

**РАДИОХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ,
СВЯЗАННОЙ С ПРОТОННОЙ ВСПЫШКОЙ 24 АПРЕЛЯ 1985 г.,
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА РАТАН-600**

В. Н. Боровик, С. М. Ватрушин,* А. Н. Коржавин*

По данным наблюдения Солнца на РАТАН-600 на десяти волнах в диапазоне 0.8—31 см рассмотрены эволюция и структура локального источника радиоизлучения, связанного со вспышечно-активной областью, в которой произошла мощная протонная вспышка. Показано, что в спектрах интегральных потоков источника стабильно выделяются два максимума: один в районе 3 см, другой — в диапазоне 8—12 см. Перед протонной вспышкой, за 10—12 мин до взрывной фазы, отмечено ослабление излучения на волнах 2—4 см и резкое возрастание излучения на дециметровых волнах.

Особенность структуры локального источника радиоизлучения в течение четырех дней (включая день вспышки) проявилась в том, что распределение интенсивности излучения над активной областью свидетельствовало о наличии стабильной доминирующей пекулярной детали в диапазоне 2—4 см, по положению совпадающей с линией раздела магнитного поля на фотосфере в районе всплывания нового магнитного потока вблизи тени наибольшего пятна. Спектрально-поляризационные характеристики этого пекулярного объекта, связанного с областью аномального энерговыделения, позволяют интерпретировать его в рамках горячего токового слоя в короне как гиротропное излучение субрелятивистской плазмы с $T \approx 10^8$ К и $n_e = 10^{10}$ см⁻³ в умеренных (несколько сотен гаус) магнитных полях.

The evolution and radiostructure of the flaring active region (where the proton flare took place) are considered on the basis of the RATAN-600 solar observations at ten wavelengths within 0.8—31.6 cm.

It is shown that there are two stable maxima in the flux spectra one is in the region of 3 cm, another — at the wavelengths of 8—12 cm. The radio emission decrease in the range of 2—4 cm and the remarkable increase of radiation at decimeter wavelengths was detected in this local radio source directly before the impulsive phase of the great flare.

Some peculiarities in the radio source structure were found during 4 days: a stable dominant peculiar detail was detected in the range of 2—4 cm. Its position coincides with the neutral line of the magnetic field on the photosphere near the region of the new magnetic flux emergence close to the umbra of the greatest spot in the group. The spectral-polarizational characteristics of the peculiar detail permit us to interpret its radiation in the frame of the hot current sheet model as a gyrosynchrotron radiation of subrelativistic plasma with a temperature of 10^8 K and an electron density of 10^{10} cm⁻³ in the moderate magnetic fields (with the strength of some hundreds Gauss).

Исследование в широком спектральном диапазоне явлений, сопутствующих солнечным вспышкам, важно для решения проблемы накопления и высвобождения энергии во время вспышек на Солнце.

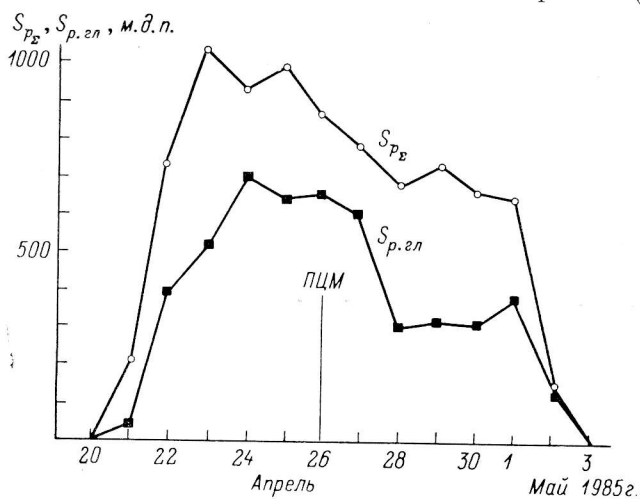
Целью настоящей работы является исследование в широком диапазоне волн (0.8—31 см) спектрально-поляризационных характеристик локального источника радиоизлучения вспышечно-активной области, в которой произошла протонная вспышка 24.04.85, в процессе его эволюции.

Исследуемая активная область (№ 4767 по Solar Geophysical Data [1] и № 26 (ПЦМ-26.04) по бюллетеню «Солнечные данные» [2]) возникла и развивалась на видимой стороне Солнца.

