

УДК 523.98

СИНХРОННЫЕ УЯРЧЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ ПО ДАННЫМ СПЕКТРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА РАТАН-600

© 2004 г. О. А. Голубчина^{1*}, С. Х. Тохчукова²,
В. М. Богод¹, Х. А. Гарсиа³, В. И. Гараимов¹

¹Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН

²Главная астрономическая обсерватория РАН, Пулково

³Центр космической окружающей обстановки Национальной администрации океанологических и атмосферных исследований, Боулдер, США

Поступила в редакцию 12.01.2004 г.

По данным наблюдений радиоизлучения Солнца 11.09.2001 г. на Южном секторе радиотелескопа РАТАН-600 на четырех волнах сантиметрового диапазона (1.92, 2.24, 2.74 и 3.21 см) выявлены синхронные уярчения в источниках солнечного радиоизлучения, которые отождествлены на фотосфере Солнца с активными областями, удаленными друг от друга на расстояние вплоть до $\sim 10^6$ км (AR 9608, AR 9616). Обсуждается проявление возможных механизмов синхронных уярчений источников в узком спектральном диапазоне микроволнового излучения. Значимая линейная корреляция ($\rho_c = 0.84\text{--}0.92$) относительных потоков AR 9610 и AR 9608 на волнах 1.92 и 2.24 см, а также значимая линейная корреляция ($\rho_c = 0.65\text{--}0.84$) относительных потоков AR 9606 и AR 9608 на волне 3.21 см на двухчасовом интервале времени наблюдений указывают на взаимосвязь этих активных областей не только в моменты вспышек и всплесков, но и в периоды их отсутствия, что подтверждает существование крупномасштабной временной компоненты динамики изменения потоков радиоизлучения этих активных областей. Выявлено различие между динамикой радиоизлучения гало и рассматриваемых источников радиоизлучения Солнца. Показано совпадение моментов увеличения полного потока излучения Солнца в мягком рентгене (0.5–4.0 Å, 1.0–8.0 Å; GOES 8, GOES 10) и моментов увеличения потоков источников солнечного радиоизлучения на коротких сантиметровых волнах.

Ключевые слова: Солнце, солнечные вспышки, радиоизлучение активных областей на Солнце.

SYNCHRONOUS MICROWAVE BRIGHTENINGS OF SOLAR ACTIVE REGIONS FROM RATAN-600 SPECTRAL OBSERVATIONS, *by O. A. Golubchina, S. Kh. Tokhchukova, V. M. Bogod, H. A. Garcia, and V. I. Garaimov.* The radio observations of the Sun on September 11, 2001, with the RATAN-600 radio telescope (Southern Sector) at four centimeter wavelengths (1.92, 2.24, 2.74, and 3.21 cm) revealed synchronous brightenings in solar radio sources. These were identified in the solar photosphere with active regions that were spaced up to $\sim 10^6$ km apart (AR 9608, AR 9616). We discuss manifestations of the possible mechanisms of synchronous brightenings in solar sources in a narrow microwave spectral band. The significant linear correlation ($\rho_c = 0.84\text{--}0.92$) between the relative fluxes of AR 9610 and AR 9608 at 1.92 and 2.24 cm and the significant linear correlation ($\rho_c = 0.65\text{--}0.84$) between the relative fluxes of AR 9606 and AR 9608 at 3.21 cm in a two-hour interval of observations are indicative of the interconnection between these active regions not only during flares and bursts, but also during their absence. This confirms the existence of a large-scale temporal component in the dynamics of the radio flux variations for these active regions. We found a difference between the temporal variations of the radio emission from the halo and the solar radio sources under consideration. We show that the times of the increase in the total solar soft X-ray (0.5–4.0 Å, 1.0–8.0 Å; GOES 8, GOES 10) flux coincide with the times of the increase in the fluxes from solar radio sources at short centimeter wavelengths.

Key words: Sun, solar flares, radio emission from solar active regions.

* Электронный адрес: oag@OG4466.spb.edu

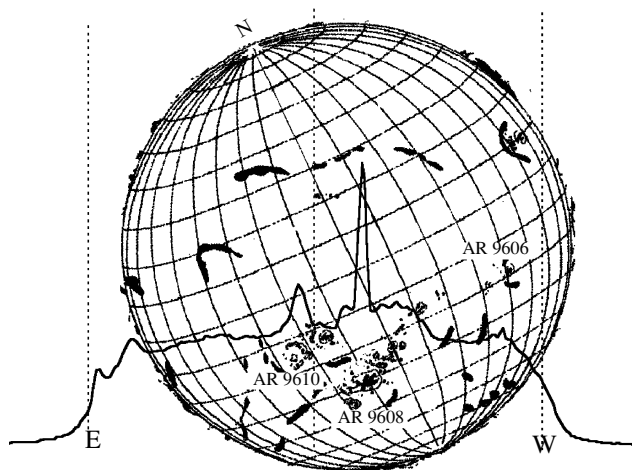


Рис. 1. Запись радиоизлучения Солнца на $\lambda = 2.24$ см (РАТАН-600) и фотогелиограмма Солнца (ГАС ГАО РАН) 11.09.2001.

ВВЕДЕНИЕ

Симпатическими вспышками (всплесками) принято называть парные вспышки (всплески), которые возникают почти одновременно на Солнце в местах, удаленных друг от друга на расстояния вплоть до $>10^6$ км. Полагают, что симпатические вспышки являются результатом воздействия первичной вспышки на удаленную от нее активную область, т.е. симпатические вспышки (всплески) являются вторичными вспышками (всплесками).

Симпатические вспышки и всплески изучались на всех крупных телескопах в оптическом, радио- и рентгеновском диапазонах (см. обзоры Голубчиной, 2001, 2002). Начиная с 60-х годов симпатические всплески исследуются в радиодиапазоне. Как правило, в работах, посвященных этой проблеме, рассматривались единичные случаи симпатических всплесков. С одной стороны, это, вероятно, связано с недостаточно высокой чувствительностью радиотелескопов. С другой стороны, исследователи стремятся изучить наиболее мощные события, которые бывают не столь часто. Поэтому симпатические вспышки и всплески казались редкими экзотическими явлениями. Начиная с 1980 г., симпатические всплески исследовались на радиотелескопе РАТАН-600 (Голубчина, 1999, 1995). Сейчас временное разрешение РАТАН-600 составляет несколько минут (Тохчукова, 2002), поэтому вместо термина “симпатические всплески” мы используем термин “синхронные уярчения”. Этот термин указывает на существование почти одновременных повышений потоков нескольких источников радиоизлучения Солнца на определенный момент наблюдения. Уярчения источников мы считаем синхронными, если они зарегистрированы на интерва-

ле времени 2–2.5 мин, т.е. времени прохождения Солнца через диаграмму направленности антенны.

Высокая чувствительность системы радиотелескоп–радиометр по потоку, равная 0.005 с.е.п. (солнечных единиц потока) в многоазимутальных наблюдениях Солнца, позволяет достоверно регистрировать даже незначительные, до десятых долей с.е.п., изменения в потоках источников, что исключительно важно при исследовании синхронных уярчений.

Другим важным свойством является широкодиапазонность РАТАН-600 (18–0.95 ГГц) (Богод и др., 1999). Возможность исследования синхронных изменений потоков источников солнечного радиоизлучения на РАТАН-600 с высокой чувствительностью в широком диапазоне длин волн способствует более точному пониманию физической природы механизма возникновения симпатических всплесков на основе данных наблюдений разных уровней атмосферы Солнца.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения радиоизлучения Солнца выполнены 11.09.2001 г. (8:30–10:30 UT) на южном секторе радиотелескопа РАТАН-600 с перископом в многоазимутальном режиме (Тохчукова, 2002) на волнах 1.92, 2.24, 2.74 и 3.21 см. Временной интервал между последовательными сканами Солнца был равен 8 мин. На каждой волне получено по 16 записей радиоизлучения Солнца. Рабочая часть поверхности главного зеркала антенны формировалась при последовательном наведении и отведении групп отражающих элементов в соответствии с изменением азимута центра оптического диска Солнца. Вторичный отражатель при этом перемещался по дуговым рельсам в соответствии с изменением азимута наблюдения. Диаграмма направленности антенны при наблюдениях на южном секторе РАТАН-600 с перископом является ножевой. Пространственное разрешение антенны по уровню 0.5 мощности ($\theta_{0.5}$) равно соответственно: $\lambda = 1.92$ см, $\theta_{0.5} = 17.3$ (угл. сек) $\times 14$ (угл. мин); $\lambda = 2.24$ см, $\theta_{0.5} = 21$ (угл. сек) $\times 16$ (угл. мин); $\lambda = 2.74$ см, $\theta_{0.5} = 23$ (угл. сек) $\times 18.8$ (угл. мин); $\lambda = 3.21$ см, $\theta_{0.5} = 26.7$ (угл. сек) $\times 23$ (угл. мин).

