 2, сделаем некоторые замечания о приведенных в ней результатах измерений на волнах 13 и 21 см. Собственно таковыми являются измерения, относящиеся к секциям таблицы: спокойное Солнце, флоккулярное повышение радиояркости и специально выделенная секция — дм-гало. Кроме упомянутых деталей — флоккулярного повышения яркости и протяженного дм-гало — никаких более узких деталей по наблюдениям на РАТАН-600 на этих волнах не выделяется. Следует заметить, что размер дм-гало в 2 раза превышает размер диаграммы на волне 13 см. Максимум яркости этого гало приходится на минимум яркости между гало I и II на сантиметровых волнах (рис. 5). На восточном и западном краях этого гало наблюдаются максимальные значения поляризованного потока, причем разного знака, что резко отличает поляризованные кривые на волнах 13 и 21 см от записей поляризации на сантиметровых волнах. Точки максимальных значений поляризованного потока приблизительно совпадают с положениями максимумов яркости сантиметровых гало I и гало II, поэтому значения степени поляризации для этих точек в табл. 2 помещены в соответствующих секциях. Так, в области гало I степень поляризации дм-гало составляет 3—5 % левого знака, а в области гало II — 9—26 % правого знака. В области максимальной яркости дм-гало степень поляризации составляет 1—1.5 % правого знака. В целом, как видно из рис. 5, д-ж, правый знак преобладает и на дециметровых волнах.

Как знакопеременность поляризационных кривых, так и учет сильной вытянутости по долготе активной области говорят о том, что двумерные распределения радиояркости на волнах 13 и 21 см не могут обладать круговой симметрией, а скорее всего сильно вытянуты по долготе. Если положить, что в направлении N—S источник в 2 раза уже, чем в направлении E—W, то во столько же раз надо увеличить приведенные в табл. 2 значения яркостной температуры T_p^0 , при этом на волне 13 см $T_p^0 \approx 5 \cdot 10^6$ К, а на волне 21 см $T_p^0 \approx 3 \cdot 10^6$ К.

В табл. 2 и на рис. 6 предприняты некоторые попытки представить характеристики изучения гало во всем диапазоне от 2 до 21 см. Так, в колонке 3 табл. 2 для трех различных точек профиля гало (максимумы яркости гало I и II и максимум яркости дм-гало) приведены спектры наблюдаемых одномерных интенсивностей $F_y(x, \lambda)$. Учитывая, что во всех случаях размеры гало значительно превышают размеры диаграммы на соответствующих волнах, можно считать, что антенное сглаживание не очень сильно исказило истинные зависимости $I_y(x, \lambda)$. Как видно, во всех случаях имеет место рост одномерного потока с увеличением длины волны с максимумом на волне 13 см. Однако скорости роста потока с длиной волны в указанных точках профиля ЛП весьма разнообразны. Максимальный наклон спектра имеет место в области максимума яркости дм-гало, здесь при изменении волны от 4 см до 13 см поток возрастает более чем в 9 раз, что соответствует спектральному индексу $\alpha=3$. В области максимумов яркости гало I и гало II $\alpha=1$. Наклоны спектров яркостных температур в этих точках должны быть соответственно $n=5 \div 6$ и $3 \div 4$, неопределенности здесь возникают в связи с различными возможностями перехода от наблюдаемых одномерных распределений к реальным двумерным распределениям.

Спектры с ростом потока при увеличении длины волны могут давать, например, нетепловые электроны, тормозящиеся в магнитных полях, со степенными

распределениями по энергиям. Изменение α вдоль профиля источника говорит о существенной неоднородности таких степенных распределений по энергиям электронов в разных областях источника радиоизлучения.

На основании измерений на волнах 2—4 см для всех узких деталей ЛИ AR3804 сделана попытка оценить их роль в излучении на волнах 13 и 21 см. При этом, как показано на рис. 6, б штриховыми линиями, предполагалось, что яркостная температура для этих деталей на дециметровых волнах достигает некоторого предельного значения, не более чем в 2 раза превышающего измерен-

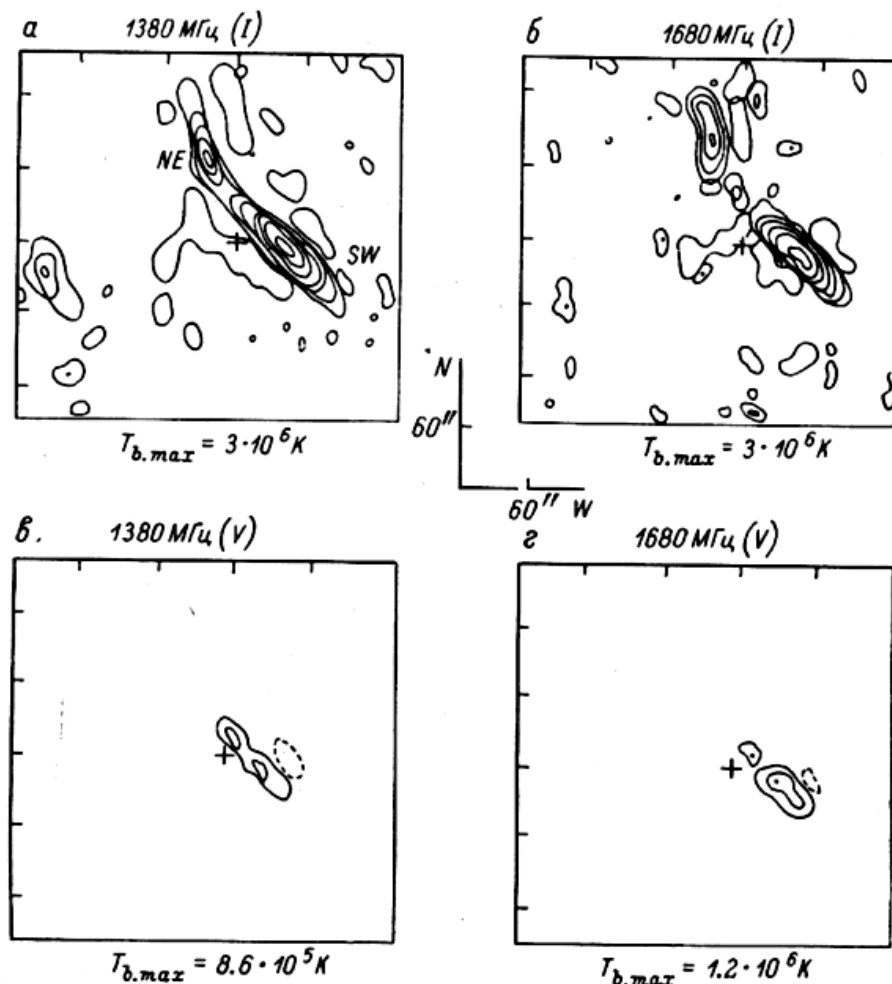


Рис. 8. Синтезированные на VLA радиокарты участка активной области AR3804. Координаты креста на 13^h UT: N13E35. Контуры на картах интенсивности (I) соответствуют уровням 0.2, 0.3, ..., 0.9 от $T_{b, \max}$.

ные значения на волне 4.0 см. Для пятенных источников магнито-тормозного излучения предполагалось, что их площадь на длинных волнах ($\lambda > 4.0$ см) растет пропорционально длине волны, что требуется с точки зрения сохранения магнитного потока. Для источников γ и d приняты те же размеры, что и на волнах 2—4 см. Экстраполированные указанным образом величины на волнах 13 и 21 см в табл. 2 заключены в скобки, а на рис. 6 показаны штриховой линией. Оказалось, что суммарный вклад в поток всех девяти ядерных источников может составить менее 25 % от наблюдаемого потока на волне 13 см и около 50 % от наблюдаемого на волне 21 см. Как отмечалось выше (рис. 6), реально наблюдаемый на волне 21 см вклад тонкоструктурных элементов в полный поток ЛИ составляет около 5 %, что в 10 раз меньше приведенной оценки.