19.04.85 из-за лимба вышла флоккула, в которой через день появились мелкие поры. Затем группа бурно развивалась, и к 23.04.85 ее площадь превышала 1000 м. д. п. (рис. 1). Эволюция магнитной структуры активной области представлена на рис. 2. Здесь использованы данные магнитографических измерений, приведенные в бюллетене «Солнечные данные» [2] и бюллетене

* ГАО АН СССР.

Юннаньской обсерватории [3]. Как можно видеть из рис. 2, вначале группа пятен имела простую биполярную структуру, а начиная с 23.04.85 в головной части группы рядом с ведущим пятном северной полярности появилось и стало развиваться пятно противоположной полярности (южной), что свидетельствует,



по-видимому, о всплывании нового магнитного потока. Сложная структура группы сохранялась в течение 4 дней, после чего структура группы упростилась и стала вновь биполярной. Параллельно с изменениями в магнитной конфигурации группы менялась

Рис. 1. Изменение площади пятен группы № 26 (согласно бюллетеню «Солнечные данные»).

S_{pz} — площадь всей группы, S_{pz1} — площадь наибольшего пятна.

ее вспышечная активность. С момента образования группы в ней непрерывно регистрировались субвспышки, а после всплывания нового магнитного потока 24.04.85 в интервале времени 8 50—9 35 У. Т. была зарегистрирована вспышка балла 4В (в рентгеновском диапазоне, при этом была вспышка X 1.9). На сле-

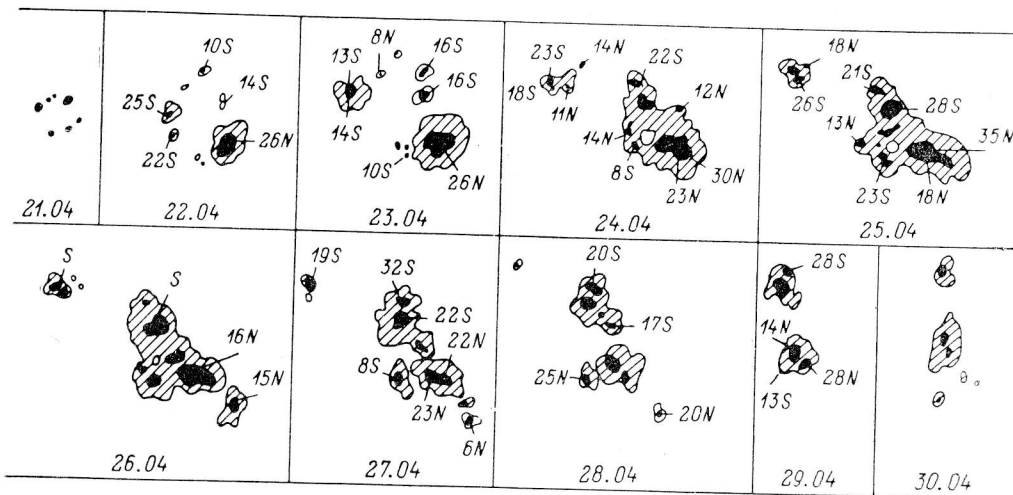


Рис. 2. Схематическое изображение группы пятен № 26 на основе фотогелиограмм, полученных в ГАС ГАО (Кисловодск).

Максимумы напряженности и полярности магнитных полей ядер приведены согласно бюллетеню Юннаньской обсерватории [9].

дующий день (25.04.85) был зарегистрирован приход протонов (в 14^h30^m), максимальный поток частиц (160 единиц) был отмечен 26.04.85 в 6^h00^m [1].

Мощная вспышка 24.04.85 сопровождалась сильным всплеском радиоизлучения в см-диапазоне волн (на частоте 8800 МГц амплитуда всплеска составила 14 000 с. е. п.) [1]. Были зарегистрированы всплески II и IV типов, а также шумовая буря (согласно [1] и наблюдениям на станции ИЗМИРАН). Кроме того, за период с 21 по 30 апреля регулярно регистрировались микроволновые импульсные всплески и всплески типа GRF.