Изменение позиционного угла наблюдения Солнца в течение всего двухчасового сеанса наблюдений было незначительным: $\Delta q = \pm 1^\circ$. Чувствительность системы радиотелескоп–радиометр по антенной температуре при наблюдении Солнца составляла $\Delta T_A \approx 1$ К, а по потоку — $\Delta F \approx 0.005$ с.е.п.

Исследуемые источники солнечного радиоизлучения отождествлены с биполярными активными областями AR 9610, AR 9608, AR 9606 (рис. 1)

и восходящими активными областями AR 9616, AR 9617 (Solar Geophysical Data, SGD) на фотосфере Солнца.

Керрингтоновские долготы рассматриваемых активных областей: AR 9608, AR 9610, AR 9616, AR 9617, AR 9606 равны соответственно 108° , 95° , 20.5° , 19.5° , 153° .

Расстояния (L) между активными областями на оптическом диске Солнца равны $L(\text{AR 9610, AR 9608}) = 1.6 \times 10^5$ км, $L(\text{AR 9606, AR 9608}) = 5.5 \times 10^5$ км, $L(\text{AR 9610, AR 9616}) = 9.1 \times 10^5$ км, $L(\text{AR 9616, AR 9608}) = 0.7 \times 10^6$ км, $L(\text{AR 9610, AR 9606}) = 7.1 \times 10^5$ км; $L(\text{AR 9606, AR 9616}) = 16 \times 10^5$ км.

Динамика изменения относительных потоков радиоизлучения перечисленных источников сопоставлялась согласно данным службы Солнца с $\text{H}\alpha$ -вспышками в хромосфере Солнца, с микроволновыми всплесками на частоте 9100 МГц, а также со всплесками в рентгеновском диапазоне по данным спутников GOES 8 и GOES 10 в двух каналах: 0.5–4.0 Å, 1.0–8.0 Å.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ

Введем условные обозначения физических параметров солнечного радиоизлучения: F_0 — поток радиоизлучения от спокойного Солнца, F — абсолютный поток, (F/F_0) — относительный поток, $T_B(\text{K})$ — яркостная температура, r — угловой размер источника радиоизлучения Солнца, $\delta(F/F_0)$ — абсолютная погрешность измерения величины относительного потока источника или абсолютная погрешность разности относительных потоков источника на момент синхронных уярчений, $\varepsilon(F)$ — относительная погрешность определения потока источника, $\varepsilon(F_0)$ — относительная погрешность определения потока спокойного Солнца, ΔF и $\Delta(F/F_0)$ — приращения абсолютного и относительного потоков источника радиоизлучения Солнца соответственно, n — значимость изменения относительного потока ($n = \Delta(F/F_0)/\delta(F/F_0)$); $\Delta(F/F_0) = (F/F_0)_{N+1} - (F/F_0)_N$, N — номер наблюдения).

Для обнаружения синхронных повышений интенсивности радиоизлучения источников исследовалась зависимость изменения относительных потоков источников (F/F_0) со временем.

За уровень спокойного Солнца принималась нижняя огибающая источников солнечного радиоизлучения, которая проводилась по участкам

Солнца, свободным от активных образований (Голубчина, 1999). Уровень и форма нижней огибающей определялись путем усреднения всех записей, приведенных к одному масштабу, и проведением нижней огибающей усредненной записи с использованием сплайн-функции. S — компонента, т.е. медленно меняющаяся компонента радиоизлучения Солнца, выделялась путем вычета спокойного Солнца из каждой записи радиоизлучения Солнца. При обработке использовался комплекс программ, разработанных на РТАН-600 (Богод, 1999; Гараимов, 1997).

Физические характеристики источников солнечного радиоизлучения — абсолютные потоки, угловые размеры, яркостные температуры — вычислялись с применением гаусс-анализа при аппроксимации формы исследуемого источника гауссианой с соответствующими параметрами. Гауссианы вписывались от уровня нижней огибающей источников. Если источник имеет сложную форму, то программы обработки позволяют использовать другой метод определения потока радиоизлучения. В этом случае наблюдатель задает границы этого источника без его аппроксимации гауссианой. Этот способ обработки был применен для исследования динамики радиоизлучения AR 9610 (кроме $\lambda = 2.24$ см), AR 9616, AR 9606. Полученные средние величины физических параметров источников приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, найденные значения потоков характерны для источников средней и слабой интенсивности, а яркостные температуры источников $T_B \approx 10^4$ – 10^5 К соответствуют температуре верхней хромосферы и нижней короны.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННЫХ УЯРЧЕНИЙ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА НА ВОЛНАХ 2.24 и 1.92 см

Зависимость относительного потока источника от времени отражает динамику радиоизлучения активной области. Соответствующие изменения относительных потоков источников, отождествленных с активными областями AR 9610 и AR 9608, приведены на рис. 2. Значения $\varepsilon(F)$, $\varepsilon(F_0)$, F/F_0 были определены непосредственно при обработке наблюдений. Абсолютные погрешности $\delta(F/F_0)$ вычисляются по формуле (Тейлор, 1985)

$$\delta(F/F_0) = (F/F_0)[\varepsilon^2(F) + \varepsilon^2(F_0)]^{1/2}.$$

Средние относительные погрешности измерений F_0 , F и абсолютные погрешности измерения относительных потоков источников на $\lambda = 2.24$ см равны:

$\varepsilon(F_0) = 1.55\%$ (по 16 записям Солнца на всем интервале наблюдений),

Таблица 1. Средние значения физических характеристик исследуемых источников, наблюдавшихся на радиоволнах 1.92, 2.24, 2.74 и 3.21 см

λ , см	F , с.е.п.	F/F_0 , %	r , угл. мин.	T_B , К	F , с.е.п.	F/F_0 , %	r , угл. мин.	T_B , К
AR 9617					AR 9616			
1.92	1.14	0.38	0.60	4.5×10^4	1.17	0.7	1.14	2.3×10^4
2.24	—	—	—	—	2.65	0.94	1.07	4.6×10^4
2.74	1.9	0.64	0.66	1.2×10^5	3.45	1.15	1.39	5.1×10^4
3.21	2.98	1.46	0.91	1.4×10^5	3.18	1.57	1.15	10^5
AR 9610					AR 9608			
1.92	6.02	2.02	1.5	3.7×10^4	8.1	2.72	0.6	3.1×10^5
2.24	4.35	1.66	1.37	4.6×10^4	7.79	3.02	0.57	4.7×10^5
2.74	4.52	1.51	1.45	8.4×10^4	11.84	3.97	0.77	5.7×10^5
3.21	4.73	2.34	≈ 2.5	$\approx 4.5 \times 10^4$	14.65	7.15	1.08	4.9×10^5
AR 9606								
2.74	7.43	2.49	2.13	4.0×10^4				
3.21	9.82	4.85	≈ 3.86	$\approx 2.9 \times 10^4$				
AR 9608 (после выделения гало)								
2.24	6.08	2.3	0.48	5.1×10^5				
3.21	9.31	4.61	0.86	4.9×10^5				

$\varepsilon(F) = 1.77\%$; $\delta(F/F_0) = 0.05\%$ (по измерениям AR 9610 и AR 9608),

$\varepsilon(F) = 1\%$ (по измерениям AR 9616). Абсолютная погрешность $\delta(F/F_0)$ величины относительного потока (F/F_0) приведена в процентах, так как относительный поток радиоизлучения источника дан в процентах.

Принимая во внимание модель источника солнечного радиоизлучения, рассмотренную в работе Алиссандракиса и др. (1993), под AR 9608 было выделено гало (протяженная, умеренной яркости и небольшой степени поляризации компонента локального источника) (рис. 3а). После вычета гало источник AR 9608 отождествлен с самым крупным пятном в AR 9608 (рис. 1). Средний угловой размер источника AR 9608 равен 29 угл. сек. Размер этого пятна без полутени, промеренный на изображении Солнца в белом свете по данным SGD (Гавайи), составляет 31.5 угл. сек. Для определения физических характеристик источников S-компоненты после вычета гало также применялся гаусс-анализ источников, отождествленных с активными областями AR 9608, AR 9610 (рис. 3б).

