

УДК 523.98

И. А. Будзиновская, Л. И. Цветков, Ю. Ф. Юровский

Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»  
98409 Крым, п. Научный**Динамика магнито-гидродинамических колебаний  
по наблюдениям солнечной активной области NOAA 0119  
в диапазоне длин волн  $\lambda\lambda = 2.0\text{—}107\text{ см}$** 

*Проведены наблюдения вариаций радиоизлучения активной области 23 сентября 2002 г. на семи длинах волн от 2.0 см до 107 см. С помощью вейвлет-анализа выяснено, что колебания интенсивности происходили во всем диапазоне длин волн. Фурье-спектр колебаний в диапазоне частот 1—5 мГц (периоды 200—1000 с) был не плоским и характеризовался уменьшением показателя спектра от величины  $p = -1.9$  на волнах 2.0—3.5 см до  $p = -0.8$  в метровом диапазоне волн 100—107 см. Вейвлет-спектры свидетельствуют о том, что в интервале времени приблизительно с 9:00 по 10:53 UT наибольшую амплитуду имели колебания с периодом около 970 с. Колебания с этим периодом на волнах от 2.0 до 107 см были коррелированными. Фаза колебаний имела систематические сдвиги противоположного знака на коротких и длинных волнах относительно граничной длины волны 10.5 см. Это рассматривается как признак возникновения возмущения на высоте генерации дм-излучения и его распространение одновременно и вверх, и вниз.*

*ДИНАМІКА МАГНІТО-ГІДРОДИНАМІЧНИХ КОЛИВАНЬ ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОЇ ОБЛАСТІ NOAA 0119 У ДІАПАЗОНІ ДОВЖИН ХВИЛЬ  $\lambda\lambda = 2.0\text{—}107\text{ см}$ , Будзиновська І. А., Цветков Л. І., Юровський Ю. Ф. — Проведено спостереження варіацій радіовипромінювання активної області 23 вересня 2002 р. на семи довжинах хвиль від 2.0 см до 107 см. За допомогою вейвлет-аналізу з'ясовано, що коливання інтенсивності відбувалися у всьому діапазоні довжин хвиль. Фур'є-спектр коливань у діапазоні частот 1—5 мГц (періоди 200—1000 с) був не плоским і характеризувався зменшенням показника спектра від величини  $p = -1.9$  на хвилях 2.0—3.5 см до  $p = -0.8$  у метровому діапазоні хвиль 100—107 см. Вейвлет-спектри свідчать про те, що в інтервалі часу приблизно з 9:00 до 10:53 UT найбільшу амплітуду мали коливання з періодом біля 970 с. Коливання з цим періодом на хвилях від 2.0 см до 107 см були корельованими. Фаза коливань мала систематичні зсуви протилежного знаку на коротких та довгих хвилях до граничної довжини хвилі 10.5 см. Це розглядається як ознака виникнення збурення на висоті генерації дм-випромінювання і його поширення одночасно нагору й вниз.*

*DYNAMICS OF MAGNETO-HYDRODYNAMICAL OSCILLATIONS FROM OBSERVATIONS OF THE SOLAR ACTIVE REGION NOAA 0119 OVER A RANGE OF WAVELENGTHS FROM 2.0 TO 107 CM, by Budzinovskaja I. A., Tsvetkov L. I., Yurovsky Yu. F. — Observations of variations of radio emission of active regions on 23 September 2002 at seven wavelengths from 2.0 cm up to 107 cm are carried out. It is found from the wavelet analysis that intensity fluctuations existed over the whole range of observed wavelengths. The Fourier spectrum of fluctuations over a range of frequencies 1–5 mHz (periods 200–1000 s) was not flat and was characterized by reduction of spectral index from  $p = -1.9$  at wavelengths 2.0–3.5 cm up to  $p = -0.8$  at metre range 100–107 cm. Wavelet spectra testify that during time interval from 9:00 to 10:53 UT the greatest oscillations have a period about 970 s. The oscillations with this period were correlated at all the waves from 2.0 cm up to 107 cm. The phase of oscillations at short wavelength had systematic shifts of opposite sign relative to long waves with a boundary wavelength at 10.5 cm. This property is considered as an occurrence of disturbance at height of generation of dm-radiation and its propagation in the solar atmosphere simultaneously to upwards and downwards directions.*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В активных областях вблизи солнечных пятен наблюдаются колебания интенсивности излучения и вариации скорости с характерным периодом 2–5 мин [12]. Эти колебания заметны и в микроволновом диапазоне радиоволн [1]. Предполагается, что возникновение колебаний может быть связано с распространением акустических волн, которые изменяют либо напряженность магнитного поля, либо высоту переходного слоя и таким образом модулируют наблюдаемое радиоизлучение [11]. В таком случае можно ожидать возникновения взаимного запаздывания цугов колебаний на различных длинах волн. Это определило задачу данной работы: провести наблюдения солнечных активных областей на нескольких длинах волн и исследовать полученные записи с целью определения направления и скорости МГД-возмущений в атмосфере Солнца.