Радиохарактеристики данной активной области исследовались по наблюдениям Солнца на радиотелескопе РАТАН-600, который использовался в режиме работы отражателя Южного сектора совместно с перископическим зер-

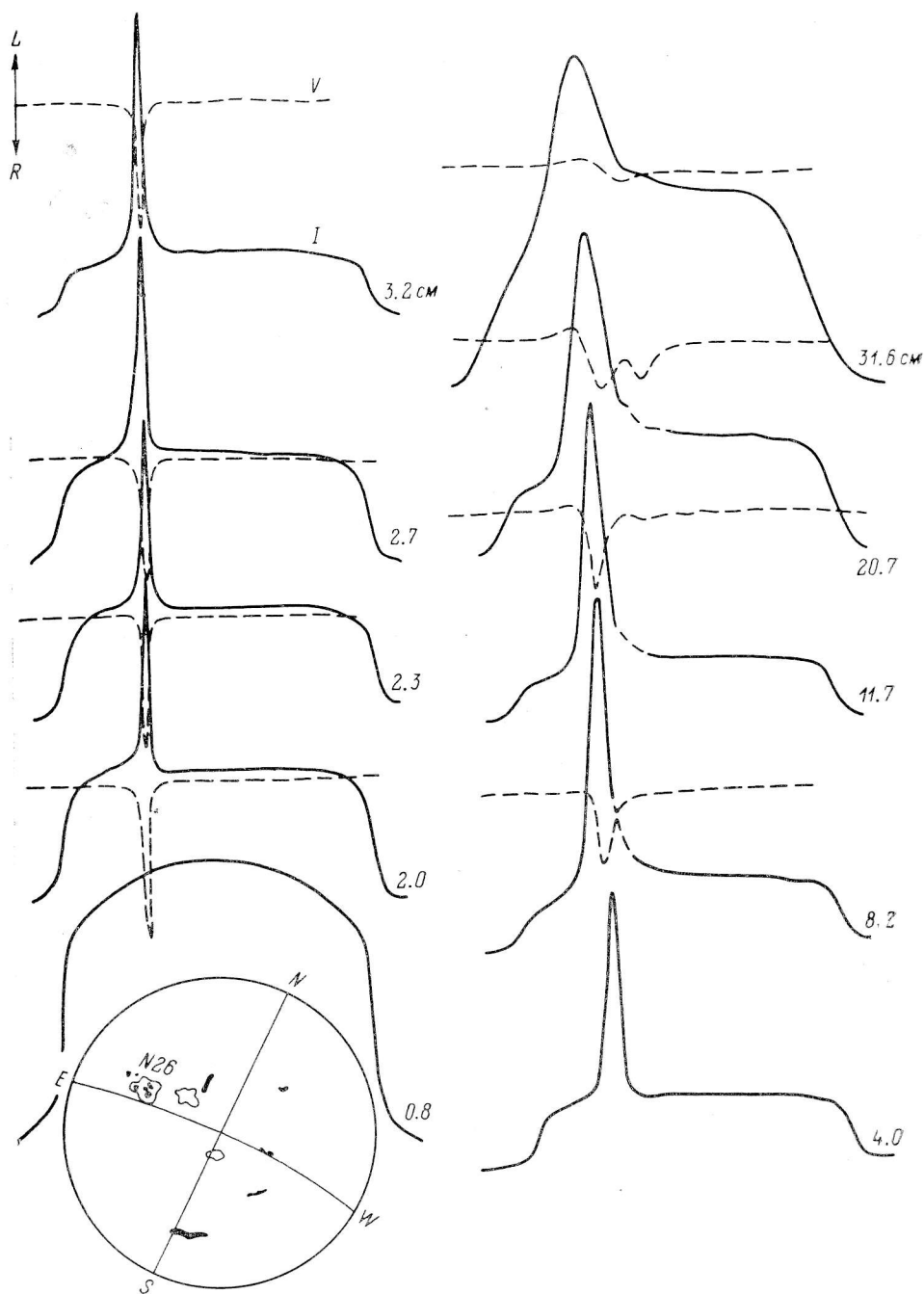


Рис. 3. Примеры записей Солнца на РАТАН-600 для 23.04.85.

Сплошная линия — интенсивность (параметр Стокса I), штриховая — поляризованная по кругу составляющая (параметр Стокса V).