4. Тонкая структура локальных источников в дециметровом диапазоне волн по наблюдениям на VLA

Тонкая структура радиоизображений ЛИ с разрешением около $3'' \times 4''$ исследовалась с помощью VLA на нескольких волнах в диапазоне 17.6—21.7 см. Изображения активной области AR 3804 были получены 12, 13 и 19 июля 1982 г. как в общей интенсивности, так и круговой поляризации (параметры Стокса I и V). Ниже обсуждаются чистые радиокарты источника за указанные даты.

12 и 13 июля наблюдения были выполнены на частотах 1380 МГц (21.7 см) и 1680 МГц (17.9 см). На радиокартах за 12 июля (рис. 8) выделяются две детали,

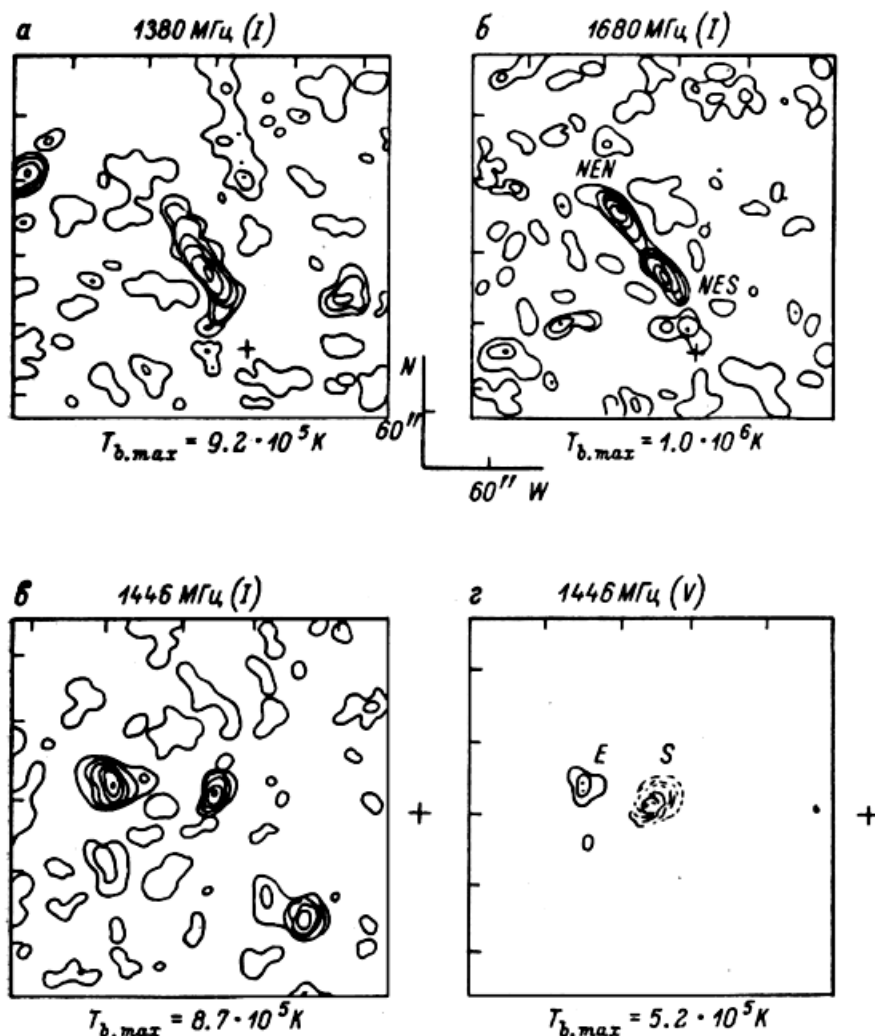


Рис. 9. Синтезированные на VLA радиокарты участков активных областей AR3804 и AR3826. Координаты крестов на 13^h UT: N13 E21 на 13.07.82 (AR 3804) и S15E4.5 на 27.07.82 (AR 3826).

сливающиеся на частоте 1380 МГц в полосу, вытянутую в направлении NE—SW. Максимальная яркостная температура около $3 \cdot 10^6$ K, одинаковая на обеих частотах, достигалась в этот день у юго-западной детали. У северо-восточной детали максимальная яркостная температура составляла на частоте 1680 МГц $1.7 \cdot 10^6$ K и на частоте 1380 МГц — $2.0 \cdot 10^6$ K. Однако 13 июля (рис. 9, а, б) более яркая юго-западная деталь вообще перестала быть видна, а яркость северо-восточной детали уменьшилась в 1.5—2 раза (до $\sim 10^6$ K). На измеримом уровне $p=30 \div 50$ % поляризация была зарегистрирована только 12 июля у юго-западной детали (рис. 8, в, г) — двух знаков в виде узких деталей, вытянутых по краям области, наиболее яркой в канале интенсивности, там, где ее яркость составляет около 0.2 от максимальной.

ТАБЛИЦА 3

Дата, июль 1982 г.	Деталь ЛИ	λ , см	T_b , 10^3 К	$B_{ax} \times B_{ay}$, сек. дуги	F , с. е. п.	$p = T_b^V / T_b^I$, %
12	NE	17.9	1700	62×17	0.413	—
		21.7	2000	47×25	0.365	—
12	SW	17.9	3100	60×16	0.789	+480/930=+52
						-240/930=-26
		21.7	3100	64×20	0.617	+260/620=+42
						-170/620=-27
13	NEN	17.9	700	47×13	0.096	—
		21.7	640	39×18	0.070	—
13	NES	17.9	1000	28×16	0.103	—
		21.7	920	47×21	0.141	—
19	N	17.6	160	50×30	0.057	—
		19.5	370	68×29	0.142	—
		21.7	380	60×35	0.124	—
19	S	17.6	100	57×32	0.043	—
		19.5	370	58×21	0.087	—
		21.7	770	55×31	0.204	—
27	E	20.7	700	35×31	0.130	+210/260=+81
27	C	20.7	870	20×22	0.065	-520/870=-60
27	SW	20.7	440	37×29	0.081	—
28	E	17.6	900	17×21	0.076	—
		19.5	300	13×15	0.011	—
28	W1	17.6	900	33×28	0.197	+240/900=+27
		19.5	1300	26×18	0.118	+150/650=+23
28	W2	17.6	500	16×20	0.038	-240/500=-48
		19.5	400	15×18	0.032	-500/400=-125

Согласно данным наблюдений на ПАТАН-600, которые подробно описываются в следующем разделе, на волне 21 см в эти дни наблюдался широкий бесструктурный источник, связанный с AR3804, яркостная температура которого достигла $3 \cdot 10^6$ К. Такие образования на VLA не регистрируются, но при интерпретации наблюдений на нем тонкоструктурных деталей необходимо учитывать существование этих широких областей высокой яркости, являющихся фоном для деталей малых угловых размеров. С учетом этого следует пересмотреть данные о яркостных температурах, приведенные выше. Так, для 12 июля максимальные значения яркостных температур достигали значения, по-видимому, $6 \cdot 10^6$ К. В то же время значение степени поляризации должно быть уменьшено с величины $p=30-50$ % до величин, например на частоте 1380 МГц, $p=260 \cdot 10^3 / 3620 \cdot 10^3 = 7.2$ % и $p=-170 \cdot 10^3 / 3620 \cdot 10^3 = -4.7$ % (ср. с табл. 3).