Во втором разделе перечисляются технические характеристики радиотелескопов, с помощью которых проводились наблюдения. Поскольку ожидаемые колебания прерывистые, а не постоянные [9], то наиболее приемлемым методом их исследования является вейвлет-анализ [2] с помощью вейвлета Морле, при использовании которого связь периода и масштаба вейвлета, а также связь амплитуды и максимума линии точно такие же, как и для обычного фурье-преобразования [5].

В настоящее время в литературных источниках встречаются несколько отличающиеся друг от друга представления результатов вейвлет-анализа, поэтому в третьем разделе изложен принятый в данной работе способ вейвлет-преобразования.

В четвертом разделе приводится общая характеристика солнечной активности в течение интервала наблюдений. Результаты исследования записей радиоизлучения активной области NOAA 0119 за 23 сентября 2002 г. представлены в пятом разделе. Выбор этого дня обусловлен тем, что в этот день проводились согласованные наблюдения на РТ-22, малых солнечных радиотелескопах НИИ КрАО, на Сибирском солнечном радиотелескопе (ССРТ) и на радиотелескопе РАТАН-600.

В заключении обсуждаются результаты проведенного анализа наблюдений.

## 2. РАДИОТЕЛЕСКОПЫ И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

**Радиотелескопы**. Наблюдения на волнах  $\lambda\lambda = 2.0, 2.3$  и  $3.5$  см (интенсивность) проводились на радиотелескопе РТ-22 [3]. Ширина диаграммы направленности составляла  $3.6\text{—}6.0'$ , что сопоставимо с размерами локальных источников. Поэтому можно полагать, что излучение остальной части диска Солнца на этих волнах не влияло на наблюдавшиеся вариации интенсивности.

На волнах  $\lambda\lambda = 10.5$  и  $12.0$  см использовался радиотелескоп с диаметром параболической антенны  $3$  м. Ширина диаграммы направленности составляла около  $5^\circ$ , т. е. регистрировался «интегральный» поток от всего диска Солнца, и в него входили вариации интенсивности всех локальных источников. Подобная ситуация была и на волнах  $\lambda\lambda = 100$  и  $107$  см, на которых многодипольная антенна имела ширину диаграммы около  $11^\circ$ . Все перечисленные радиоприемные каналы имели независимые радиометры.

**Методика наблюдений.** На волнах  $\lambda\lambda = 2.0, 2.3, 3.5, 10.5$  и  $12$  см антенная температура после наведения радиотелескопа на выбранный источник компенсировалась с помощью шумового генератора, что давало возможность увеличить усиление радиометра без опасности «зашкала». Затем антенна включалась в режим сопровождения источника. На волнах  $\lambda\lambda = 100$  и  $107$  см компенсация фонового излучения не производилась.

**Источники погрешностей измерений.** Основные источники ошибок измерений — влияние земной тропосферы, погрешности сопровождения и шумы аппаратуры.

1. Известно, что земная атмосфера не полностью прозрачна на коротких волнах сантиметрового диапазона. Радиоволны отражаются от неоднородностей тропосферы с разной диэлектрической проницаемостью и частично поглощаются в облаках. Существенной особенностью тропосферного поглощения является синхронность вариаций интенсивности на разных длинах волн, что позволяет путем корреляционного анализа уменьшить их влияние на конечные результаты.

2. Погрешности сопровождения источника радиоизлучения особенно заметны на антенне РТ-22 в связи с ее узкой диаграммой направленности. Флюктуационные ошибки наведения антенны радиотелескопа при наблюдениях на РТ-22 НИИ КраО подробно изучены и опубликованы в работе [8]. Постепенное смещение источника с максимума диаграммы направленности приводило к образованию тренда на записи, который устранялся с помощью цифровой фильтрации данных.

3. Поскольку амплитуда колебаний интенсивности радиоисточника ожидалась маленькой, то измерения проводились при таком усилении радиометров, когда становились заметны собственные шумы аппаратуры. Применение независимых радиометров позволяло уменьшить влияние этих шумов при корреляционном анализе, так как они не коррелированы на разных длинах волн.

