

# ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ФЛУКТУАЦИИ ПОТОКА ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ S-КОМПОНЕНТЫ СОЛНЕЧНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

## I. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 4 СМ

*Л. А. Пустильник, Н. П. Стасюк*

Приведены результаты обработки записей флуктуаций солнечного сантиметрового радиоизлучения за 19 дней наблюдений в период май—июль 1969 г. Показаны преимущества метода радиоинтерферометра с малой базой для регистрации малых изменений солнечного радиопотока при длительных наблюдениях. Подробно анализируются возможные ошибки при регистрации сигнала, и показывается достоверность получаемых результатов. При обработке записей применялся автокорреляционный и спектральный анализ. Описано семь примеров детального анализа и сопоставлений результатов обработки записей флуктуаций радиоизлучения с наблюдениями в оптическом диапазоне волн. Обработка и анализ позволили получить: 1) периоды гармонических составляющих от 180 до 4500 сек.; 2) выделяемые периодические составляющие образуют группы с кратными частотами гармоник; 3) амплитуды гармоник имеют значения  $I = 0.05\%$  от всего солнечного радиопотока; 4) амплитуда кратных гармоник падает по квадратичному закону с номером гармоники; 5) характеристики периодических флуктуаций в поляризованном излучении такие же, как и в неполяризованном, хотя амплитуды меньше; 6) наблюдается связь кратных гармоник с отдельными локальными источниками над группами солнечных пятен; 7) период основных гармоник пропорционален площади соответствующей группы пятен.

The paper presents the results of reduction of the records fluctuations of solar radio emission obtained in the centimeter range during a 19-day observational period (May — July, 1969). Advantages are shown of the use of a short—base radiointerferometer for recording small variations of the solar radio flux. A detailed analysis of possible errors in signal recording is described and the reliability of the obtained results is shown. In the reduction of the records the autocorrelation and spectral analyses have been used.

Seven examples of detailed analysis and comparison of record processing of radio emission fluctuations with the observations in the visible band are described. The following results are obtained: 1) the periods of the harmonic components are from 180 s to 4500 s; 2) the periodic components form a group with multiple harmonic frequencies; 3) the values of harmonic amplitudes are of 1—0.05 percent of the integrated solar radio flux; 4) the amplitude of multiple harmonics decreases with the harmonic number by the square — law; 5) characteristics of the periodic fluctuations are the same in both polarized and unpolarized radiation although the amplitudes are smaller; 6) a connection of multiple harmonics with individual local sources of the spots groups is observed; 7) the period of main harmonic is proportional to the area of the corresponding spots group.

### 1. Введение

Из сопоставления и анализа всех полученных данных можно сделать вывод, что происходящие над солнечными центрами активности изменения приводят к образованию областей повышенного радиоизлучения — локальных источников S-компоненты, дающих в сантиметровом диапа-

зоне волн значительную надбавку к излучению невозмущенного Солнца [1—4]. Локальные источники (л. и.) располагаются в хромосфере и короне над пятнами, факелами, хромосферными флоккулами. Наблюдения короны в оптическом диапазоне волн выявляют над группами пятен и факельными полями отдельные яркие области — корональные конденсации (к. к.) [5—7]. Физическая природа к. к., согласно [7], состоит в том, что это области короны, плотность вещества в которых сильно повышена. Единого мнения о связи л. и. с к. к. не существует, однако при построении теоретических моделей л. и. приходится учитывать сильное повышение излучения во всех диапазонах [2, 3, 8—10].

Известно, что сильное магнитное поле пятен проникает в хромосферу и корону [1—4, 11—13], а также, что в солнечной атмосфере значительная часть атомов ионизована и для солнечной атмосферы выполняется условие «вмороженности» магнитных силовых линий в вещество [1—4, 11]. Поэтому л. и. *S*-компоненты представляют собой объемы солнечной плазмы с повышенной плотностью и температурой, пронизанные и ограниченные магнитными полями групп солнечных пятен. Для таких пространственно ограниченных плазменных образований возможно появление объемных колебаний с модуляцией физических параметров (плотности, напряженности магнитного поля) [15]. Как отмечено в [16], изменение физических параметров в области л. и. при существующих механизмах излучения [1—4, 9, 10] должны приводить к заметным колебаниям потока радиоизлучения от этого л. и. Из пятен в хромосферу и корону идет большой поток магнитогидродинамических волн [17—19]. Из-за существующих градиентов плотности и температуры в хромосфере эти магнитогидродинамические волны превращаются в ударные, распространяющиеся вверх [19]. Поскольку после прохождения ударной волны состояние среды резко меняется [20, 21], то это воздействие должно также проявляться на состоянии л. и., следовательно, и в его излучении.