Следует отметить, что при обработке источников с использованием процедуры выделения гало динамика интенсивности радиоизлучения AR 9608, AR 9610 и их физические параметры практически не изменились (рис. 2). Однако в моменты синхронных уярчений 8:38, 9:02, 9:50 UT увеличения относительных потоков проявились более отчетливо, а в момент 9:34 UT, т.е. в момент всплеска (C9.7) в рентгеновском излучении Солнца, также проявились синхронные уярчения в AR 9608, AR 9610 (см. рис. 26). Синхронные уярчения зарегистрированы в источниках, отождествленных с активными областями AR 9610 и AR 9608, на моменты прохождения центра оптического диска Солнца через центр диаграммы направленности антенны: 8:38, 9:02, 9:34, 9:50, 10:30 UT. Величины, характеризующие повышение относительных потоков источников на моменты синхронных уярчений, приведены в табл. 2. Изменения относительных потоков AR 9610 и AR 9608 между соседними наблюдениями на моменты синхронных уярчений зарегистрированы на уровне $\approx 3\delta(F/F_0)$. Это подтверждает достоверность явления синхронных уярчений AR 9610 и AR 9608.

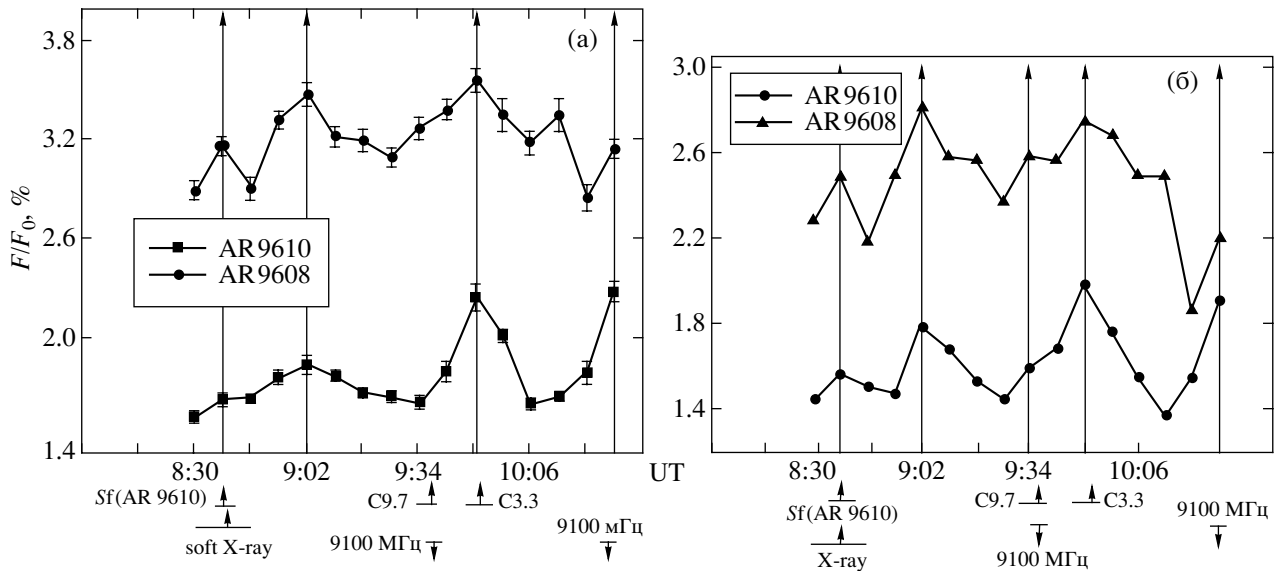


Рис. 2. Временные вариации относительных потоков источников, отождествленных на фотосфере Солнца с активными областями AR 9610 и AR 9608, на $\lambda = 2.24$ см и их связь с активными явлениями, наблюдаемыми в других диапазонах: (а) — до выделения гало AR 9608; (б) — после выделения гало. Внизу приведены: стрелка вверх — временной интервал и момент максимума $H\alpha$ -вспышки и повышения интенсивности излучения в мягком рентгене, стрелка вниз — то же на частоте 9100 МГц. Вертикальные прямые-стрелки проведены на моменты синхронных уярчений.

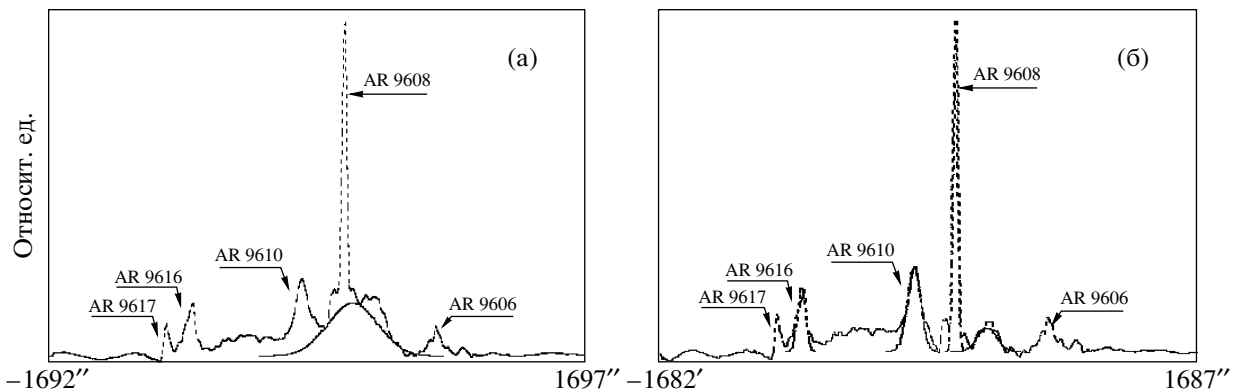


Рис. 3. (а) — Пример выделения гало из S -компоненты на $\lambda = 2.24$ см путем аппроксимации его гауссианой; (б) — аппроксимация источников радиоизлучения Солнца гауссианами после выделения гало.

Оценки точности обработки наблюдений подтверждают реальность изменений потоков радиоизлучения источников на моменты синхронных уярчений. Косвенным доказательством реальности синхронных уярчений являются приведенные на рис. 2 зарегистрированные службами Солнца на моменты синхронных уярчений, активные процессы в мягком рентгене (GOES 8, GOES 10), $H\alpha$ -вспышки (SGD) и всплески в радиодиапазоне на частоте 9100 МГц (SGD), наиболее близкой к частотам наших наблюдений.

Полученные величины синхронных повышений относительных потоков AR 9610 и AR 9608 для двух соседних наблюдений на волне 2.24 см

равны $\Delta(F/F_0) = 0.13\text{--}0.37\%$ (табл. 2), что соответствует изменению их абсолютных потоков на несколько или десятки процентов $\Delta F/F = 3.5\text{--}18\%$ или в абсолютных единицах потока $\Delta(F) = 0.24\text{--}0.88$ с.е.п.