## 3. МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-СПЕКТРОВ

Вейвлет-преобразование вычисляется на дискретном множестве значений временного сдвига и масштабов вейвлета и образует матрицу, строки которой при использовании вейвлета Морле отражают изменение спектральной плотности со временем, а колонки являются спектром мощности в заданный момент времени. Результаты наблюдений интенсивности радиоизлучения Солнца в цифровой форме представляют собой на длине вейвлета  $D_w = N_w \cdot \Delta t$  дискретную функцию времени  $f(t_i)$ , состоящую из  $N_w$  отсчетов

(точек) в моменты  $t_i$ , равноудаленные на расстояние  $\Delta t$  друг от друга. Оценкой спектральной плотности средней мощности такого участка исходного процесса является периодограмма  $G(F)$ , определяемая как квадрат модуля комплексной спектральной функции  $|S(j2\pi F)|^2/D_w$  [7]:

$$G(F) = \frac{D_w}{\pi^2 N_w^2} \left\{ \left[ \sum_{i=1}^{N_w} f(t_i) \cos(2\pi F t_i) \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^{N_w} f(t_i) \sin(2\pi F t_i) \right]^2 \right\}$$

Вычисленные значения заносятся в узлы матрицы и образуют трехмерную поверхность в пространстве координат частота/время/спектральная плотность. Однако при некоторых исследованиях бывает удобнее вместо частоты  $F$  использовать значение периода  $P = 1/F$  (см., например, [5], [10]). Фактически вычисляется плотность спектра на частоте  $F$ , затем значение этой частоты переводится в соответствующий период  $P = 1/F$ , и вычисленная плотность  $G(F)$  приписывается этому периоду  $P$ . Для удобства сравнения наших результатов с результатами других авторов в данной работе вейвлет-спектр вычислялся по указанному принципу.

Поскольку целью данной работы являлось выявление колебаний в исследуемом сигнале, то в качестве базового вейвлета применялся рекомендованный для таких исследований в [5] вейвлет Морле,

$$w(t) = e^{-t^2/\alpha^2} e^{j2\pi t},$$

представляющий собой гармоническое колебание, промодулированное гауссианой с параметром  $\alpha^2 = 2$ . Так как в начале и в конце реализации часть вейвлета выходит за пределы массива данных, то вычисления проводились в области «треугольника достоверности» [2, 5], за пределами которого вейвлет-коэффициенты принимались равными нулю.

#### 4. РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 0119 В СМ-ДИАПАЗОНЕ

Наблюдения Солнца в НИИ КраО проводились в сентябре–октябре 2002 г. Регистрировалась полная интенсивность и поляризованная по кругу составляющая радиоизлучения. Производилось картографирование и слежение за радиоисточником в течение нескольких часов в день. Получено 78 радиоизображений Солнца на трех длинах волн.

Наблюдались четыре радиоисточника, связанные с группами пятен (см. таблицу). Для них были определены яркостные температуры, потоки излучения и спектральные индексы. Усредненная по источнику яркостная температура находилась по формуле [4]:

$$T_{\text{ярк}} = (T_a \lambda^2 / A \Omega_n) g,$$

где  $g = 1 + (\Omega_n / \Omega_a)^2$  — коэффициент, учитывающий соизмеримость угловых размеров диаграммы направленности антенны и источника,  $T_a$  — измерен-

#### Общие сведения об активных областях

Периоды наблюдений	Активная область	$I_{\text{max}}$ 3.5 см ( $T_0$ )	Всплески (да—нет)	Осцилляции с периодами
07.09.02—20.09.02	NOAA 0105	200	Да (10, 11.09)	3–50 <sup>m</sup> (13, 15.09)
15.09.02—30.09.02	NOAA 0119	160	Нет	2–40 <sup>m</sup> (20—25.09)
25.09.02—07.10.02	NOAA 0134	90	Да (28, 29, 30.09)	3–50 <sup>m</sup> (30.09, 01.10)
01.10.02—07.10.02	NOAA 0139	200	Да (04, 06.10)	3–16 <sup>m</sup> (04—07.10)

ная антенная температура,  $\lambda$  — длина волны,  $A$  — эффективная площадь антенны,  $\Omega_{\text{и}}$  и  $\Omega_{\text{а}}$  — телесные углы источника и диаграммы направленности.

За время наблюдений было зарегистрировано несколько всплесков микроволнового излучения, как импульсных, так и с постепенным возрастанием и спадом. Потоки всплесков определялись по формуле [6]

$$S_{\text{и}} = S_0(I_{\text{и}}/I_0)g,$$

где  $S_{\text{и}}$  и  $S_0$  — потоки от источника и спокойного Солнца,  $I_{\text{и}}$  и  $I_0$  — интенсивности источника и спокойного Солнца.

Величины спектральных индексов по потоку оценивались по формуле

$$\alpha_{\text{с}} = [\ln(S_1/S_2)] / [\ln(\lambda_1/\lambda_2)].$$

где  $S_1, S_2$  — потоки на различных длинах волн.

Для дальнейшего анализа использовались записи радиоизлучения активной области NOAA 0119. Интенсивность локального источника, связанного с этой областью, на волне  $\lambda = 3.5$  см была максимальной 21.09.02 и превышала на 60 % уровень спокойного Солнца, а 26.09.02 — минимальной. За время слежения (6:00—13:00 UT) с 21.09.02 по 25.09.02 всплесков в NOAA 0119 зарегистрировано не было, но вариации радиоизлучения имели место во все дни наблюдений (см. таблицу). Спектральный индекс радиоизлучения изменялся слабо (в пределах 1.4—1.2). Поток радиоизлучения уменьшался от 22 до  $16 \cdot 10^{-22}$  Вт/м<sup>2</sup>Гц, а после 23.09.2002 г. оставался на уровне  $(16—17) \cdot 10^{-22}$  Вт/м<sup>2</sup>Гц (рис. 1).