На упомянутом фоне высокой яркости вполне можно было бы предположить существование деталей малых угловых размеров не только повышенной яркости, но и существенно пониженной, скажем, до величины $T_b = -2 \cdot 10^6$ К относительно фона. Такие детали, однако, не видны ни на картах, полученных на VLA за 12 и 13 июля, ни в последующие дни. Ранее, насколько нам известно, такие образования также не регистрировались. Таким образом, можно сделать вывод, что упомянутая возможность понижения радиояркости, по-видимому, не реализуется.

При дальнейшем описании наблюдений на VLA мы будем приводить непосредственно измеренные значения яркостных температур (табл. 3), помня, однако, что на самом деле эти величины являются приращениями над фоном, данные о котором приведены в следующем разделе на основе наблюдений на ПАТАН-600.

В табл. 3 приведены параметры некоторых деталей радиоисточников по наблюдениям на VLA, полученные по измерениям радиокарт, приведенных на рис. 8—11. Для каждой детали указана дата наблюдения, ее обозначение (в основу этих обозначений взято расположение деталей на соответствующих картах по странам света), длина волны, максимальное значение яркостной температуры T_b^0 , размеры по двум ортогональным направлениям B_{0x} и B_{0y} , измеренные

на уровне половины от $T_{\text{в}}^0$. Потоки F вычислены в приближении гауссовой формы двумерных распределений радиояркости:

$$F = 7.35 \cdot 10^{-8} T_{\text{в}}^0 B_{0x} B_{0y} / \lambda^2, \text{ с. е. п.} \quad (15)$$

Степени поляризации в табл. 3 указаны для точек максимальных значений яркостной температуры на картах поляризации $T_{\text{в}}^V = (T_{\text{в}}^R - T_{\text{в}}^L)/2$. Поскольку,

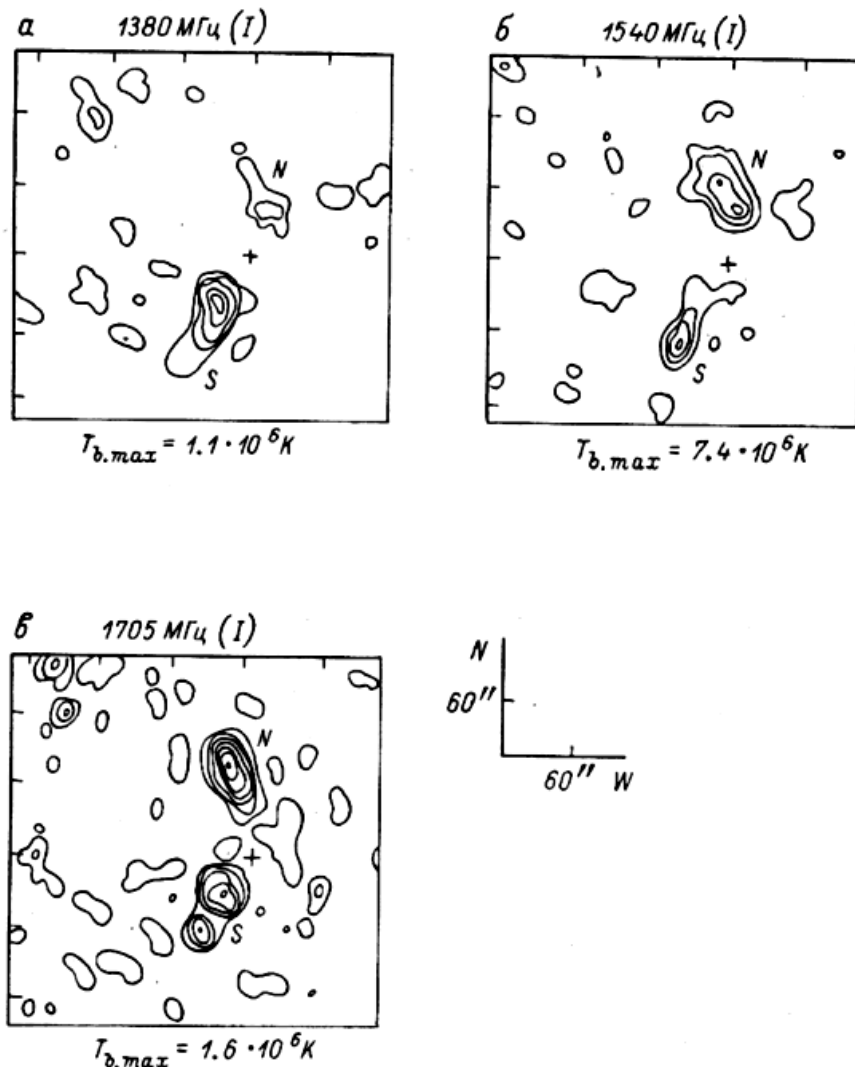


Рис. 10. Синтезированные на VLA радиокарты участка активной области AR3804. Координаты креста на 13^h UT: N09W64. Контуры на картах интенсивности (I) соответствуют уровням 0.2, 0.3, ..., 0.9 от $T_{\text{в}, \text{max}}$.

как правило, эти точки не совпадают с местами максимальных значений яркостной температуры на картах интенсивности $T_{\text{в}}^I = (T_{\text{в}}^R + T_{\text{в}}^L)/2$, то в табл. 3 указаны и сами эти значения $T_{\text{в}}^V$ и $T_{\text{в}}^I$ (в единицах 10^3 K):

$$p = [(T_{\text{в}}^R - T_{\text{в}}^L)/2] / [(T_{\text{в}}^R + T_{\text{в}}^L)/2]. \quad (16)$$

На рис. 10 показаны радиоизображения двух деталей радиоисточника AR3804, полученные на VLA 19 июля 1982 г. на трех частотах: 1380 МГц (21.7 см), 1540 МГц (19.5 см) и 1705 МГц (17.6 см). Особенностью этих деталей, отличающей их от зарегистрированных 12 и 13 июля, являются сильные и разнообразные изменения их яркостных температур. Так, для южной S-детали яркость возра-

стает от 10^5 К на частоте 1705 МГц до $7.7 \cdot 10^5$ К на частоте 1380 МГц, что соответствует наклону спектра:

$$n = \ln(7.7 \cdot 10^5 / 10^5) / \ln(21.7 / 17.6) = 9.7.$$

Контуры деталей также заметно меняются с длиной волны в указанном спектральном диапазоне. Интерпретация таких спектральных изменений как возможного проявления тепловых циклотронных линий для этих деталей была предложена ранее Вильсоном [19]. Формальный учет фонового излучения с яркост-