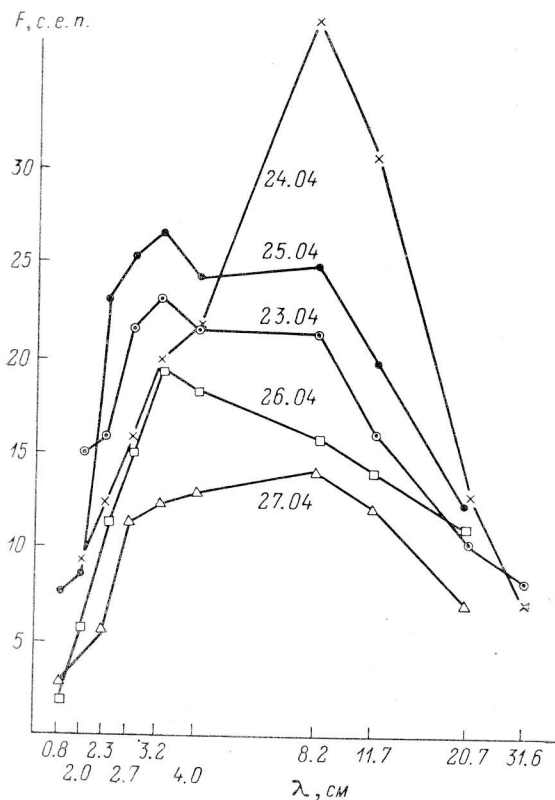
калом. Наблюдения проводились раз в сутки при прохождении Солнца в меридиане через неподвижную диаграмму направленности в $9^h11^m9^s$ и 12^m У. Т. Наблюдения велись на волнах 0.8, 2.0, 2.3, 2.7, 3.2, 4.0, 8.2, 11.7, 20.7 и 31.7 см с одновременной регистрацией интенсивности потока радиоизлучения и поля-

ризованной по кругу составляющей (параметры Стокса I и V). При наблюдениях использовался солнечный спектрально-поляризационный комплекс ИКАР-24 [4]. Методика наблюдений и обработки сканов Солнца с целью исследования параметров локальных источников радиоизлучения подробно описана в [5, 6]. Диаграмма направленности РАТАН-600 по уровню половины мощности составляла на крайних волнах используемого диапазона 0.8 и 31.6 см соответственно $7'' \times 5'$ и $280'' \times 193'$.

Общий вид сканов Солнца, полученных при наблюдениях Солнца на РАТАН-600, приведен в качестве примера для 23.04.85 на рис. 3.

Видно, что на всех волнах на записях Солнца выделяется один мощный локальный источник радиоизлучения с высокой степенью круговой поляризации.

На рис. 4 приведены спектры интегральных потоков радиоизлучения локального источника для периода с 23 по 27 апреля 1985 г. Видно, что за день



до протонной вспышки (23.04.85) и на следующий день после нее (25.04.85) спектры имеют одинаковый характер: в них можно выделить две составляющие — одну с максимумом на волнах 3 см и другую с максимумом на 8—10 см. В день мощной вспышки 24 апреля наблюдения на РАТАН-600 проводились за 12—15 мин до импульсной фазы всплеска радиоизлучения, т. е. непосредственно перед протонной вспышкой. (На рис. 5 показан профиль начала всплеска радиоизлучения на волне 3.2 см, зарегистрированного на ГАС ГАО). Можно видеть, что 24.04.85 на волнах 2—4 см характер спектра сохранился, хотя излучение на этой волне ослабло по сравнению с предыдущим днем,

Рис. 4. Спектры интегральных потоков радиоизлучения локального источника, связанного с группой пятен № 26, за период с 23 по 27 апреля 1985 г. по наблюдениям на РАТАН-600.

но при этом сильно возросло излучение на дм-волнах, в диапазоне 8—12 см. Кроме того, на следующий день после вспышки в области исследуемого радиоисточника появилось весьма заметное излучение также на волне 8 мм, которое продолжало наблюдаться в течение следующих трех дней.

Особый интерес представляет сопоставление положения центра тяжести излучения радиоисточника со структурой группы пятен на фотосфере.

На рис. 6 приведены профили локального источника, выделенного на сканах над уровнем спокойного Солнца, на разных волнах. Сплошная линия соответствует интенсивности, штриховая — поляризованной по кругу составляющей. Здесь же схематически приведено изображение группы пятен согласно гелиограммам, полученным на ГАС ГАО в Кисловодске. Точность сопоставления радиоизображения локального источника и фотограмм группы пятен на фотосфере составляет не хуже $3''$. Координатные измерения пятен на основе фотогелиограмм для данной работы были выполнены Ю. А. Наговицыным.

Поскольку головная часть группы была очень компактная ($1'$), то углового разрешения антенны оказалось недостаточно, чтобы надежно выделить от-

дельные детали в радиоизображении локального источника. Можно провести только отождествление центра тяжести излучения локального источника с деталями в группе пятен.