Рис. 1. Вариации потока активной области NOAA 0119 в сентябре 2002 г.

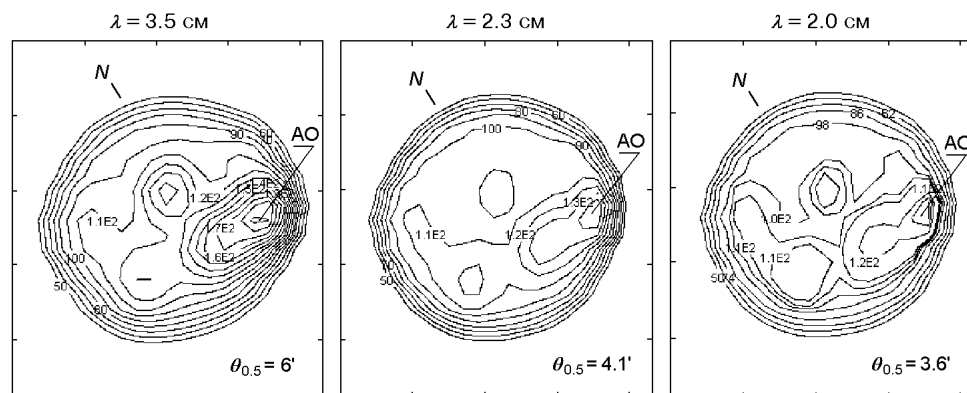
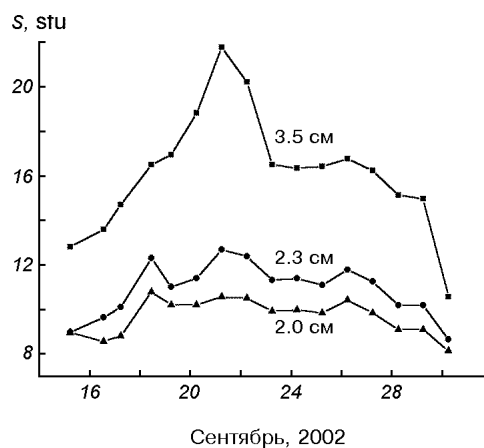


Рис. 2. Радиоизображения Солнца 23.09.02 в интенсивности на трех волнах

На рис. 2 представлены радиокарты Солнца в полной интенсивности на трех длинах волн. Северный полюс диска Солнца показан стрелкой. Изоуровни оцифрованы в процентах от уровня спокойного Солнца. 21.09.02 эта активная область имела левополяризованную составляющую радиоизлучения. Из рис. 2 следует, что 23.09.02 локальный источник активной области NOAA 0119 был самый мощный, поэтому можно предположить, что вариации потока радиоизлучения Солнца были обусловлены процессами в этой активной области. Следует заметить, что в этот день облачности не было.

##### 5. АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ 23 СЕНТЯБРЯ 2002 г.

В этот день радиотелескоп РТ-22 с 6:21 по 10:53 UT сопровождал область в *WS*-секторе диска Солнца. В этом месте находился локальный источник, связанный с активной областью NOAA 0119 (рис. 2). Исходные записи радиоизлучения содержали тренд, который мог быть частью низкочастотного колебания, не уместившегося на реализации. Поскольку информации о периоде и амплитуде такого колебания в данных нет, то тренд был удален (вычтен) путем фильтрации данных с помощью фильтра типа

$$Z(x) = \frac{\sin(Fx)}{2Fx} \left[ 1 + \cos\left(\frac{Fx}{6}\right) \right], \quad (0 < x < 3)$$

в диапазоне частот  $F$  от 0 до 0.28 мГц (периоды от  $P = \infty$  до  $P = 1$  ч).

Так как высокочастотные колебания нас в данном случае не интересовали, то для исключения случайных одиночных выбросов первоначальные записи были сглажены скользящим средним с эффективным окном 10 с. Записи, подготовленные таким способом для математической обработки,

показаны на рис. 3. На коротких сантиметровых волнах 2.0—3.5 см радиотелескоп РТ-22 имел ширину диаграммы направленности, сравнимую с размерами локального источника. Благодаря этому излучение остальной части диска Солнца исключалось из принимаемого сигнала и «контраст» колебаний интенсивности локального источника был повышенным по сравнению с наблюдениями «интегрального» потока на более длинных волнах 10—107 см.