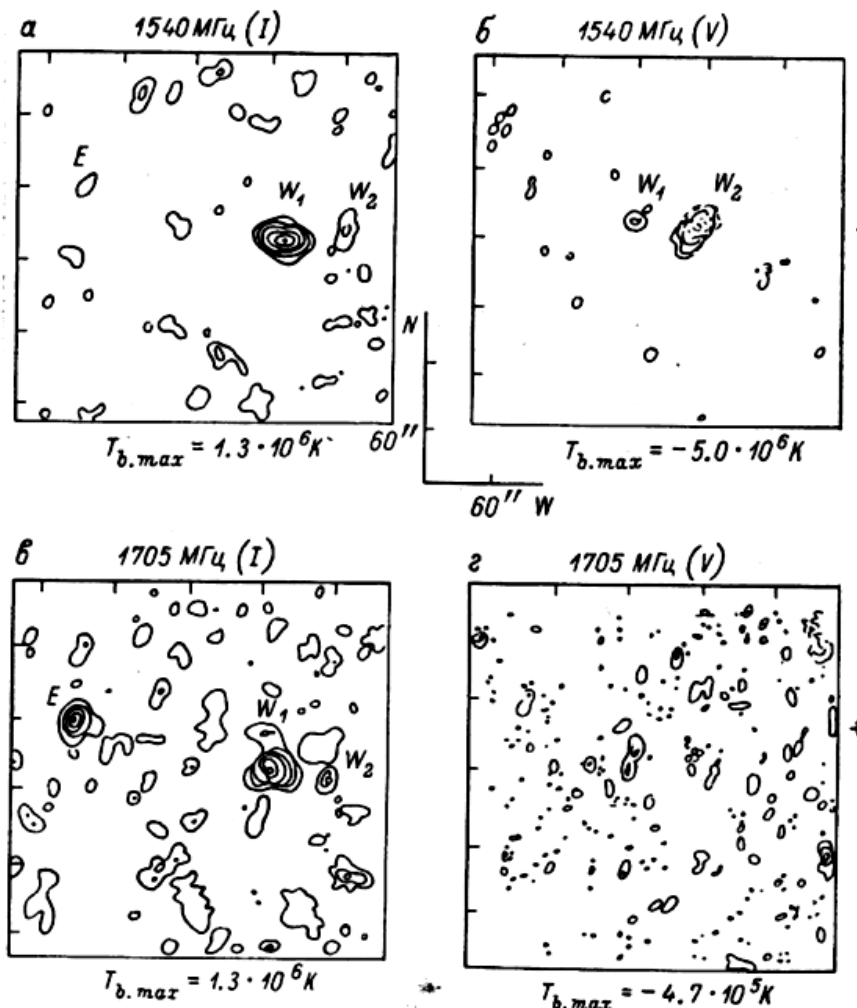


Рис. 11. Синтезированные на VLA радиокарты участка активной области AR3826. Координаты креста на 13^h UT: S15W8.5. Контуры на картах интенсивности (I) соответствуют уровням 0.2, 0.3, ..., 0.9 от $T_{b, \max}$.

ной температурой $T_b \approx 2 \cdot 10^6$ К (см. следующий раздел) изменяет приведенную выше оценку наклона спектра яркостных температур до величины $n=1.3$, что вполне может быть объяснено и в рамках теплового тормозного излучения. Следует здесь однако учесть, что интерпретация этих наблюдений значительно усложняется в зависимости от предположения, где находится область генерации фонового излучения (выше его, внутри или под ним). Это последнее замечание относится и ко всем другим радиоисточникам, наблюдаемым на VLA. Как и в случае 12–13 июля, источники, зарегистрированные на VLA 19 июля, составляли лишь около 1 % от полного потока активной области в диапазоне 20 см согласно данным РАТАН-600.

На рис. 12 показаны в одном масштабе радиоизображения источников по наблюдениям на VLA на частоте 1380 МГц, наложенные на изображения группы пятен № 228+229, полученные на основе фотогелиограмм ГАС (Кисловодск)

за 12 и 19 июля 1982 г. Жирной линией на этом рисунке показано также волокно, согласно H_{α} -филт로그램ам, полученным в обсерватории Сакраменто Пик (любезно предоставленным Р. Найдигом). Совмещение изображений для 12 июля показывает, что NE-деталь, по-видимому, может быть связана с обрывком волокна, которое видно в северо-восточной части группы и которое разделяет

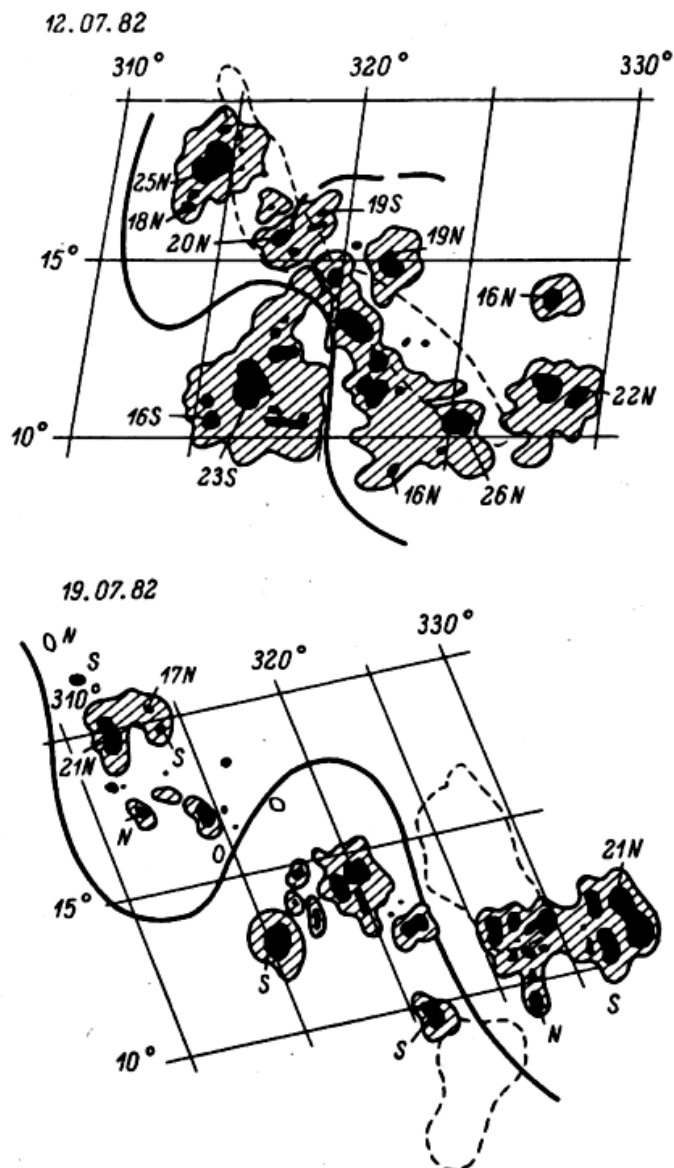


Рис. 12. Схематическое изображение групп пятен № 228+229 (AR3804) согласно фотогелиограммам ГАС (Кисловодск) на 12 и 19 июля 1982 г.

Штриховой линией показаны положения радиоисточников (по уровню $0.2 T_{\nu, \max}$) согласно наблюдениям на VLA на частоте 1380 МГц. Сплошной жирной линией показано волокно согласно H_{α} -филт로그램ам, полученной на обсерватории Сакраменто Пик. Залиты — тени, заштрихованы — полутени.

тени пятен разной магнитной полярности, находящиеся в общей полутени. Примерно взаимно ортогональное расположение волокна и радиоисточника позволяет предположить, что последний представляет собой свечение материи корональной петли магнитного поля. В таком случае расстояние между основаниями этой петли (длина детали NE) составляет около 45 тыс. км, а ее толщина (ширина детали NE) около 15 тыс. км. Максимум яркости детали NE смещен относительно волокна к лимбу, что согласуется с эффектом перспективы для вершины предполагаемой корональной петли. Некоторое ослабление яркости детали NE, главным образом в ее центральной части, происшедшее между 12 и

13 июля (ср. рис. 8, а, б и рис. 9, а, б) и приведшее к ее раздвоению (детали *NEN* и *NES* на картах за 13 июля), можно связать с исчезновением источника, который существовал в вершине петли 12 июля, так что 13 июля остались только области радиоизлучения, прилегающие к основаниям петли. Некоторым противоречием предлагаемому отождествлению детали *NE* с корональной петлей является отсутствие заметного поляризованного излучения разных знаков, которое можно было бы ожидать в области ее оснований.