Согласно данным служб Солнца (SGD), 11.09.2001 отмечался умеренный уровень вспышечной активности в AR 9610 и AR 9608 (Богод, Тохчукова, 2003). Синхронные уярчения в 08:38 UT попали во временной интервал $H\alpha$ -вспышки (Sf) в AR 9610. Начало, максимум и конец этой вспышки приходятся соответственно на моменты 08:36, 08:38, 08:43 UT (SGD). Оригинальные данные обнаруживают слабый всплеск в мягком рентгене

Таблица 2. Характеристики исследуемых источников радиоизлучения Солнца на моменты синхронных уярчений на волне 2.24 см

UT	F , с.е.п.	F/F_0 , %	ΔF , с.е.п.	T_B , К	r , угл. сек	$\Delta(F/F_0)$, %	$\delta(F/F_0)$, %	Значимость
AR 9608 (без гало)								
08:38	6.65	2.49	0.72	4.7×10^5	31	0.20	0.06	3.3
09:02	7.42	2.49	0.88	5.7×10^5	30	0.32	0.09	3.6
09:34	6.73	2.59	0.41	6.0×10^5	27	0.22	0.09	2.4
09:50	7.08	2.74	0.24	6.1×10^5	28	0.18	0.09	2.0
10:30	5.69	2.20	0.71	5.3×10^5	27	0.33	0.10	3.3
AR 9610								
08:38	4.21	1.58	0.45	8.4×10^4	58	0.13	0.05	2.6
09:02	4.74	1.79	0.84	6.2×10^4	72	0.31	0.08	3.9
09:34	4.14	1.60	0.27	4.3×10^4	81	0.15	0.06	2.5
09:50	5.16	1.99	0.64	3.7×10^4	98	0.30	0.10	3.0
10:30	4.98	1.92	0.84	3.1×10^4	104	0.37	0.09	4.1

(рис. 4а) на интервале времени (8:30–8:39–8:47) UT. Оба источника AR 9608, AR 9610 наблюдались на РАТАН-600 вблизи момента максимума $H\alpha$ -вспышки в AR 9610 с той лишь разницей, что AR 9610 (08:38:01.2 UT) проходит через центр диаграммы направленности антенны на 1.2 с позже, а AR 9608 (08:38:19.3 UT) — на 19.3 с позже момента максимума $H\alpha$ -вспышки (08:38 UT). Если предположить, что на $\lambda = 2.24$ см начало уярчения AR 9608 совпадает с моментом максимума $H\alpha$ -вспышки в AR 9610, то получим значение скорости возмущающего агента $V = 10^4$ км/с. В том случае, если уярчения в этих источниках связаны с началом $H\alpha$ -вспышки в AR 9610, скорость возмущающего агента равна $V = 1.6 \times 10^3$ км/с.

Рассмотрим другой случай: начало, максимум и конец всплеска в мягком рентгене (класса C9.7, рис. 2, 4) зарегистрированы в моменты 09:33, 09:37, 09:39 UT соответственно. Наблюдения на РАТАН-600 попадают последовательно на моменты 09:34, 09:42 UT (рис. 4б), т.е. на начало и конец этого всплеска, наиболее мощного в период наших наблюдений. Как было отмечено выше, на момент наблюдений 09:34 UT на РАТАН-600 выявлены синхронные уярчения в источниках AR 9608 и AR 9610 (рис. 2б).

Следующий момент 09:50 UT прохождения центра оптического диска Солнца через центр диаграммы направленности антенны РАТАН-600 попадает во временной интервал всплеска класса C3.3 в мягком рентгене (рис. 2) (09:47–09:51–09:55 UT). На РАТАН-600 на $\lambda = 2.24$ см зарегистрированы синхронные уярчения источников

радиоизлучения AR 9610 и AR 9608 на момент наблюдений 09:50 UT (рис. 2а, б).

Наблюдение на РАТАН-600 в 10:30 UT попадает на конец микроволнового всплеска типа 1s на частоте 9100 МГц (10:27.5–10:28.3–10:29.9 UT). На момент наблюдения 10:30 UT также выявлены синхронные уярчения в источниках AR 9608 и AR 9610 (рис. 2а, б и табл. 2).

Что касается динамики радиоизлучения AR 9616, то следует отметить отсутствие четких синхронных уярчений на уровне 3δ . Однако, как будет показано, нельзя полностью отрицать корреляцию динамики излучения источника AR 9616 и динамики рассмотренных нами источников AR 9608 и AR 9610.

Динамика радиоизлучения источников AR 9608 и AR 9610 на волне 1.92 см (рис. 5а) подобна динамике на волне 2.24 см. Особенностью излучения этих источников на волнах 1.92 и 2.24 см является существование синхронности излучения в 09:02 UT (рис. 2, 5а). Службы Солнца не отмечают никаких событий ни во время зарегистрированного нами синхронного уярчения в 9:02 UT, ни в следующий момент наблюдений 9:10 UT. Однако в мягком рентгене в обоих каналах зарегистрировано четкое увеличение интенсивности излучения на момент наблюдения 09:10 UT (рис. 5б).

На волне 2.24 см 11.09.2001 наблюдались синхронные уярчения малой интенсивности $\Delta F \approx 0.24$ –0.88 с.е.п. Как было отмечено выше, столь незначительные изменения потока радиоизлучения источников удастся зарегистрировать на РАТАН-600 благодаря высокой чувствительности систе-

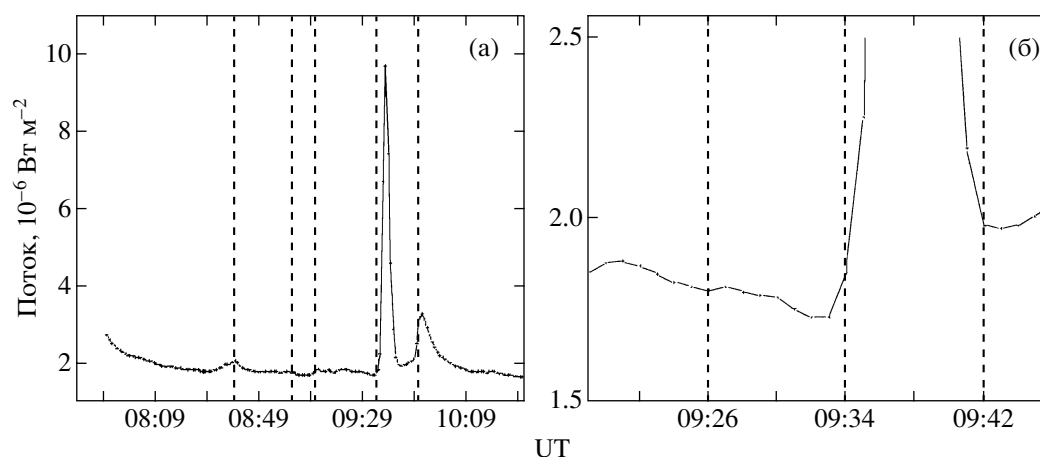


Рис. 4. Изменение полного потока мягкого рентгеновского излучения Солнца со временем по данным GOES 8, GOES 10 в канале (0.5–4.0 Å): (а) — на всем интервале времени наблюдений на РАТАН-600; (б) — на интервале времени 9:20–9:46 UT. Штриховыми линиями отмечены моменты обсуждаемых уярчений, зарегистрированных на РАТАН-600.

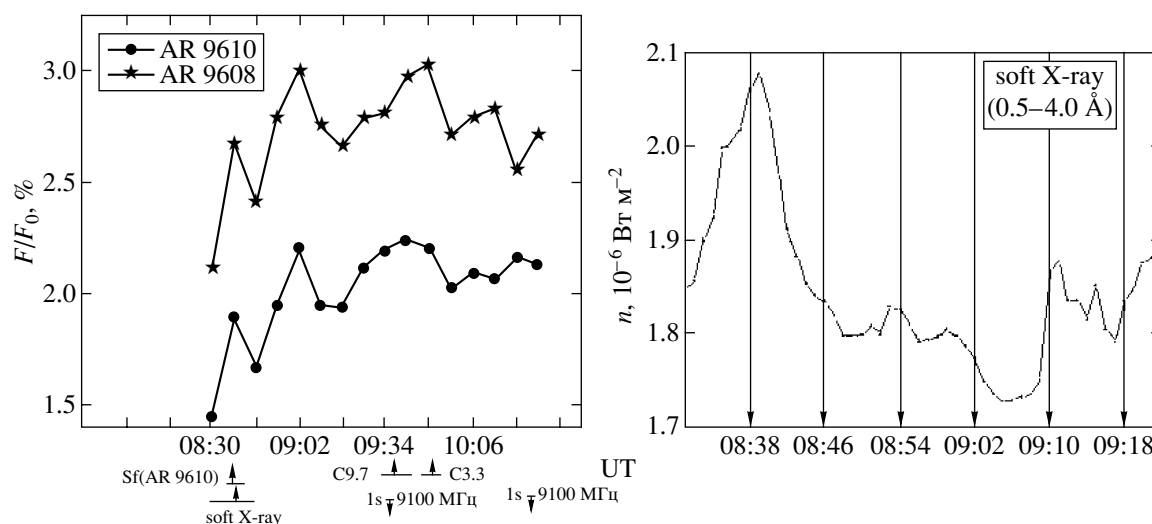


Рис. 5. (а) — Временные вариации относительных потоков радиоизлучения источников AR 9610, AR 9608 на волне 1.92 см; (б) — фрагмент всплеска в мягком рентгене 11.09.2001 (мягкий рентген, GOES-8, GOES-10, 0.5–4.0 Å), положения стрелок вниз совпадают с моментами наблюдений на РАТАН-600.