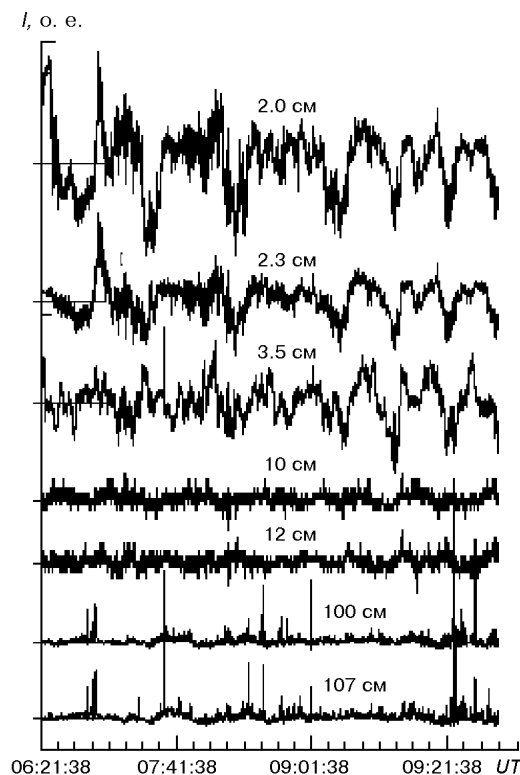


Рис. 3. Записи интенсивности  $I$  радиоизлучения Солнца после вычитания тренда

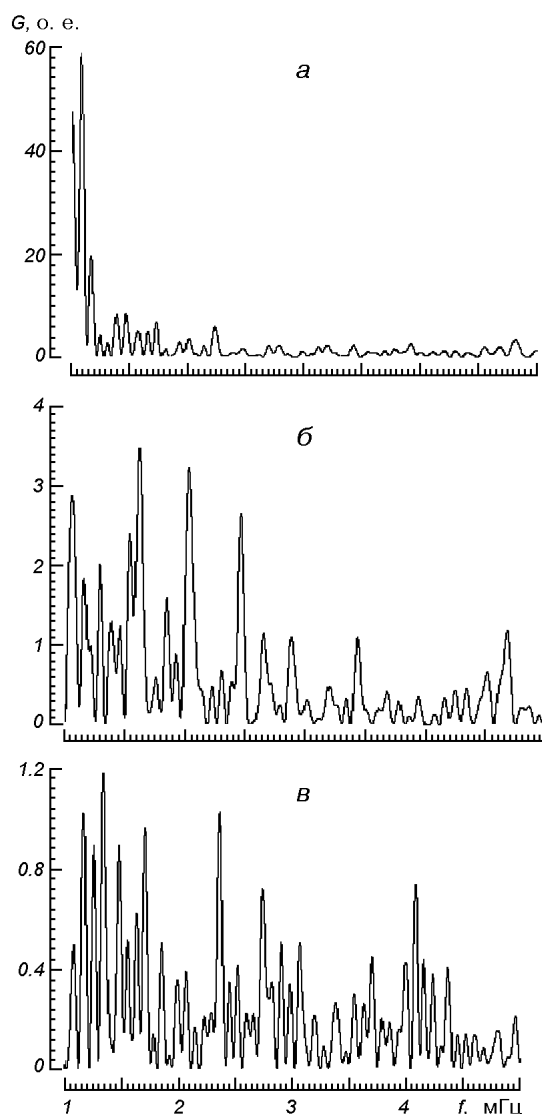


Рис. 4. Спектры Фурье (относительные единицы) в различных диапазонах длин волн

В первую очередь мы проверили, имеется ли на всем интервале наблюдений какой-либо доминирующий период колебаний. Для этого были вычислены стандартные спектры Фурье в диапазоне частот 1—5 мГц (периоды 200—1000 с). Обнаружилось, что показатель спектра изменяется от  $p = -1.9$  на волнах  $\lambda\lambda = 2.0\text{—}3.5$  см до  $p = -1.5$  на  $\lambda\lambda = 10\text{—}12$  см и уменьшается до  $p = -0.8$  в метровом диапазоне длин волн 100—107 см, т. е. на коротких волнах плотность спектра уменьшается с увеличением частоты быстрее, чем на длинных волнах (рис. 4). Однако обнаружить визуальным способом выделяющуюся на всех спектрах частоту колебаний оказалось затруднительно, возможно, из-за их прерывистости на длине реализации, которая не выявляется стандартным фурье-преобразованием. Поэтому далее для выяснения степени связи спектров на разных длинах волн были вычислены вейвлет-спектры записей и определена их взаимная корреляция.