Наоборот, у детали *SW* 12 июля было зарегистрировано поляризованное излучение обоих знаков (рис. 8, в, г). Характерная вытянутая форма областей поляризованного излучения и их расположение по краям источника позволяют

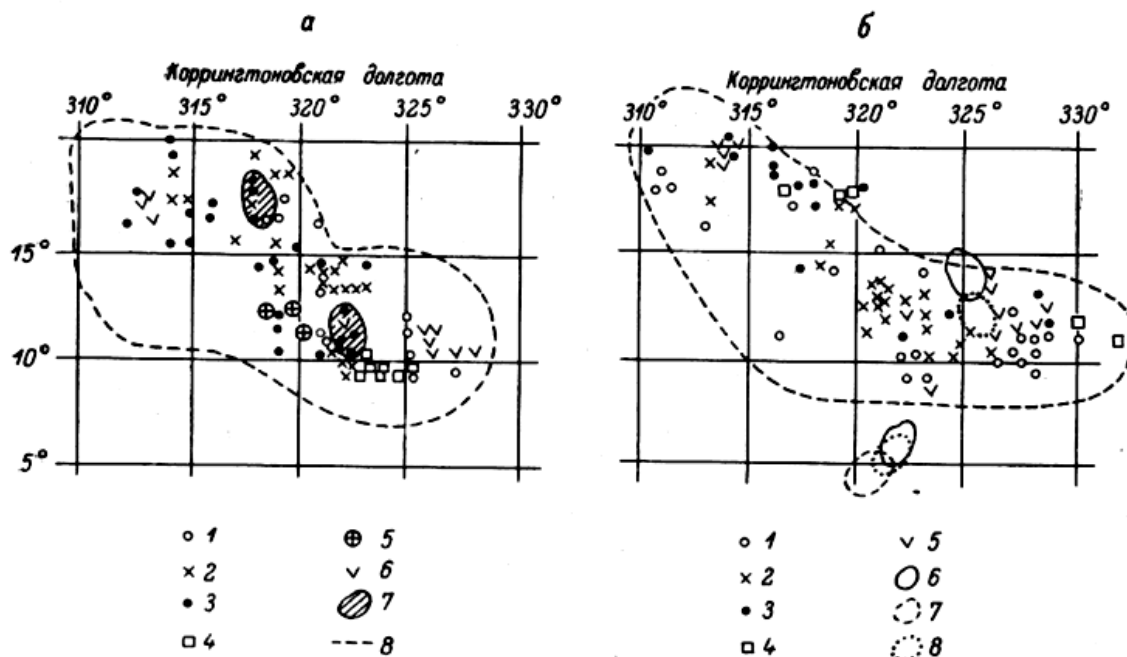


Рис. 13. Сопоставление положения радиоисточников, зафиксированных на радиокартах VLA, и центров хромосферных вспышек в линии H_{α} по наблюдениям в период с 12 по 19 июля 1982 г. [10].

а — наблюдения 12—14 июля 1982 г. (1 — 10.07; 2 — 11.07; 3 — 12.07; 4 — 13.07; 5 — вспышки баллонов 2В и 3В; 6 — 14.07; 7 — локальные источники 0.5 $T_{\text{в}}$ макс согласно VLA-картам за 12 и 13.07.82; 8 — контуры групп пятен № 228+229 согласно бюллетеню «Солнечные данные»); б — наблюдения 15—19 июля (1 — 15.07; 2 — 16.07; 3 — 17.07; 4 — 18.07; 5 — 19.07; 6—8 — локальные источники по 0.5 $T_{\text{в}}$ макс согласно VLA-картам за 19.07.82; 6 — 1705 МГц, 7 — 1540 МГц, 8 — 1380 МГц).

предполагать, что в данном случае мы имеем дело с системой арок (аркадой). Характерный размер отдельной арки (петли магнитного поля) здесь 10—15 тыс. км, что в 3—4 раза меньше петли в случае детали *NE*. Длина аркады (т. е. длина детали *SW*) — около 50 тыс км. При такой интерпретации радиоизлучения детали *SW* следует ожидать, что она должна быть расположена вдоль линии раздела полярностей магнитного поля и по положению совпадать с ней. Как видно из рис. 12, деталь *SW* действительно вытянута примерно параллельно волокну, но со значительным смещением к западу. Это смещение превышает размер детали *SW* в ее узком сечении, что сильно усложняет ее отождествление с предполагаемой аркадой петель магнитного поля.

На рис. 13 показаны результаты сопоставления положения радиоисточников, зарегистрированных на VLA и центров хромосферных вспышек в линии H_{α} , наблюдавшихся в AR3804 в период с 10 по 19 июля 1982 г. Координаты вспышек взяты из [10]. Видно, что все вспышки занимают вытянутую область, окружающую радиоисточники, которые наблюдались на LVA 12 и 13 июля, причем район вспышечной активности несколько смещен к западу по отношению к области, занятой пятнами. Эта особенность положения деталей радиоисточника, вероятно, свидетельствует о его связи с процессами, приводящими к генерации солнечных вспышек.

Другой характер имеют две детали, наблюдавшиеся на VLA 19 июля. Об их спектральных особенностях уже упоминалось выше. Как видно из рис. 12 и 13, эти детали расположены с двух сторон от группы пятен, так же как и от области проявления вспышечной активности. Таким образом, ни одна из этих деталей в этом случае не проявляет явной связи с вспышечной активностью группы. Поскольку эти источники расположены по разные стороны от нейтральной линии, то их можно рассматривать как возможные основания высоких корональных арок. Расстояние между этими основаниями составляет около 80 тыс. км. В пользу этого предположения можно привести наблюдения, выполненные Ким-Гун-Дер (Кисловодск, ГАС) в зеленой корональной линии в период восхода активной области AR 3804. 8 июля (рис. 14) над лимбом над AR 3804 были зарегистрированы корональные арочные структуры, достигавшие высот около 70 тыс. км.

Попытка сопоставить наблюдения AR3804 на VLA и на РАТАН-600 показана на рис. 3, на котором приведены результаты наблюдений за 15 июля 1982 г. на сантиметровых волнах на РАТАН-600, а также оптические и магнитные данные на ту же дату. На этом же рисунке на оптической картине группы пятен штриховой линией нанесены контуры четырех основных источников по наблюдениям на VLA на частоте 1380 МГц за 12 июля (детали NE и SW) и за 19 июля (детали N и S). Перенос изображений этих источников на момент наблюдений

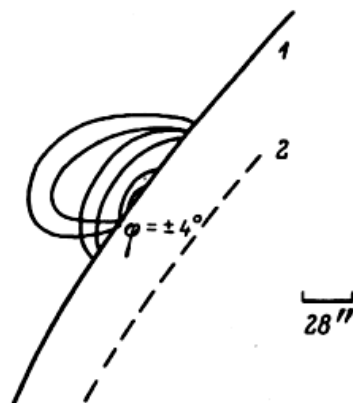


Рис. 14. Схематическое изображение корональных арочных структур согласно снимку Солнца, полученному 8 июля 1982 г. на внезатменном коронографе в ГАС ГАО АН СССР в 8^h UT в линии 5303 Å.

1 — край искусственной Луны; 2 — Е-край Солнца.

на РАТАН-600 15 июля выполнен с учетом вращения Солнца и собственных движений пятен [9] (ср. также рис. 12 за 12 и 19 июля). Основной вывод, который можно сделать из рис. 3 и 4, на которых показаны положения ядер сантиметрового излучения, заключается в том, что ни один из четырех зарегистрированных на VLA источников не совпадает по положению ни с одним из девяти ядер сантиметрового излучения. Это резко противоречит нашим ожиданиям, описанным в конце предыдущего раздела. Очевидно, природа зарегистрированных на VLA в диапазоне 20 см источников в корне отличается от природы источников, наблюдаемых на РАТАН-600 в диапазоне 2—4 см. В то же время следует заметить, что три из четырех наблюдаемых на VLA ядер по положению концентрируются там, где наблюдается минимум на сантиметровых сканах РАТАН-600 (рис. 3), но максимум на сканах 13 и 21 см (рис. 5). Это говорит о том, что несмотря на различие на 2 порядка потоков, результаты наблюдений в дециметровом диапазоне на VLA и РАТАН-600 должны быть внутренне связанными.