мы радиотелескоп–радиометр по потоку ($\Delta F \approx \approx 0.005$ с.е.п.).

точников AR 9608 (с гало), AR 9608 (без гало), AR 9610, AR 9616, AR 9606 (табл. 4, рис. 6).

Средняя относительная погрешность измерения

СИНХРОННЫЕ УЯРЧЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА НА ВОЛНАХ 3.21 и 2.74 см

Используя описанную выше методику, мы исследовали также источники на $\lambda = 2.74$ см и $\lambda = 3.21$ см. Полученные физические характеристики исследуемых источников приведены в табл. 1 и 3.

На волне 3.21 см зарегистрировано несколько синхронных уярчений в различных сочетаниях ис-

Таблица 3. Средние физические характеристики источника AR 9608 и гало на $\lambda = 3.2$ см

Источник	AR 9608 с гало	AR 9608 без гало	Гало
F , с.е.п.	14.65	9.31	16.47
F/F_0 , %	7.15	4.61	8.14
T_B , К	4.9×10^5	4.9×10^5	2.3×10^5
r , угл. мин.	1.08	0.86	5.34

Таблица 4. Физические характеристики исследуемых источников радиоизлучения Солнца на моменты синхронных уярчений на волне 3.21 см

UT	F , с.е.п.	F/F_0 , %	ΔF , с.е.п.	T_B , К	r , угл. сек	$\Delta(F/F_0)$, %	$\delta(F/F_0)$, %	Значимость
AR 9608 (с гало)								
08:38	15.76	7.77	0.84	4.6×10^5	69.31	0.42	0.13	3.2
AR 9608 (без гало)								
09:10	9.85	4.88	0.21	5.1×10^5	51.73	0.13	0.09	1.4
09:34	9.58	4.66	0.35	5.9×10^5	47.17	0.12	0.11	1
09:42	10.06	4.96	0.48	5.5×10^5	50.60	0.30	0.10	3
AR 9610								
08:38	4.96	2.46	0.94	—	—	0.47	0.04	11
09:10	5.67	2.81	0.79	—	—	0.41	0.08	5
09:34	4.87	2.37	0.55	4.5×10^4	≈ 122.5	0.21	0.05	4
09:50	4.89	2.42	0.38	—	—	0.18	0.06	3
AR 9606								
09:10	10.79	5.35	0.49	2.6×10^4	≈ 240.0	0.28	0.10	2.8
09:34	10.57	5.14	0.27	—	—	0.08	0.10	2.7
09:50	10.48	5.19	0.63	—	—	0.32	0.09	3.5
AR 9616								
08:38	4.50	2.23	0.52	6.8×10^4	95.79	0.26	0.04	6.5

F_0 по 16 записям Солнца на всем интервале наблюдений равна 1%. Средние относительные погрешности измерения F и абсолютные погрешности измерения относительных потоков (F/F_0) источников на $\lambda = 3.21$ см приведены в табл. 5.

Приведенные изменения относительных потоков источников солнечного радиоизлучения между соседними наблюдениями и значимость (табл. 4) подтверждают реальность явлений синхронных уярчений этих источников на определенные моменты наблюдений на волне 3.21 см.

Как показали результаты обработки наблюдений, проявление синхронности уярчений источни-

ков солнечного радиоизлучения на волнах 2.74 и 3.21 см имеет более сложный характер, чем на волнах 1.92, 2.24 см: иногда нарушается синхронность максимумов излучения источников, хотя при этом зарегистрировано увеличение потоков их излучения. Для демонстрации этого факта наиболее интересным представляется проанализировать динамику радиоизлучения источников AR 9610 и AR 9608 на интервале времени 09:42–10:30 UT. Максимум излучения AR 9610 примерно на 8 мин запаздывает относительно максимума всплеска в мягком рентгене ($\sim 09:50$ UT), и напротив, максимум радиоизлучения AR 9608 (без гало) достигается на 8 мин раньше максимума всплеска в мягком рентгене и приходится на момент 09:42 UT (рис. 6).

Примерно такая же ситуация наблюдается на волне $\lambda = 2.74$ см. Моменты синхронных уярчений совпадают со всплесками класса C9.7, C3.3 в мягком рентгене ($\approx 9:34$ UT, $\approx 9:50$ UT). К сожалению, координаты этих всплесков в мягком рентгене неизвестны. Сопоставляя моменты начала или максимума уярчений на разных длинах волн (рис. 7 и табл. 6) для источников AR 9608 и AR 9610, можно предположить, что первичный всплеск произошел в активной области AR 9608 на $\lambda \geq 3.21$ см. Исходя из этого представляется

Таблица 5. Средние абсолютные и относительные погрешности измерений потоков исследуемых источников на волне 3.21 см

Источник	F/F_0 , %	$\delta(F/F_0)$, %	$\varepsilon(F)$, %
AR 9610	2.34	0.07	2.64
AR 9608 (с гало)	7.35	0.15	1
AR 9608 (без гало)	4.61	0.08	1.45
AR 9616	1.57	0.05	2.68

возможным следующий сценарий взаимодействия AR 9608 и AR 9610. Всплеск начинается примерно в 9:26 UT в AR 9608 на волне $\lambda \geq 3.21$ см. Высокоэнергичные электроны ($E > 10$ кэВ), ускоренные во время всплеска во вспышечно-активной области AR 9608, перемещаются в AR 9610 по магнитным петлям, соединяющим обе активные области (рис. 8), и вызывают повышение интенсивности радиоизлучения источника AR 9610 на $\lambda = 1.92$ см.

На волне 2.24 см, по-видимому, уже работают два механизма: действие высокоэнергичных электронов, перемещающихся по магнитным петлям, соединяющим две активные области, и влияние волновых фронтов, которые также возникают в области первичного всплеска. Вероятно, что на короткой волне 1.92 см преобладает действие высокоэнергичных электронов. На более длинных волнах 2.74 и 3.21 см, где диссипация волновых фронтов меньше, вторичное уярчение, первоначально инициированное действием высокоэнергичных электронов, значительно усиливается волновыми фронтами. Так как скорость волновых фронтов меньше скорости высокоэнергичных электронов, то момент максимума вторичных уярчений в AR 9610 на более длинных волнах 2.74 и 3.21 см наступит позже, чем на волне 1.92 см (рис. 7б и табл. 6).

Похожее смещение максимумов синхронных уярчений наблюдалось с 9:02 UT ($\lambda = 1.92$, 2.24 см) на момент 9:10 UT ($\lambda = 2.74$, 3.21 см) в источниках AR 9608 (с гало и без гало), AR 9610, AR 9616. К сожалению, в данном случае мы не можем определить место первичного всплеска, но, вероятно, это смещение также обусловлено усилением уярчений волновыми фронтами, которые распространяются вслед за ускоренными электронами.

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОТОКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ГАЛО AR 9608 НА ВОЛНАХ 1.92, 2.24, 2.74, 3.21 см

Выделенный источник гало — магнитосфера активной области — (рис. 3а) был отождествлен со всей протяженной областью AR 9608, исключая основной, наиболее мощный источник радиоизлучения этой активной области. В наших измерениях пространственные размеры гало близки к размерам активной области AR 9608 (≈ 5.7 угл. мин). Полученные яркостные температуры в диапазоне 1.92–3.21 см равны 6.3×10^3 – 2.2×10^4 К. Спектр потока гало практически плоский (5.4–8.2 с.е.п). Таким образом, выделенный источник имеет параметры, характерные для гало.