Вейвлет-анализ записей был выполнен в диапазоне периодов 60—1200 с (1—20 мин). На рис. 5, а, б, в приведены примеры вычисленных вейвлет-

спектров для трех различных диапазонов длин волн. Можно заметить, что в диапазонах  $\lambda\lambda = 2.0\text{—}3.5$  см и  $\lambda\lambda = 10\text{—}12$  см спектры имеют много общего. В обоих диапазонах наибольшая спектральная плотность наблюдалась в конце интервала наблюдений (рис. 5, а, б). Эти максимумы колебаний наблюдались на частоте приблизительно 1 мГц (период около 970 с или 16 мин). В длинноволновом диапазоне  $\lambda\lambda = 100\text{—}107$  см максимум колебаний с этим периодом в конце наблюдений выражен не столь отчетливо из-за того, что в этом диапазоне колебания начались позднее, чем на сантиметровых волнах, и в результате были ограничены (обрезаны) «треугольником достоверности» (рис. 5, в).

Таким образом, вейвлет-анализ дал дополнительные сведения о характере изучаемых процессов, отсутствующие из-за усреднения по времени на фурье-спектре.

Вейвлет-анализ позволяет определить время возникновения наибольшей спектральной плотности колебаний и частоту этих колебаний для одного набора данных, а для объективной оценки степени связи двух вейвлет-спектров, полученных по данным на различных длинах волн, была вычислена взаимная корреляция всех пар этих спектров.

Вейвлет-спектр представляет собой матрицу, состоящую из  $s$  строк и  $k$  колонок и содержащую  $sk$  узлов. В каждом узле матрицы (на пересечении строки и колонки) записана плотность спектра, т. е. мощность колебаний, приходящаяся на единичную полосу частот. Узлы, расположенные вдоль колонки, представляют собой текущий спектр в заданный момент времени. Вдоль строк откладывается текущее время. Если выделить одну строку, сместить ее копию на время  $\tau$ , то можно вычислить корреляцию между этой строкой и ее смещенной копией. Изменяя  $\tau'$  в пределах  $-\tau < \tau' < +\tau$ , получим

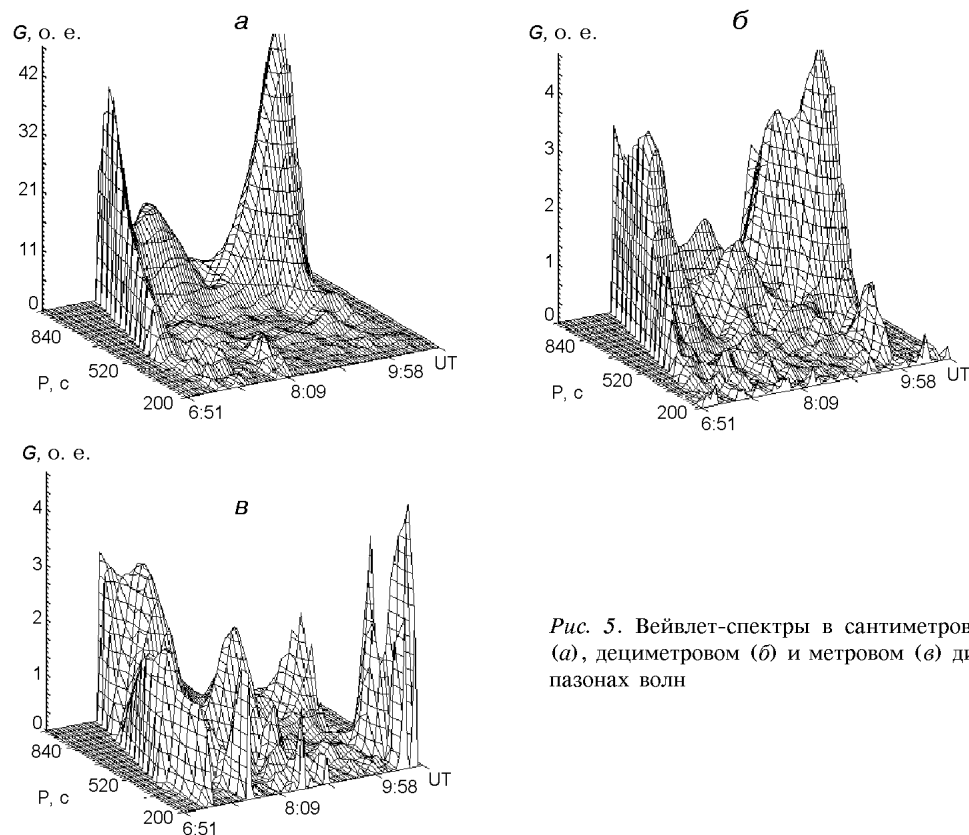


Рис. 5. Вейвлет-спектры в сантиметровом (а), дециметровом (б) и метровом (в) диапазонах волн