Из сравнения рисунков за 23, 24 и 25 апреля (рис. 6, а, б, в) видна следующая закономерность: на всех длинах волн рассматриваемого диапазона максимум излучения в канале интенсивности (I) совпадает не с наибольшим пятном в группе, площадь которого в указанные дни составила 0.7—0.8 от площади всей группы, а с областью всплывания нового магнитного потока. При этом максимум поляризованного по кругу излучения на волнах 2.0 и 2.3 см совпадает с положением тени наибольшего (головного) пятна группы. Можно отметить также, что отклонение положения центра тяжести излучения локального источника в канале интенсивности от положения тени наибольшего пятна в группе растет с длиной волны. Этот эффект наиболее заметен 23 апреля, когда группа расположена ближе к краю диска, и практически отсутствует,

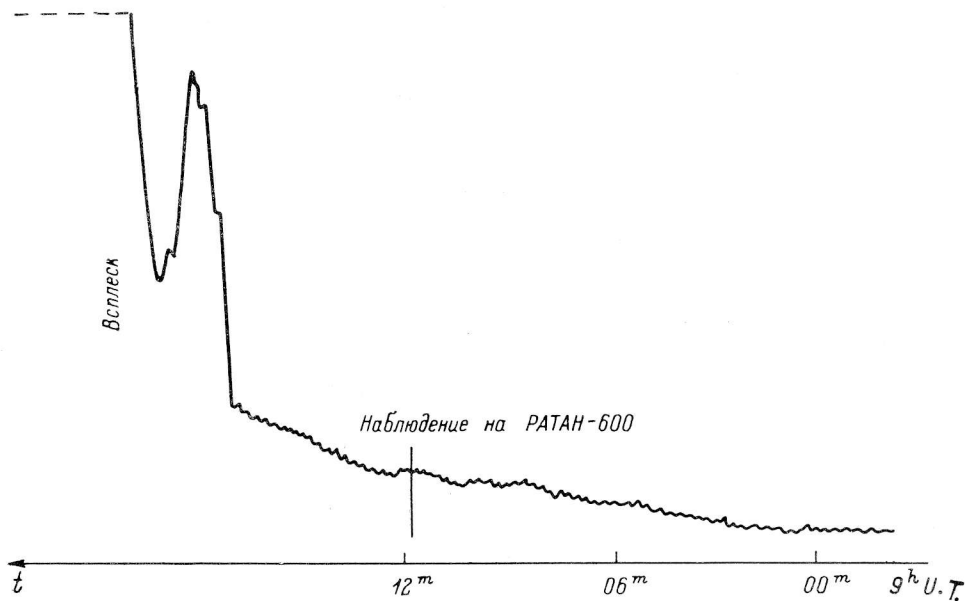


Рис. 5. Профиль начала всплеска радиоизлучения Солнца на волне 3.2 см, сопровождавшего протонную вспышку 24.04.85 (по наблюдениям на ГАС ГАО, Кисловодск).

когда активная область находится вблизи центрального меридиана (25 апреля). Возможно, эта закономерность связана с эффектом проекции и отражает рост высоты излучающей области с длиной волны. Следует отметить также, что до прохождения группой центрального меридиана наблюдается заметное смещение к восточному краю диска центра тяжести излучения на дм-волнах относительно излучения в см-диапазоне длин волн, причем характерный размер радиоисточника на волнах 8.2—31.6 см сравним с размерами всей группы ($\theta_{ист} \approx 2'$), а радиоисточник на волнах 2—4 см имеет размер $\theta_{ист} \leq 0.5$.

Указанные геометрические особенности рассматриваемого радиоисточника легко объяснить, если предположить существование двух областей радиоизлучения, одна из которых (компактная) находится по высоте значительно ниже другой, имеющей размеры, сравнимые с размерами всей активной области.

Обращает на себя внимание тот факт, что появившийся после протонной вспышки источник радиоизлучения на волне 8 мм имеет угловой размер, близкий к размеру всей головной группы, и в нем отсутствуют какие-либо мелкие детали. Центр тяжести излучения этого источника также совпадает с областью всплывания нового магнитного потока.

Степень поляризации локального источника, измеренная как отношение антенных температур в каналах I и V в точке максимальной интенсивности источника, на волнах 2—4 см составила 30—60 %.

Отметим, что после того как конфигурация группы пятен № 26 упростилась и приобрела простую биполярную структуру (27 апреля), такую же обычную для см-диапазона биполярную структуру приобрело поляризованное радиоизлучение исследуемой активной области (рис. 6, *з*).