Как видно из рис. 3, контур SW-детали, которая наблюдалась на VLA 12 июля 1982 г., частично перекрывается с контуром детали, которая наблюдалась на VLA 19 июля 1982 г. В эти дни активная область AR3804 находилась соответственно к востоку и к западу от центрального меридиана, в то время как 15 июля, как это показано на рис. 2, она находилась в центре диска Солнца. Можно предположить, что эти детали были связаны с одной и той же областью генерации радиоизлучения, несмотря на то, что характеристики их радиоизлучения существенно различны. Как говорилось выше, при совмещении их изображений на оптической карте за 15 июля (рис. 3) были учтены эффекты вращения Солнца и эволюционные эффекты, связанные с собственными движениями пятен. Однако все необходимые вычисления проводились для случая расположения указанных деталей на уровне фотосферы. Тогда неполное перекрытие при их совмещении на рис. 3 может быть прямо связано с эффектами проекции из-за ненулевой высоты области генерации радиоизлучения. Расстояние между центрами этих деталей, равное около 35'', дает оценку этой высоты: около 25 тыс. км. Следует за-

метить, что предположение о единой области генерации радиоизлучения для деталей *SW* и *N* является альтернативой сделанным выше предположениям, согласно которым эти детали связывались с физически совершенно различными объектами: аркадой весьма компактных петель для *SW*-детали и одним из оснований большой корональной арки для *N*-детали. Однако имеющиеся данные наблюдений не позволяют пока сделать выбор между указанными возможностями.

В противоположность описанным выше наблюдениям радиокарты областей повышенного излучения, полученные на VLA 27 и 28 июля 1982 г., связаны с очень слабо развитой активной областью AR3826 (рис. 9, в, г, рис. 11). 27 июля в этой области наблюдалась группа пор с площадью 35 мдп (№ 253 согласно бюллетеню «Солнечные данные», 1982). Эта группа образовалась на диске 26 июля, 28 июля она уже распалась и в дальнейшем не наблюдалась.

Радиоисточники, зарегистрированные на VLA в этом участке диска Солнца 27 и 28 июля, были довольно яркими. Так, 27 июля на картах (рис. 9, в, г), полученных на частоте 1146 МГц (20.7 см), можно выделить три детали с яркостными температурами, заключенными в пределах от $440 \cdot 10^3$ до $870 \cdot 10^3$ К, две из них (*E* и *C*) с противоположными знаками поляризации. У центральной детали *C* степень поляризации составляет 60 % левого знака и примерно постоянна в пределах всего источника. У восточной детали *E* наблюдается избыток правополяризованного излучения на ее западном краю, где степень поляризации составляет 80 %. Однако в основной своей части излучение детали *E* неполяризовано.

На картах, полученных 28 июля на частотах 1540 МГц и 1705 МГц, также выделяются три детали. Яркость восточной детали *E* сильно меняется с длиной волны, аналогично тому, что наблюдалось 19 июля в AR3804, однако здесь мы имеем случай падения яркости с увеличением длины волны в противоположность наблюдениям 19 июля. Наклон спектра яркостных температур для этой детали составляет $n = \ln(300/900)/\ln(19.5/17.6) = -10.7$. Две другие детали — *W1* и *W2*, зарегистрированные 28 июля, по своим характеристикам подобны деталям *E* и *C*, наблюдаемым в предыдущий день. Их яркостные температуры заключены в пределах от $4 \cdot 10^5$ до $13 \cdot 10^5$ К. Их излучение поляризовано, причем, как и 27 июля, излучение более восточной детали *W1* имеет правую поляризацию, а более западной детали *W2* — левую. Приведенное в табл. 3 для детали *W2* значение степени поляризации $p = -125$ % не имеет физического смысла, но это определение, очевидно, может быть правильно скорректировано при учете протяженного фонового источника в соответствии с наблюдениями на РАТАН-600.

Детали радиоисточника *W1* и *W2* по наблюдениям за 28 июля, так же как и детали *E* и *C* по наблюдениям за 27 июля, естественно рассматривать как основания одной арки магнитного поля. В этом случае ее характерный размер (расстояние между основаниями) составляет около 40 тыс. км.

В целом по наблюдениям на VLA размеры и яркостные температуры деталей источника AR3826 не слишком отличаются от таковых, которые были получены для предельно большой и развитой области AR3804 (см. рис. 8—11). В то же время для AR3826 их вклад в полный поток радиоизлучения в диапазоне 20 см составляет около 20 %, что существенно больше, чем в случае AR3804. Исследование еще одной активной области AR3828, связанной со слабо развитой группой пятен № 256 [8], и сопоставление синтезированных на VLA радиокарт этой области с результатами наблюдения ее на РАТАН-600, так же как и интерпретация всех полученных результатов, будут приведены во второй части настоящей работы.

5. Излучение активных областей в дециметровом диапазоне волн по наблюдениям на РАТАН-600

Сканы Солнца на волнах 13, 21 и 30 см были получены на РАТАН-600 за период с 12 июля по 2 августа. Эволюцию радиоизлучения активной области AR3804 на волне 13 см можно проследить по рис. 15, где сплошной линией показаны кривые интенсивности, а штриховой — кривые поляризованной по кругу составляющей. Вертикальными отрезками справа от каждой записи показаны оценки уровня излучения спокойного Солнца для центра диска. Характер-

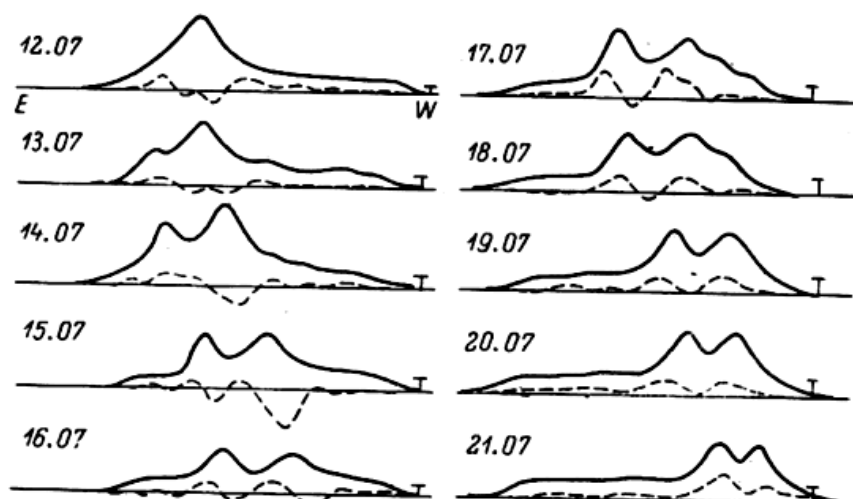


Рис. 15. Записи Солнца на волне 13 см, полученные на РАТАН-600 в июле 1982 г.