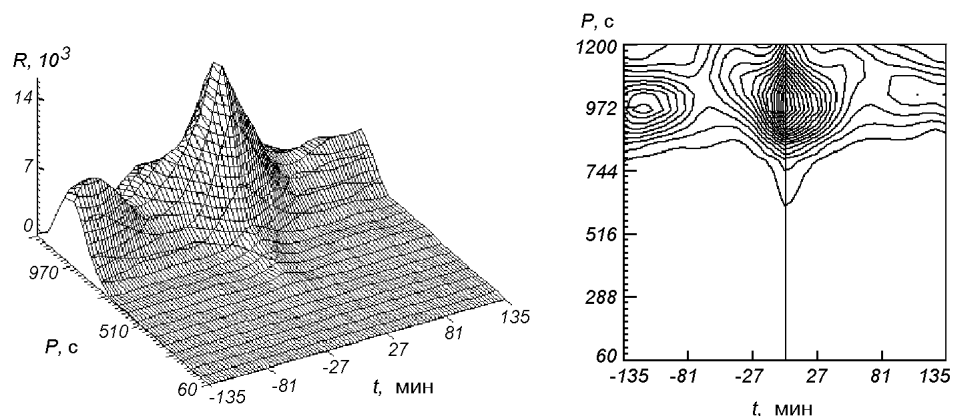


Рис. 6. Взаимная корреляция вейвлет-спектров на волнах  $\lambda\lambda = 2.0$  и  $2.3$  см (поверхность и ее топография)

функцию автокорреляции выделенной строки. После перебора всех строк получится поверхность, изображающая поведение функции автокорреляции при изменении частоты. Если строки с одинаковым масштабом вейвлета выбирать из двух различных вейвлет-спектров, то получится поверхность взаимной корреляции этих вейвлет-спектров.

Вычисленная описанным способом взаимная корреляция вейвлет-спектров на волнах  $\lambda\lambda = 2.0$  и  $2.3$  см имеет выделяющийся максимум корреляции колебаний с периодом около  $970$  с (рис. 6) при «нулевом» сдвиге  $\tau = 0$  (с точностью до временного разрешения вейвлета).

Вычисление 21 взаимной корреляции спектров для всех пар длин волн показало, что подобный максимум наблюдается в большинстве случаев даже при значительной разнице длин волн. Поэтому далее исследуются колебания с периодом  $970$  с ( $16$  мин), происходившие во второй половине интервала наблюдений с  $9:00$  до  $10:53$  UT.

Эти колебания с периодом  $970$  с были выделены из первоначальных записей с помощью цифрового фильтра с эквивалентной добротностью  $Q = 2$ . Результат показан на рис. 7. Можно заметить, что колебания на разных длинах волн несколько смещены по фазе друг относительно друга. Численную оценку этого сдвига мы производили по положению мак-