Обсуждение и интерпретация. В рассматриваемой области радиоизлучения по спектральным и отмеченным выше геометрическим особенностям выделяются, на наш взгляд, четыре компоненты, излучение которых выходит из пространственно различных областей короны над исследуемой группой (рис. 7) и объяс-

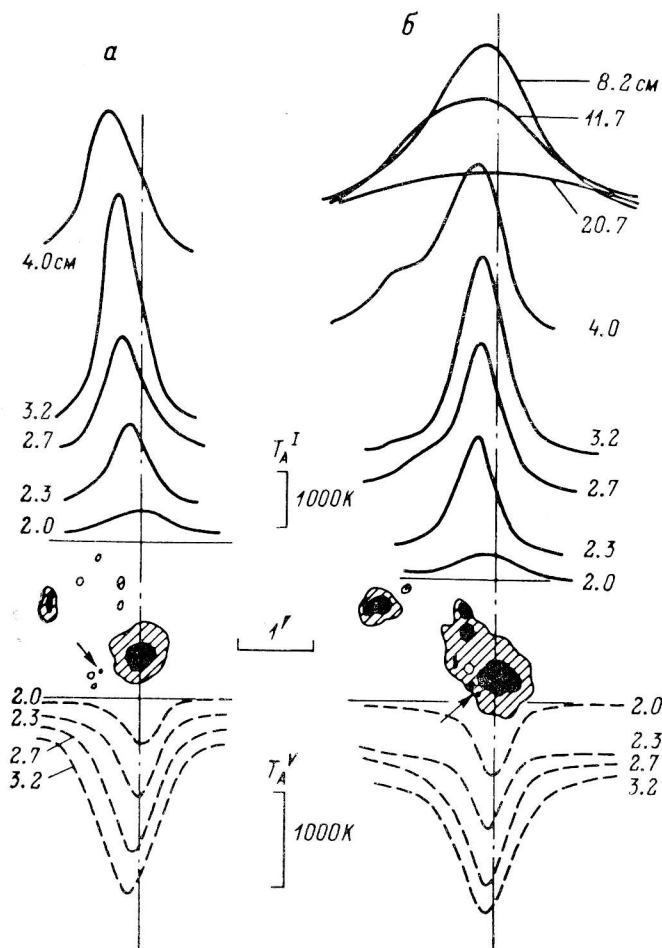


Рис. 6. Отождествление радиоизображения локального источника со структурой группы пятен № 26.

a — 23.04.85; *б* — 24.04.85; *в* — 25.04.85; *г* — 27.04.85. Стрелкой на схематическом изображении группы пятен показано место всплывания нового магнитного потока.

няется различными механизмами генерации радиоизлучения. Остановимся подробнее на характеристике этих компонент.

1. Область теплового тормозного излучения корональной конденсации (отмечено индексом *I* на рис. 7) с повышенной концентрацией электронов и температурой $T \approx 10^6$ К. С этой областью связано появление после мощной вспышки весьма заметного излучения на волне 8 мм, что свидетельствует о существенном (на порядок) возрастании меры эмиссии плазмы, заключенной в соответствующих корональных арках. Такое возрастание меры эмиссии (плотности) можно связать с испарением части хромосферы пятен под воздействием вспышки.

2. Область радиоизлучения типа дециметрового «гало» (отмечено индексом *2* на рис. 7). Механизм радиоизлучения этой области является, по-видимому, излучение субрелятивистских электронов со степенным распределением по

энергиям в слабых (10 Гс) магнитных полях, причем на длинноволновый участок спектра этой компоненты радиоизлучения, возможно, оказывает значительное влияние рассеяние на волнах плазменной турбулентности (см., например, [7—10]).

3. Источники теплового циклотронного излучения над пятнами, которые отчетливо видны в канале поляризации и по положению совпадают с тенями крупных пятен.