Динамика изменения относительных потоков гало на волне 1.92 см близка к динамике на волне

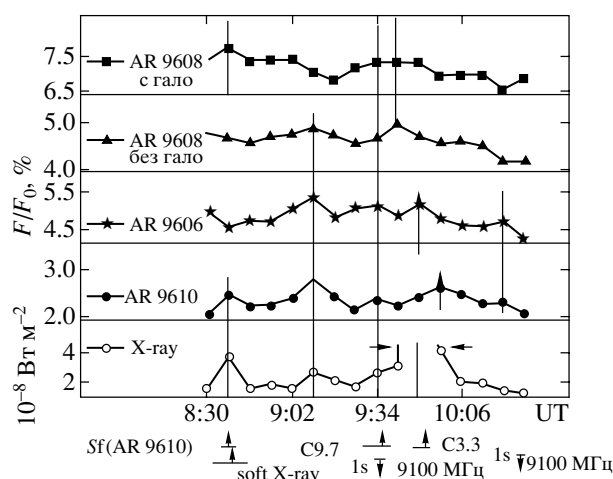


Рис. 6. Временные вариации относительных потоков источников AR 9608, AR 9610, AR 9606 на волне 3.21 см и интенсивности мягкого рентгеновского излучения (GOES 8 и GOES 10, 0.5–4.0 Å) на моменты наблюдения Солнца на ПАТАН-600.

2.24 см, а динамика на волне 2.74 см подобна динамике на волне 3.21 см. Однако в излучении гало на волнах 3.21 и на 2.24 см такого подобия нет (рис. 9а).

Во время $H\alpha$ -вспышки в AR 9610 (08:38 UT) момент максимума излучения гало на волнах 2.74 и 3.21 см совпадает с моментом максимума синхронного уярчения источников AR 9608 и AR 9610. В случае всплесков в радио- и рентгеновском диапазонах (1s, C9.7, C3.3) на промежутке времени 09:33–09:55 UT момент максимума излучения гало на волнах 2.74 и 3.21 см опережает моменты максимумов радиоизлучений AR 9608, AR 9610 и

Таблица 6. Моменты начала и максимума повышений относительных потоков AR 9608 и AR 9610, зарегистрированные на волнах 1.92, 2.24, 2.74, 3.21 см

Длина волны, см	Момент начала уярчения, UT		Момент максимума уярчения, UT	
	AR 9608	AR 9610	AR 9608	AR 9610
1.92	9:26	9:26	9:50	9:42, 9:50
2.24	9:34	9:42	9:50	9:50
2.24 (без гало)	9:34	9:34	9:34, 9:50	9:34, 9:50
2.74	9:34	9:42	9:42	9:58
3.21	9:26	9:34, 9:50	9:42	9:34, 9:58
3.21 (без гало)	9:34	9:34	9:42	9:42

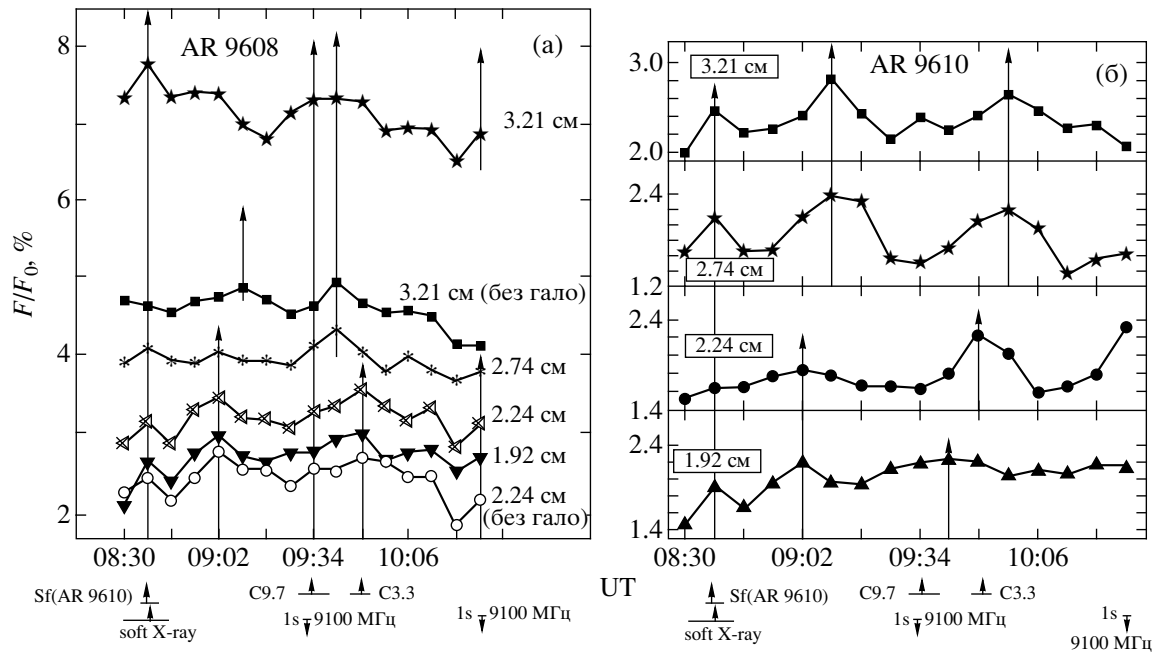


Рис. 7. (а) — Временные вариации относительных потоков радиоизлучения AR 9608 на волнах 1.92, 2.24, 2.74, 3.21 см; (б) — то же для AR 9610.

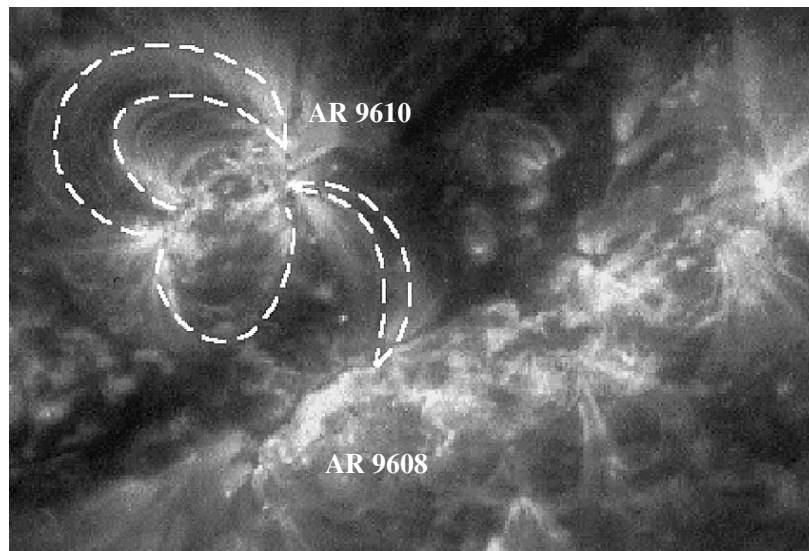


Рис. 8. Фрагмент изображения активных областей AR 9610 и AR 9608 в линии FeIX (11 сентября 2001 г., SOHO).

AR 9606 (рис. 9а). Последнее указывает на то, что, вероятно, местом первичных всплесков на интервале времени 09:33–09:55 UT является активная область AR 9608. Противоположное наблюдается на более коротких длинах волн 1.92 и 2.24 см, на которых момент максимума излучения гало AR 9608 наступает позже синхронного уярчения источника AR 9608 (рис. 7а, 9а). Запаздывание момента максимума излучения гало на более коротких волнах также подтверждает наше предположение о том,

что процесс, вызывающий уярчение, начинается на $\lambda > 3.21$ см.

Примерно такая же ситуация наблюдается и во время следующего всплеска типа 1s (9100 МГц) на интервале времени 10:27.5–10:28.3–10:29.5 UT. Последнее указывает на то, что местом первичного всплеска является также активная область AR 9608 на $\lambda \geq 3.21$ см.