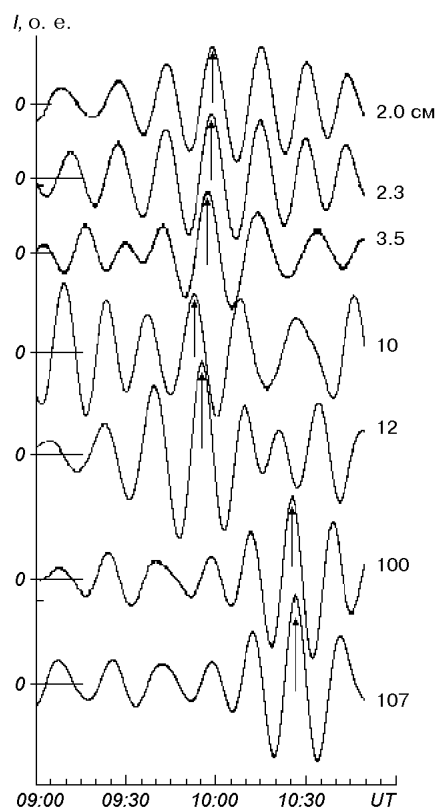


Рис. 7. Колебания с периодом  $970$  с в интервале  $9:00$ — $10:53$  UT

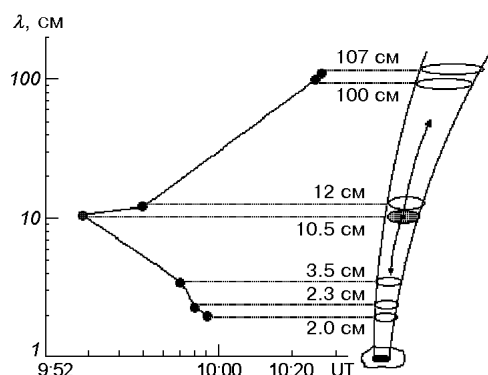


Рис. 8. Зависимость моментов появления максимумов от длины волны

симумов каждой кривой, отмеченных на рис. 7 стрелками. Для этого кривые были построены в более подробном масштабе. Смещение кривых по оси времени свидетельствует о том, что обсуждаемые колебания не являются ни тропосферными флуктуациями, ни ошибками системы сопровождения радиотелескопа РТ-22, так в этих случаях сдвиг по времени должен был бы отсутствовать. Моменты появления максимумов имеют определенную закономерность, которая выявляется при их изображении в координатах время—длина волны (рис. 8). В диапазоне волн  $\lambda = 2.0—10.5$  см максимумы наступают позже на более короткой длине волны. Так как высота расположения радиоисточников увеличивается с длиной волны наблюдений, то запаздывание максимумов на более коротких волнах можно рассматривать как свидетельство движения возмущения, вызывающего модуляцию интенсивности, вниз в сторону фотосферы. Однако в диапазоне более длинных волн  $\lambda = 10.5—107$  см знак запаздывания между максимумами на соседних длинах волн изменяется на противоположный. В таком случае можно предполагать, что возмущение перемещается вверх в более высокие слои короны. Длина волны  $\lambda = 10.5$  см получается граничной, разделяющей два противоположных направления движения возмущения. Схематически эта ситуация изображена в правой части рис. 8 в виде эскиза без соблюдения масштаба.

По-видимому, возникновение возмущения на высоте генерации дм-излучения и его распространение одновременно и вверх, и вниз не является исключительным событием. Например, подобное поведение частотного дрейфа наблюдалось на VLA на волнах 20, 91 и 400 см [13]. В одном случае излучение на 400 см запаздывало относительно 20 и 91 см на 10 мин (распространение вверх), в другом случае на 91 см всплеск был раньше, чем на 20 см (распространение в сторону фотосферы).

## 6. ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ наблюдений радиоизлучения активной области 23 сентября 2002 г. позволяет сделать следующие выводы.

1. Колебания интенсивности радиоизлучения Солнца происходили во всем диапазоне длин волн наблюдений от 2.0 до 107 см.

2. Фурье-спектр колебаний в диапазоне частот 1—5 мГц (периоды 200—1000 с) был не плоским, характеризовался монотонным уменьшением показателя спектра от  $p = -1.9$  на волнах  $\lambda = 2.0—3.5$  см до  $p = -0.8$  в метровом диапазоне волн 100—107 см.

3. Вейвлет-спектры свидетельствуют о том, что в интервале времени приблизительно с 9:00 по 10:53 UT наибольшую амплитуду имели колебания с периодом около 970 с.

4. Колебания с этим периодом на волнах от 2.0 см до 107 см были коррелированными.

5. Фаза колебаний на коротких и длинных волнах имела систематические сдвиги противоположного знака относительно граничной длины волны  $\lambda = 10.5$  см.

Работа поддержана грантом ИНТАС 00-543.

1. *Абраменко В. И., Цветков Л. И.* Трехминутные колебания поляризованного радиоизлучения локальных источников на Солнце // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1985.—73.—С. 53—62.
2. *Астафьева Н. М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук.—1996.—166, № 11.—С. 1145—1170.
3. *Баранов Н. И., Миронов М. А., Никитин П. С., Цветков Л. И.* Модернизированный поляриметрический комплекс сантиметровых волн и его применение для наблюдений радиоизлучения Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 1.—С. 89.
4. *Бачурин А. Ф., Дворяшин А. С., Ерюшев Н. Н., Цветков Л. И.* Связь изменений радиояркости Солнца с холмами магнитного поля и флоккулами в период минимума солнечной активности // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1981.—64.—С. 152—162.
5. *Витязев В. В.* Вейвлет-анализ временных рядов: Учебн. пособие. — С-ПБ.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2001.—58 с.
6. *Грант Ф. Д., Цветков Л. И.* Наблюдения солнечных активных областей и всплесков на волнах 3.5; 2.8; 2.25 и 1.95 см // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1993.—88.—С. 85—96.
7. *Тихонов В. И.* Статистическая радиотехника. — М.: Радио и связь, 1982.—624 с.
8. *Цветков Л. И.* Когерентные колебания в радиоизлучении спокойного Солнца, методика и результаты наблюдений 1977—1980 гг. // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1983.—67.—С. 118—131.
9. *Gelfreikh G. B., Grechnev V. V., Kosugi T., Shibasaki K.* Detection of Periodic Oscillations in Sunspot-Associated Radio Sources // Solar Phys.—1999.—185, N 1.—P. 177—191.
10. *Marsh M. S., Walsh R. W., Bromage B. J. I.* A wavelet analysis of quasi-periodic variability across a solar coronal hole region // Astron. and Astrophys.—2002.—393, N 3.—P. 649—659.
11. *Nindos A., Alissandrakis C. E., Gelfreikh G. B., et al.* Spatially resolved microwave oscillations above a sunspot // Astron. and Astrophys.—2002.—386, N 2.—P. 658—673.
12. *Thomas J. H., Lites B. W., Gurman J. B., Ladd E. F.* Simultaneous measurements of sunspot umbral oscillations in the photosphere, chromosphere, and transition region // Astrophys. J.—1987.—312, N 1.—P. 457—461.
13. *Willson R. F.* VLA observations of evolving type I noise storms and nonthermal bursts in association with flares and coronal mass ejections // Solar Phys.—2002.—211, N 2.—P. 289—313.

Поступила в редакцию 08.10.03