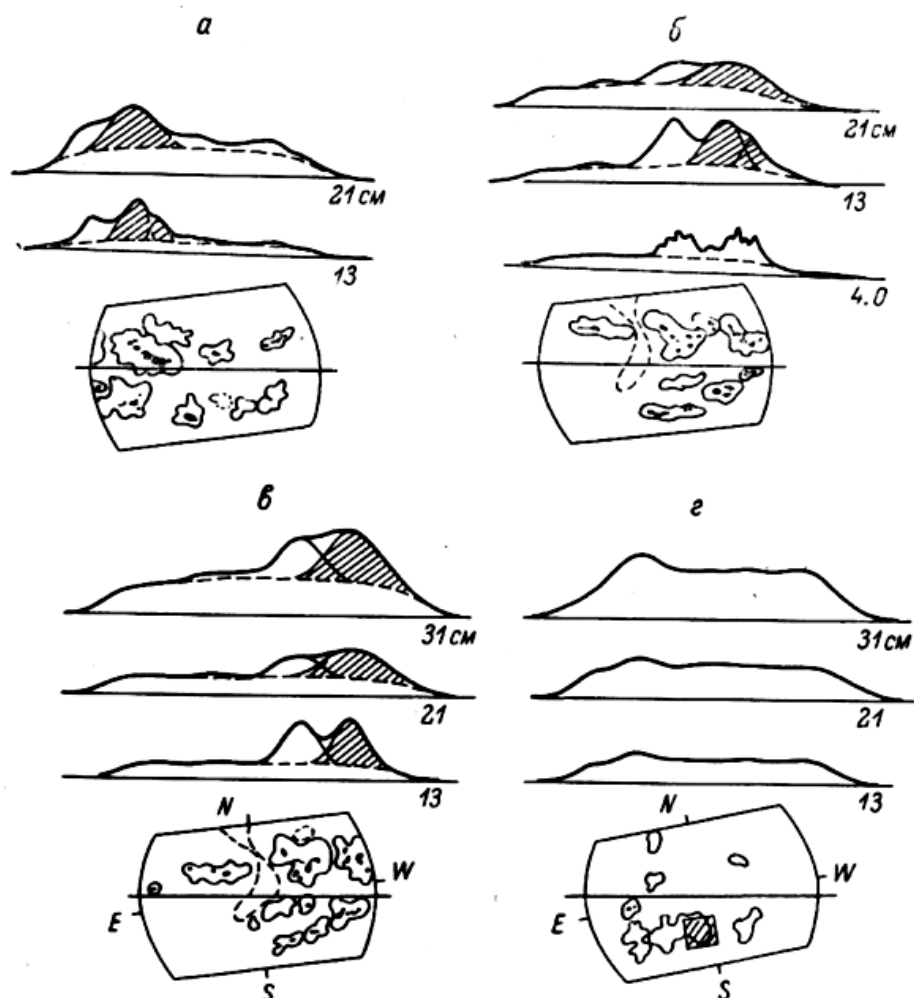


Рис. 16. Примеры записей Солнца, полученных на РАТАН-600 на волнах дециметрового диапазона в июле 1982 г.

а — 13.07.82, 10 : 09 UT; б — 19.07.82, 9 : 20 UT; в — 20.07.82, 9 : 20 UT; г — 28.07.82, 9 : 20 UT.

ной особенностью наиболее крупных локальных источников на этой волне, как это видно из рис. 15, является биполярная структура их поляризованного излучения, хотя в целом противоположные знаки поляризации не всегда сбалансированы.

На рис. 16, (а, б, в, г) приведены примеры записей Солнца на трех волнах дециметрового диапазона, полученные на РАТАН-600 для нескольких дней наблюдений, в том числе и для общих с VLA (13, 19, 20 и 28 июля).

ТАБЛИЦА 4

Дата, июль 1982 г.	Номер группы пятен	λ , см	F , с. е. п.	$B_{ox} \times B_{oy}$, мин. дуги	T_B° , 10^4 К
12	228 + 229 227	13	92	7.0×3.5	2.4
		21	45	9.0×4.5	1.9
13	228 + 229 227	13	55	3.6×3.6	2.7
		13	15	2.0×2.0	2.4
	228 + 229 + 227	21	25	8.0×4.0	1.8
15	228 + 229 227	13	56	3.8×3.8	2.5
		13	18	2.3×2.3	2.2
	228 + 229 + 227	21	30	8.4×4.2	1.4
19	228 + 229 227	13	57	3.7×3.7	2.7
		13	20	2.3×2.3	2.4
	228 + 229 + 227	21	35	8.4×4.2	1.7
20	228 + 229 + 227	13	53	4.8×2.4	2.9
		21	35	8.0×4.0	1.8
		30	20	9.0×4.5	1.7

В табл. 4 приведены параметры локальных источников, измеренные на основании этих сканов. В этой таблице в колонке 1 дана дата наблюдений, в колонке 2 — номера групп пятен согласно «Солнечным данным» (1982), локальные источники которых удалось выделить на сканах. Далее для каждой волны приводятся значения потоков F , размеры по двум направлениям $B_{ox} \times B_{oy}$ и максимальные значения яркостной температуры T_B° , вычисленные в приближении гауссовой формы распределения яркостной температуры согласно формуле (15). Из измерений определяется размер только в одном направлении B_{ox} , размер по второй координате B_{oy} предполагается либо равным B_{ox} , либо в 2 раза меньшим, чтобы учесть факт наложения сканов двух различных ЛИ, попадавших одновременно в диаграмму антенны.

Как видно из рис. 16, сканы Солнца на РАТАН-600 в диапазоне 13—31 см очень сглажены, что контрастирует с наблюдениями на этом радиотелескопе в сантиметровом диапазоне (например, см. рис. 16). Частично это связано с падением разрешения РАТАН-600 при увеличении длины волны, но, с другой стороны, с существенными изменениями в структуре самих источников. Практически на дециметровых волнах каждая активная область — группа пятен имеет свой ЛИ очень простой структуры с одним максимумом яркости и с размером, равным или превышающим общие размеры активной области. Никакой более мелкой структуры на РАТАН-600 у этих ЛИ не наблюдается, хотя их размеры иногда в 2—3 раза превышают размеры диаграммы радиотелескопа на этих волнах. Аналогичный вывод был недавно получен при двумерном картографировании Солнца на VLA при использовании D-конфигурации на волне 21 см с разрешением около $40''$ [20].

Вывод о весьма сглаженной структуре активных областей в дециметровом диапазоне, однако, никак не противоречит наблюдениям тонкоструктурных элементов, приведенным в предыдущем разделе, так как их вклад в полный поток активной области обычно очень мал. Например, для AR 3804, как это следует из сравнения данных о потоках в табл. 3 и 4, этот вклад составляет 1—5 %. Из-за невысокого углового контраста детали, выделяемые системой апертурного синтеза VLA, на получаемых на РАТАН-600 записях практически не могут быть выделены.

Яркостная температура ЛИ AR3804, как это следует из табл. 4, максимальна на волне 13 см и составляет $(2.5-3) \cdot 10^6$ К. На более длинных волнах она несколько меньше — $(1.5-2) \cdot 10^6$ К. Такие значения яркостных температур, так же как и сглаженность их распределений, можно было бы объяснить тормозным излучением короны с большой оптической толщиной, как это неоднократно предполагалось ранее при объяснении наблюдений в диапазоне 21 см [20, 21]. Однако наши данные (так же как результаты ранних наблюдений на БПР [1]) показывают, что спектр потоков этой области растет в диапазоне 2—13 см, что не может быть объяснено в рамках теплового тормозного механизма. Полный поток ЛИ AR3804 по измерениям на волне 13 см 15 июля 1982 г. составлял 56 с. е. п., что в 4—5 раз выше излучения аморфной части источника на волне 2 см (рис. 6, а).

Заметим, что при той мере эмиссии, которая соответствует измерениям потока гало источника на волне 2 см, корона остается оптически прозрачной вплоть до длин волн 30—50 см. В связи с этим несколько неожиданным является тот факт, что на VLA не был обнаружен ни один из ядерных источников сантиметрового диапазона. Согласно экстраполяции результатов измерений на волнах 2—4 см на дециметровый диапазон (см. табл. 2), основанной на хорошо изученном и неоднократно подтвержденном наблюдениями тепловом магнитотормозном механизме генерации излучения, на волне 21 см ядерные источники, связанные с пятнами, должны быть достаточно компактными (размером 30—60"), яркими [$T_s = (2-5) \cdot 10^6$ К] и, по-видимому, обладать богатой тонкой структурой. Однако вместо этого на VLA в диапазоне 20 см наблюдаются источники совсем другого типа, вероятно связанные с петельными структурами магнитного поля разных масштабов (см. предыдущий раздел).