Следует отметить тот факт, что по данным наших измерений динамика излучения гало (в отличие

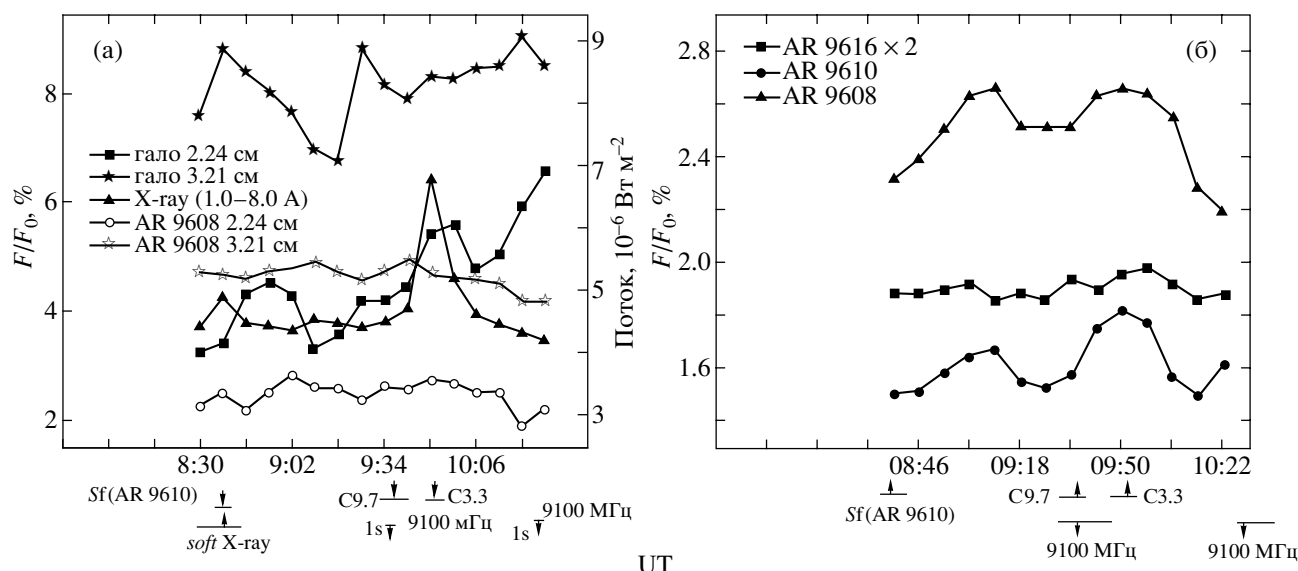


Рис. 9. (а) — Временные вариации относительных потоков гало, AR 9608 и AR 9610 (после выделения гало) на волнах 3.21 и 2.24 см и рентгеновского излучения (GOES 8, GOES 10, 1.0–8.0 Å) на моменты наблюдений на ПАТАН-600. (б) — временные вариации относительных потоков исследуемых источников на $\lambda = 2.24$ см после сглаживания скользящим средним по трем точкам.

от динамики излучения приведенных источников радиоизлучения Солнца) в основном не совпадает с динамикой излучения Солнца в мягком рентгене (рис. 9а).

КРУПНОМАСШТАБНАЯ ВРЕМЕННАЯ КОМПОНЕНТА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОТОКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ

Для выявления существования крупномасштабной компоненты динамики радиоизлучения источников AR 9608, AR 9610, AR 9606, AR 9616 исследовалась линейная корреляция величин их относительных потоков на всем интервале наблюдений (8:30–10:30 UT) (Голубчина, 1995). Для корректного выявления крупномасштабных во времени изменений потоков радиоизлучения источников была выполнена процедура линейного сглаживания скользящим средним по трем точкам (рис. 9б). Вычисленные значения коэффициентов линейной корреляции по N/m независимым точкам (N — общее количество точек ряда до сглаживания, m — количество точек, по которым выполнялось сглаживание скользящим средним) и соответствующие уровни значимости, которые оценивались в рамках статистики малых выборок Фишера (Романовский, 1939), указывают на значимую линейную корреляцию радиоизлучений активных областей AR 9610 и AR 9608; AR 9616 и AR 9610; AR 9608 и AR 9616 на волне 2.24 см (табл. 7). Последнее свидетельствует о взаимосвязи активных процессов в этих источниках на всем интервале наблюдений

на волне 2.24 см. Определена значимая линейная корреляция радиоизлучения AR 9610 и AR 9608 также и на волне наблюдения 1.92 см (табл. 8). Взаимодействие активных областей не только в моменты всплесков и всплесков, но и в периоды их отсутствия подтверждает существование крупномасштабной временной компоненты динамики изменения потоков радиоизлучения источников на Солнце (Голубчина, 1995, 1999).

Иначе обстоит дело при исследовании линейной корреляции крупномасштабных временных изменений потоков источников солнечного радиоизлучения на волнах 2.74 и 3.21 см. На волне 2.74 см линейная корреляция изменений потоков радиоизлучения AR 9608, AR 9610 и AR 9606 отсутствует как до, так и после выполнения процедуры сглаживания. На волне 3.21 см линейная корреляция крупномасштабных временных изменений потоков источников солнечного радиоизлучения значима только для источников, отождествленных с активными областями AR 9608 (без гало) и AR 9606 (табл. 8).

Таким образом, динамика изменения потоков радиоизлучения источников на интервале двух часов наблюдений на волнах 2.24, 1.92 см существенно отличается от динамики изменения радиоизлучения источников на волнах 2.74 и 3.21 см.

Низкая линейная корреляция крупномасштабных временных изменений потоков источников, с одной стороны, может быть обусловлена отсутствием заметных взаимодействий источников в интервалы времени, свободные от всплесков и всплесков. С другой стороны, возможные смещения по

Таблица 7. Значения вычисленных коэффициентов линейной корреляции (ρ_0) относительных потоков источников солнечного радиоизлучения и их значимостей (P) по наблюдениям на волне 2.24 см

Коэффициент	До выделения гало		После выделения гало	
	ρ_0	P	ρ_0	P
ρ_{34}	0.42	0.05	0.36	0.09
$\rho_{с34}$	0.90	0.02	0.84	0.04
ρ_{32}	0.49	0.05	0.54	0.02
$\rho_{с32}$	0.93	0.01	0.97	<0.01
$\rho_{с42}$	0.80	0.06	0.79	0.06

Примечание. Здесь и в табл. 8 ρ_0 — значение вычисленного коэффициента линейной корреляции, P — значимость вычисленного коэффициента корреляции, ρ и ρ_c — коэффициенты линейной корреляции потоков радиоизлучения источников соответственно до и после выполнения процедуры сглаживания скользящим средним; нижние индексы значений коэффициентов корреляции ρ соответствуют следующим номерам активных областей на фотосфере Солнца: 2 — AR 9616; 3 — AR 9610; 4 — AR 9608; 6 — AR 9606.

Таблица 8. Значения вычисленных коэффициентов линейной корреляции (ρ_0) относительных потоков радиоизлучения источников и их значимостей (P) по наблюдениям на волнах 1.92 и 3.21 см до и после выполнения процедуры сглаживания скользящим средним по трем точкам

Коэффициент	До сглаживания		После сглаживания	
	ρ_0	P	ρ_0	P
ρ_{34}	$\lambda = 1.92$ см			
	0.62	<0.01	0.92	0.01
ρ_{64} (без гало)	$\lambda = 3.21$ см			
	0.65	<0.01	0.84	0.04

времени активности одного источника относительно другого могут замыкать линейную корреляцию крупномасштабных временных изменений потоков радиоизлучения источников на этих волнах. Поэтому выявленные смещения максимумов уярчений AR 9608 и AR 9610 на 2.74 и 3.21 см, уменьшают значение коэффициента линейной корреляции относительных потоков этих источников.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зарегистрированные синхронные уярчения радиоизлучения AR 9608 и AR 9610 на волнах 1.92 и 2.24 см, указывают на существование тесной связи этих источников, удаленных друг от друга на расстояние $\sim 2 \times 10^5$ км. Полученные коэффициенты линейной корреляции $\rho_c = 0.84-0.92$ на волнах 2.24 и 1.92 см подтверждают значимую линейную корреляцию потоков радиоизлучения AR 9608 и AR 9610. Тем самым подтверждается реальность взаимосвязи этих активных областей не только в моменты всплесков и всплесков, но и на всем интервале наблюдений. Значимая линейная корреляция $\rho_c = 0.65-0.84$ изменения потоков радиоизлучения AR 9606 и AR 9608, удаленных друг от друга на расстояние 3.9×10^5 км, также свидетельствуют о взаимосвязи этих активных областей на волне 3.21 см не только в моменты всплесков и всплесков, но и в их отсутствии.

Таким образом, выявлена корреляция крупномасштабных временных компонент динамики изменений потоков радиоизлучения активных областей AR 9608 и AR 9610 на волнах 1.92 и 2.24 см, а также AR 9606 и AR 9608 на волне 3.21 см. Полученные результаты согласуются с выводами, приведенными в работах Голубчиной (1995, 1999). Полетто и др. (1993) по наблюдениям в рентгеновском диапазоне также указали на взаимное влияние двух активных областей не только во время всплесков, но и в их отсутствии.