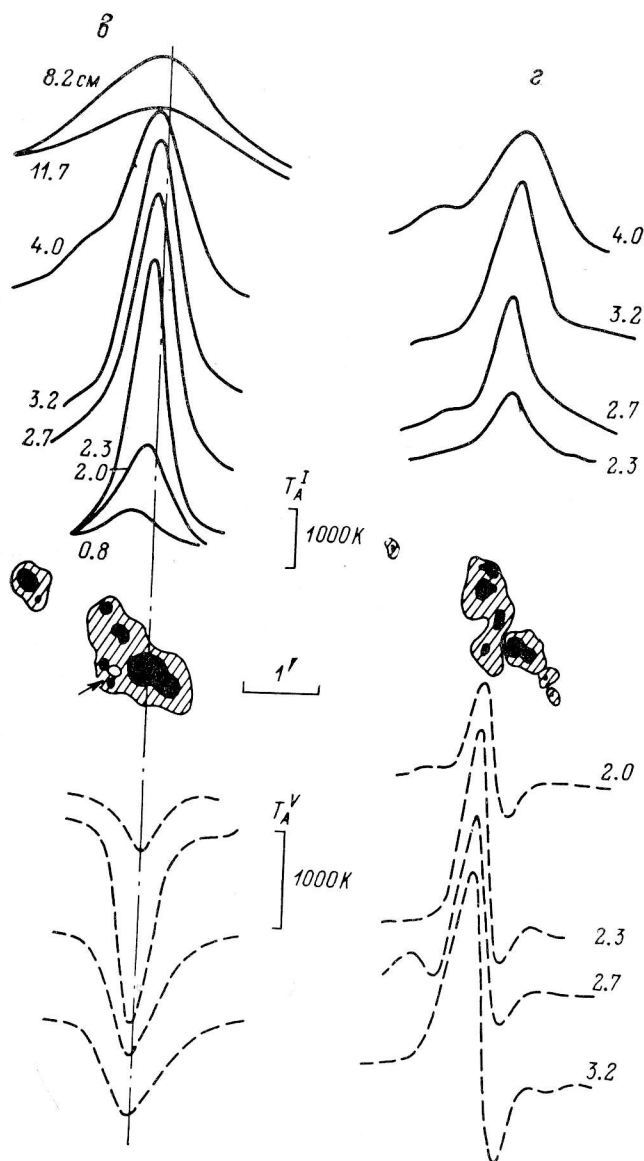


Рис. 6 (продолжение).

4. Компактный пекулярный источник, по положению проектирующийся на линию раздела полярностей фотосферного магнитного поля в районе всплывания нового магнитного потока вблизи тени наибольшего пятна в группе. Область излучения этого источника, по-видимому, связана с вершиной компактной (характерный размер 10^9 см) корональной арки, соединяющей вновь появившиеся пятна с противоположными магнитными полярностями.

Для объяснения необычных параметров этого источника мы предлагаем считать, что он представляет собой магнитнотормозное (гиротронное) излучение из области аномального энерговыделения, содержащей субреля-

тивистскую плазму с температурой $T=10^8$ К и концентрацией частиц $n_e=10^{10}$ см $^{-3}$ в умеренных (несколько сотен гаус) магнитных полях. Такие условия ожидаются в модели горячего турбулентного токового слоя с небольшой поперечной составляющей магнитного поля (см. [9]).

Этот вариант интерпретации был выбран после анализа трудностей, возникающих при привлечении других механизмов генерации радиоизлучения:

а) тепловой магнитнотормозной механизм генерации электронов на 2-й и 3-й гармониках гирочастот. Основная трудность состоит в том, что этот механизм требует существования в области генерации радиоизлучения магнитных полей с напряженностью 2—3 тыс. Гс, чего трудно ожидать в короне на высотах 10 тыс. км и вне области тени пятна;

б) гиротронный механизм генерации радиоизлучения в плазме со степенным распределением электронов по энергиям. В этом случае спектральный индекс (поток \propto частота $^{-\alpha}$) в коротковолновой части спектра не может превышать значения 6 (см. (13) в [8]), в то время как в рассматриваемом случае эта величина составляет ≥ 8 (рис. 4). Трудностью применения этого механизма

является также объяснение источника степенного распределения электронов по энергиям.

Приведем численные оценки некоторых физических параметров рассматриваемого радиоисточника в рамках принятого нами механизма генерации

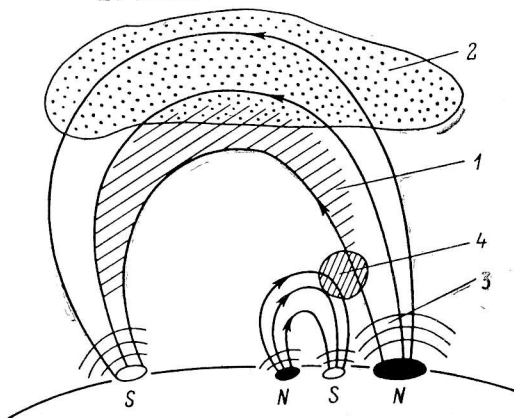


Рис. 7. Модель активной области.

1 — область теплового тормозного радиоизлучения корональной конденсации; 2 — область радиоизлучения типа «гало»; 3 — область теплового циклотронного излучения над пятнами; 4 — область аномального энерговыделения.