Поскольку природа большой оптической толщи не может быть связана с тормозным механизмом, то следует искать другие возможные механизмы. Единственно достаточно изученной альтернативой является гирорезонансное излучение на низких гармониках гирочастоты. При этом для волны 13 см необходимо иметь поле 450 и 300 Гс соответственно для второй и третьей гармоник, причем на всей площади активной области. При этом требуемый магнитный поток, связанный со столь высокими напряженностями поля во всем пространстве АО, оказывается в несколько раз больше, чем наблюдается на уровне фотосферы оптическими методами или фиксируется по сантиметровому радиоизлучению ядер, связанных с пятнами. Кроме того, при этом должны были бы наблюдаться области с высокой степенью круговой поляризации в тех местах, где магнитное поле достаточно для генерации излучения только на третьей гармонике гирочастоты.

В связи с этими трудностями следует иметь в виду необходимость рассмотрения таких нетепловых механизмов генерации радиоизлучения в дециметровом диапазоне волн, проблемы которых уже неоднократно обсуждались в связи с интерпретацией радиоизлучения источников S-компонента [1, 2, 22].

19 и 20 июля 1982 г. в центре диска Солнца наблюдалась корональная дыра, как следует из данных наблюдений в линии гелия 10830 Å [10]. Из рис. 16 видно, что на волнах дециметрового диапазона по наблюдениям на РАТАН-600 контраст радиояркости области, связанной с корональной дырой, очень мал по сравнению с яркостью спокойного Солнца. Оценки показывают, что он составляет не более 4—5 %.

На рис. 16, а приведены сканы Солнца на волнах 13, 21 и 31 см за 28 июля 1982 г. Область диска Солнца, которая исследовалась в этот день на VLA, показана на этом рисунке заштрихованным квадратом. Эта область является частью флоккулярного поля, в котором накануне, 27 июля 1982 г., наблюдалась группа пор. При выбранном масштабе записи на РАТАН-600 над этой областью с некоторым трудом удается выделить слабый протяженный источник. На волне 21 см его поток составляет около 1 с. е. п., а размер около 2'. При этом яркостная температура его $T_s = 4 \cdot 10^5$ К. На VLA в этой области зарегистрировано три детали с размерами 15—30'' с яркостными температурами $(3-13) \cdot 10^5$ К и с суммарным потоком около 20 % от величины, измеренной на РАТАН-600.

Итак, сопоставление структуры локальных источников радиоизлучения в дециметровом диапазоне волн, связанных с весьма сильно развитой областью

AR3804 и слабой областью AR3826, показывает, что эти источники представляют собой широкое бесструктурное гало размером $2-7'$, в которое вкраплены яркие детали малых угловых размеров ($10-30''$). Полный поток гало хорошо коррелирует с мощностью активной области, в то время как тонкоструктурные элементы выглядят примерно одинаково в обоих случаях. Их поток составляет лишь около 1 % от полного потока ЛИ в случае сильно развитой области и около 20 % от потока гало для слабо развитой области.

Авторы выражают глубокую благодарность Ю. Н. Парийскому за постоянное содействие выполнению работы, Ю. К. Звереву за обеспечение юстировок антенны, В. В. Витковскому и Т. И. Пляскиной за расчет эфемерид источников для нового режима работы антенны, Г. С. Голубчину за обеспечение установок антенны в автоматическом режиме и всем сотрудникам радиотелескопа РАТАН-600, принимавшим участие в проведении программы.

Авторы отдадут дань светлой памяти Д. В. Королькова, чье внимание и поддержка существенно помогли успешному выполнению программы наблюдений.

Литература

1. Исследование локальных источников радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне / Г. Б. Гельфрейх, Ш. Б. Ахмедов, В. Н. Боровик и др. // Изв. ГАО. 1970. № 185, С. 167—182.
2. Коржавин А. Н. Особенности структуры локальных источников на Солнце по наблюдениям с высоким разрешением. Реф. канд. дис. Л.: ГАО АН СССР, 1979.
3. Multiple wavelength observations of a solar active region / F. Chiuderi-Drago, R. Bandiera, R. Falciani et al. // Solar Phys. 1982. 80. P. 71—85.
4. Lang K. R., Willson R. F., Gaisa u a k a s V. Very large array observations of solar active regions. III: Multiple wavelength observations // Astrophys. J. 1983. 267. P. 455—464.
5. Наблюдения Солнца на радиотелескопе РАТАН-600. Первые результаты / Ю. Н. Парийский, Д. В. Корольков, О. Н. Шиврис и др. // Астрон. журн. 1976. 53. С. 1017—1026.
6. Шиврис О. Н. Работа радиотелескопа РАТАН-600 с плоским отражателем // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1980. 12. С. 134—140.
7. Многоволновый облучатель на резонаторах бегущей волны с единым фазовым центром для применения в радиоастрономии / В. М. Богод, В. Н. Диккий, Д. В. Корольков, В. Е. Сорель // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1983. 17. С. 124—130.
8. Солнечные данные. 1982. № 7.
9. Ишков В. Н., Коробова З. Б., Могилевский Э. И. Эволюция структуры, собственных движений и некоторые особенности больших вспышек в мощной вспышно-активной области июня—июля 1982 г.
10. Solar Geophysical Data. 1982. N 456, 457, pt I. Boulder, Colorado.
11. Bachmann G., Hofmann A., Staude J. Results of vector magnetographic measurements in the active region SD 228/229 on July 1982 // Publ. Debrecen. Obs. 1983. 5. P. 369—376.
12. Боровик В. Н. Радиохарактеристики спокойного Солнца в диапазоне 2—4 см по наблюдениям на РАТАН-600 / Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1981. 13. С. 17—29.
13. Absolute calibration of solar radio flux density in the microwave Region / H. Tanaka, J. P. Castelli, A. E. Covington et al. // Solar Phys. 1973. 29. P. 243—262.
14. X-ray and microwave observations of active regions / D. F. Webb, J. M. Davis, M. R. Kundu, T. Velusamy // Solar Phys. 1983. 85. P. 267—283.
15. The measurements of magnetic fields in the solar atmosphere above sunspots using gyroresonance emission / Sh. B. Akhmedov, G. B. Gelfreikh, V. M. Bogod, A. N. Korzhavin // Solar Phys. 1982. 79. P. 41—58.
16. Bogod V. M., Gelfreikh G. B. The measurements of magnetic field and gradient of temperature in the solar atmosphere above a flocculus using radio observations // Solar Phys. 1980. 67. P. 29—46.
17. Булатов Н. Н. О возможности аналитического описания структуры активной области // Астрон. журн., 1976. 53. С. 377—379.
18. Ultraviolet and soft X-ray observations of Hale region 16898 / K. Shibasaki, F. Chiuderi-Drago, M. Melozzi et al. // Solar Phys. 1983. 89. P. 307—321.
19. Willson R. F. Possible detection of thermal cyclotron lines from small sources within solar active regions // Solar Phys. 1983. 89. P. 103—113.
20. Dulk G. A., Gary D. E. The Sun at 1.4 GHz: Intensity and polarization // Astron. and Astrophys. 1983. 124. P. 103—107.
21. Кристьянсен У. М., Мэтьюсон Д. С. Природа медленно изменяющегося компонента // Радиоастрономия. Париж. симпозиум 1958 г. М.: ИЛ, 1961. С. 109—117.
22. Ахмедов Ш. Б., Гельфрейх Г. Б. Избыточное излучение локальных источников биполярных групп пятен // Солнеч. данные. 1981. № 6. С. 107—112.

Поступила в редакцию
20 февраля 1986 г.