В работах Уайлда и др. (1968), Ерохина и др. (1974), Кунду и др. (1984), Накаджима и др. (1985), Симнетта и др. (1989), Полетто и др. (1993), Ханаоки (1997) рассмотрены возможные триггерные механизмы симпатических всплесков и всплесков: корпускулярные потоки, волны Мортон, ударные волны, медленные моды ударных волн, альвеновские волны, проводящие фронты с тепловыми скоростями горячей плазмы, EIT-волны (Extreme Ultraviolet Imaging Telescope), высокоэнергичные частицы (ускоренные электроны с нетепловыми скоростями), эффект “плазменного эха”. Как известно, одним из критериев выбора механизма симпатических всплесков является время запаздывания начала вторичного всплеска относительно начала удаленного от него первичного всплеска. Очевидно, что для таких оценок необходимо высокое (порядка секунд) временное разрешение радиотелескопа. Мы можем оценить лишь пределы скорости возмущающего агента, вызывающего вторичное уярчение в локальном источнике, удаленном относительно места первичных всплесков или всплесков.

Как было сказано выше, если синхронные уярчения радиоизлучений AR 9608 и AR 9616 связаны с моментами начала или максимума $H\alpha$ -вспышки

(Sf) в AR 9610, то скорости возмущающего агента $V = 1.6 \times 10^3$ км/с и $V \geq 10^4$ км/с соответственно. Такие значения скорости указывают на то, что возмущающим агентом могут быть как ударные волны, так и высокоэнергичные электроны, высвобождающиеся в процессе вспышки в AR 9610 и перемещающиеся вдоль магнитных силовых линий, соединяющих эти активные области.

Сравнение моментов начала уярчений взаимодействующих областей AR 9608 и AR 9610 на интервале времени 9:26–9:58 UT свидетельствует о том, что на этом интервале времени лидирующей группой в проявлении активных процессов является AR 9608. Кроме того, обнаруженное опережение резкого роста потока гало на волнах 2.74 и 3.21 см относительно того же явления на волнах 1.92 и 2.24 см указывает на то, что на интервале времени ~09:26–09:58 UT активные процессы, вызывающие уярчения источников солнечного радиоизлучения, начинаются в AR 9608 на волнах ≥ 3.21 см. Согласно результатам обработки наблюдений синхронность изменения относительных потоков радиоизлучения AR 9608 и AR 9610 на промежутке времени 09:26–09:58 UT на волнах 2.74 и 3.21 см нарушается. Это, вероятно, обусловлено запаздыванием на 7–11 мин моментов максимума радиоизлучения AR 9610 относительно соответствующего максимума излучения AR 9608 на волнах 2.74 и 3.21 см.

В этом случае в силу низкого временного разрешения РАТАН-600 (8 мин) мы можем оценить лишь нижнюю границу скорости возмущающего агента, которая оказалась равной $V = (3-7) \times 10^2$ км/с. Вероятно, что в рассматриваемом случае на волнах 2.74 и 3.21 см волновой фронт, распространяющийся от места первичного всплеска в AR 9608, усиливает синхронное уярчение AR 9610, ранее возникшее под воздействием высокоэнергичных электронов, вырвавшихся в процессе первичного всплеска в AR 9608 и переместившихся в AR 9610 по магнитным петлям, соединяющим эти активные области. Косвенным подтверждением действия высокоэнергичных электронов в качестве триггерного механизма рассматриваемых вторичных уярчений являются всплески III и V типа, зарегистрированные службами Солнца на интервале времени 8:59–9:38 UT. Кроме того, на изображении Солнца в линии железа (FeIX) отчетливо видны петли, соединяющие активные области AR 9610 и AR 9608 в месте расположения самого крупного пятна AR 9608 (рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружены синхронные повышения относительных потоков источников солнечного радиоизлучения, удаленных друг от друга на значительные расстояния вплоть до 10^6 км.

Получены оценки скорости возмущающего агента от $V = 0.3 \times 10^3$ км/с до $V \geq 10^4$ км/с. Такие скорости указывают на то, что триггерным механизмом синхронных уярчений источников солнечного радиоизлучения могут быть как волновые фронты, так и высокоэнергичные электроны, высвобождающиеся в процессе первичной вспышки.

Результаты исследования радиоизлучения Солнца на РАТАН-600 на четырех волнах сантиметрового диапазона (1.92, 2.24, 2.74, 3.21 см) на интервале времени 09:26–09:58 UT показали, что на более коротких волнах (1.92 с и 2.24 см) в качестве триггерного механизма преобладает действие высокоэнергичных электронов, вырвавшихся из места первичного всплеска и переместившихся в место вторичного уярчения по магнитным петлям, соединяющим эти активные области. На более длинных волнах (2.74 и 3.21 см) вслед за ускоренными электронами распространяются волновые фронты, нижняя граница скорости которых $V = (3-7) \times 10^2$ км/с. Они усиливают синхронное уярчение, возникшее ранее под воздействием высокоэнергичных электронов.

Таким образом, наблюдение радиоизлучения Солнца 11.09.2001 г. на РАТАН-600 на четырех волнах сантиметрового диапазона (1.92, 2.24, 2.74, 3.21 см) подтвердило ранее полученный вывод о том, что синхронные уярчения источников солнечного радиоизлучения, а следовательно, и симпатические вспышки и всплески не являются экзотическими событиями (Голубчина, 1999). Это наблюдение также показало проявление двух различных механизмов синхронных уярчений источников в узком спектральном диапазоне микроволнового излучения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 02-02-16430, 03-02-06714).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиссандракис и др. (C.E. Alissandrakis, G.B. Gelfreikh, V.N. Borovik, *et al.*), *Astron. Astrophys.* **270**, 509 (1993).
2. Богод В.М., Тохчукова С.Х., Письма в Астрон. журн. **29**, 3 (2003).
3. Богод и др. (V.M. Bogod, V.I. Garaimov, N.P. Komar, and A.N. Korzhavin), *Proc. 9th European Meeting on Solar Physics, Magnetic Fields and Solar Processes* (Florence, Italy, 12–18 September, 1999, ESA SP-448, December, 1999).
4. Гараимов В.И., *Препринт № 127* (САО РАН, 1997).
5. Голубчина (O.A. Golubchina), *Solar Phys.* **160**, 199 (1995).
6. Голубчина О.А., *Кинем. и физика небесных тел* **15**, 59 (1999).
7. Голубчина О.А., *Тр. ГАИШ* **71**, 16 (2001).

8. Голубчина (O.A. Golubchina), *Proc. SOHO 11 Symp., From Solar Min to Max: Half a Solar Cycle with SOHO* (Davos, Switzerland, 11–15 March, 2002, ESA SP-508, 2002).
9. Ерохин Н.С., Каплан С.А., Моисеев С.С., Астрон. журн. **51**, 890 (1974).
10. Кунду и др. (M.R. Kundu, M.E. Machado, F.T. Erskine, *et al.*), *Astron. Astrophys.* **132**, 241 (1984).
11. Накаджима и др. (N. Nakajima, B.R. Dennis, P. Hoyn, *et al.*), *Astrophys. J.* **2**, 806 (1985).
12. Полетто (G. Poletto, G.A. Gary, and M.E. Machado), *Solar Phys.* **144**, 113 (1993).
13. Романовский В.И., *Элементарный курс математической статистики* (М.-Л.: Госпланиздат, 1939).
14. Симнетт и др. (G.M. Simnett, Z. Mouradian, M.-J. Martres, and I. Soru-Escant), *Astron. Astrophys.* **224**, 267 (1989).
15. Тейлор Дж., *Введение в теорию ошибок* (М.: Мир, 1985).
16. Тохчукова С.Х., *Препринт № 174* (САО РАН, 2002).
17. Уайлд и др. (J.P. Wild, K.V. Sheridan, and K. Kai), *Nature* **218**, 536 (1968).
18. Ханаока (Y. Hanaoka), *Solar Phys.* **173**, 319 (1997).

Сдано в набор 26.05.2004 г.	Подписано к печати 03.08.2004 г.	Формат бумаги 60 × 88 ¹ / ₈
Офсетная печать	Усл. печ. л. 10.0	Уч.-изд. л. 10.1
	Усл. кр.-отт. 1.5 тыс.	Бум. л. 5.0
	Тираж 141 экз.	Зак. 8711

Учредители: Российская академия наук, Институт космических исследований РАН

Адрес издателя: 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90
 Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”
 Отпечатано в ППП “Типография “Наука”, 121099 Москва, Шубинский пер., 6