радиоизлучения (гиротронное излучение субрелятивистской плазмы), используя формулы, полученные в работе [8]. Считаем, что область генерации излучения имеет температуру $T=10^8$ К, концентрацию частиц 10^{10} см, характерный размер 10^9 см. Спектр излучаемого источника имеет максимум на волне 3 см (рис. 4). Используя эту наблюдаемую величину, можно получить оценку напряженности магнитного поля в области генерации радиоизлучения по следующей формуле [8]:

$$\nu_{\text{реак}} = 475 \left(\frac{NL}{B} \right)^{0.05} (\sin \vartheta)^{0.6} T^{0.5} B,$$

где $\nu_{\text{реак}}$ — частота максимума в спектре; ϑ — угол между направлением магнитного поля и направлением наблюдателя.

Из приведенной формулы видно, что величина $\nu_{\text{реак}}$ слабо зависит от концентрации частиц, размера излучающей области и температуры, а в основном определяется напряженностью магнитного поля B . Таким образом, мы имеем независимый радиоастрономический метод оценки напряженности магнитного поля в области аномального энерговыделения вспышечно-активной группы. Величина магнитного поля, полученная по этому методу, для рассматриваемой области составляет 300 Гс. Эта величина очень хорошо согласуется с расчетным значением напряженности магнитного поля для модели горячего турбулентного токового слоя с небольшой поперечной составляющей магнитного поля (см. [9]).

Следует отметить, что рассматриваемый пекулярный радиоисточник возник за 1—2 дня до протонной вспышки и устойчиво существовал после нее около 3 дней. Таким образом, протонная вспышка не привела к разрушению предполагаемого токового слоя, а его постепенное исчезновение в дальнейшем не сопровождалось сколько-нибудь значительными вспышками.

На основе данных, полученных в настоящей работе, представляется возможным объяснение в рамках модели горячего турбулентного токового слоя не только главной фазы вспышки, но и предвспышечного и послевспышечного состояния области аномального энерговыделения во вспышечно-активной группе.

В заключение следует отметить, что выявленные некулярные радиохарактеристики вспышечно-активной области могут играть важную роль в разработке физически обоснованной методики прогнозирования геоэффективных явлений на Солнце, а также могут служить основой для дальнейших разработок теоретических моделей солнечных вспышек.

Авторы благодарны З. Е. Петрову и В. А. Шатилову за проведение наблюдений Солнца, Ю. А. Наговицину за предоставление фотогелиограмм и измерение координат пятен, В. А. Сенику за предоставление записи всплеска радиоизлучения.

Авторы глубоко признательны Г. В. Гельфрейху за полезную дискуссию.

Литература

1. Solar Geophysical Data. 489 (1); 490 (1); 496 (1); 498 (1).
2. Солнечные данные. 1985. № 4.
3. Monthly Solar Activity, Yunnan. 1985. 4.
4. Богод В. М., Петров З. Е., Шатилов В. А. Расширенный комплекс ИКАР-24 на радиотелескопе РАТАН-600 // Всесоюзная XVII конференция «Радиоастрономическая аппаратура», Ереван, 10—12 декабря 1985 г.: Тез. докл. С. 227.
5. Структура активных областей на Солнце по наблюдениям на VLA и РАТАН-600 в июле 1982 г. // Ш. Б. Ахмедов, В. М. Богод, В. Н. Боровик и др. (Препринт № 19 АСАО АН СССР. 1985 // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1987. 25. С. 105—134.
6. The structure of solar active region from RATAN-600 and VLA-observations / Sh. B. Akhmedov, V. M. Bogod, V. N. Borovik et al. // Astrophys. J. 1986. 301. P. 460—464.
7. Пустильник Л. А., Хенаро Дель Рио. Диагностика плазменной турбулентности солнечных вспышек по рассеянию вспышечного радиоизлучения на плазмонах // Сообщ. САО. 1985. 46. С. 5—32.
8. Dulk G. A., Marsh K. A. Simplified expressions for gyrosynchrotron radiation from mildly relativistic nonthermal and thermal electrons // Astrophys. J. 1982. 259. P. 350—358.
9. Somov V. V. Nonneutral current sheets and solar flare energetic // Astron. and Astrophys. 1986. 163. P. 210—218.
10. Коржавин А. Н. Особенности структуры локальных источников радиоизлучения по наблюдениям с высоты разрешения: Канд. дис. Л., 1979.

Поступила в редакцию
27 июля 1987 г.