Впервые квазипериодические флуктуации интегрального потока радиоизлучения Солнца на длине волны 3.3 см обнаружила группа радиоастрономов НИРФИ при Горьковском университете [22—24]. Характерные периоды обнаруженных ими пульсаций интегрального потока составляли ~ 250 сек. и 700 сек. Флуктуации с периодами 240—320 сек. связывались авторами [22—24] с периодическими колебаниями Лейтона в хромосфере [25]. Флуктуации с большими квазипериодами в работах [22—24] оставлены без интерпретации. Работы [22—24] натолкнули авторов [26] произвести спектральнокорреляционный анализ записей потока радиоизлучения л. и., полученных на радиоинтерферометре с малой базой [27] на длине волны 4 см. Обработка данных на ЭЦВМ позволила выявить длиннопериодические флуктуации радиопотока на волне 4 см и установить, что причиной радиофлуктуаций служат л. и. *S*-компоненты. Эта серия наблюдений [26] показала, что периоды низкочастотных флуктуаций лежат в пределах 600—900 сек., а их амплитуда порядка 0.3—0.7% от уровня сигнала невозмущенного Солнца.

За несколько прошедших лет вышло значительное число работ [28—35], в которых исследовалось явление флуктуаций потока солнечного радиоизлучения. Анализ данных [28—30, 32—35] показывает, что авторы приводят один—два периода гармонических составляющих в потоке солнечного радиоизлучения, несколько отличных для каждой работы, а при интерпретации этих данных высказываются самые противоречивые суждения относительно природы происхождения флуктуаций.

Настоящая работа посвящена дальнейшему исследованию флуктуаций потока л. и., определению их характеристик (периодов, амплитуд и т. д.) и выяснению роли этих флуктуаций в развитии и существовании активных областей.

## 2. Принцип действия и характеристики радиоинтерферометра с малой базой на $\lambda=4$ см

Для исследований флуктуационных свойств л. и. S-компоненты при непрерывном слежении за Солнцем был использован оригинальный радиотелескоп — радиоинтерферометр с малой базой (РИМБ) [27].

Основная трудность при наблюдениях слабых всплесков и малых изменений сигнала от л. и., составляющих доли процента от уровня излучения всего Солнца, заключается в том, что они маскируются вариациями большого выходного сигнала от Солнца. Эти вариации обусловлены: а) изменениями коэффициента усиления тракта приемника; необходима стабильность коэффициента усиления  $10^{-4}$ — $10^{-5}$ ; б) неточностями сопровождения; в) изменениями атмосферного поглощения.

Существуют различные методы для уменьшения влияния указанных эффектов. Одним из них, получившим распространение, является компенсация на входе приемника солнечного сигнала сигналом от регулируемого генератора шума (квазиулевой метод) [36]. Поскольку излучение от всего Солнца меняется в сантиметровом диапазоне сравнительно мало в отсутствие всплесков, то в этом случае изменения выходного сигнала связаны с изменениями поглощения в атмосфере при ходе Солнца с высотой, прохождением облаков через диаграмму. Следовательно, квазиулевой метод вполне применим для наблюдений коротких слабых всплесков [36], но он уже малоприменим для наблюдения развития л. и. В случае интерферометра компенсация излучения от всего солнечного диска уже практически мало зависит от поглощения в атмосфере и в облаках и от точности сопровождения. Кроме этого, интерферометр имеет дополнительные существенные возможности: 1) позволяет измерять координаты всплесков; 2) при наблюдениях автоматически регистрируется излучение от л. и.; 3) показана высокая эффективность прибора при наблюдениях солнечных затмений [27]. Возможность применения интерферометра с малой базой и его теория развита в [37]. Для понимания изложенного в дальнейшем приведем основные формулы, объясняющие принцип работы РИМБ.

Считая в первом приближении солнечный диск равномерно излучающим, можно получить для глубины модуляции сигнала спокойного Солнца с помощью диаграммы направленности двухзеркального интерферометра формулу:

$$M_{\odot} = J_1 \{ (2\pi D/\lambda) (R_{\odot}/r) \} / \{ (\pi D/\lambda) (R_{\odot}/r) \} = \\ = (1/\pi) \int \int_{s_{\odot}} [1 - \alpha y^2 - \beta x^2] \cos(py - \varphi_0) dx dy, \quad (1.2)$$

где  $J_1$  — функция Бесселя 1-го рода;  $D$  — база интерферометра для случая перпендикулярности базы интерферометра к направлению на Солнце;  $\lambda$  — длина волны;  $R_{\odot}/r$  — угловой радиус Солнца;  $2\pi D/\lambda \cdot R_{\odot}/r = l$  — аргумент функции Бесселя;  $A(x, y) = 1 - \alpha y^2 - \beta x^2$  — функция, аппроксимирующая диаграмму направленности отдельного зеркала. После вычисления имеем с точностью до четвертого знака следующее выражение для  $M_{\odot}$ :

$$M_{\odot} = (2/l) [0.97 J_1(l) + 0.05 J_2(l)/l], \quad (2.2)$$

где  $J_2(l)$  — функция Бесселя 2-го порядка.

Как видно из выражения (2.2), модуляция сигнала от всего равномерно светящегося солнечного диска будет равна нулю, когда члены суммы в скобках будут равны, но противоположны по знаку. Это может быть при значении  $l = l_c = 3.845$ ; следовательно, отсюда можем найти

искомое значение  $D=132 \lambda$ . Учет повышения радиояркости на краю солнечного диска, наблюдаемого в сантиметровом диапазоне [1—4], меняет полученное значение  $D$  только на одну  $\lambda$ .

При такой длине базы интерферометра  $D$  угловые размеры л. и. оказываются значительно меньше ширины интерференционного лепестка диаграммы направленности. Поэтому сигналы таких л. и. будут модули-

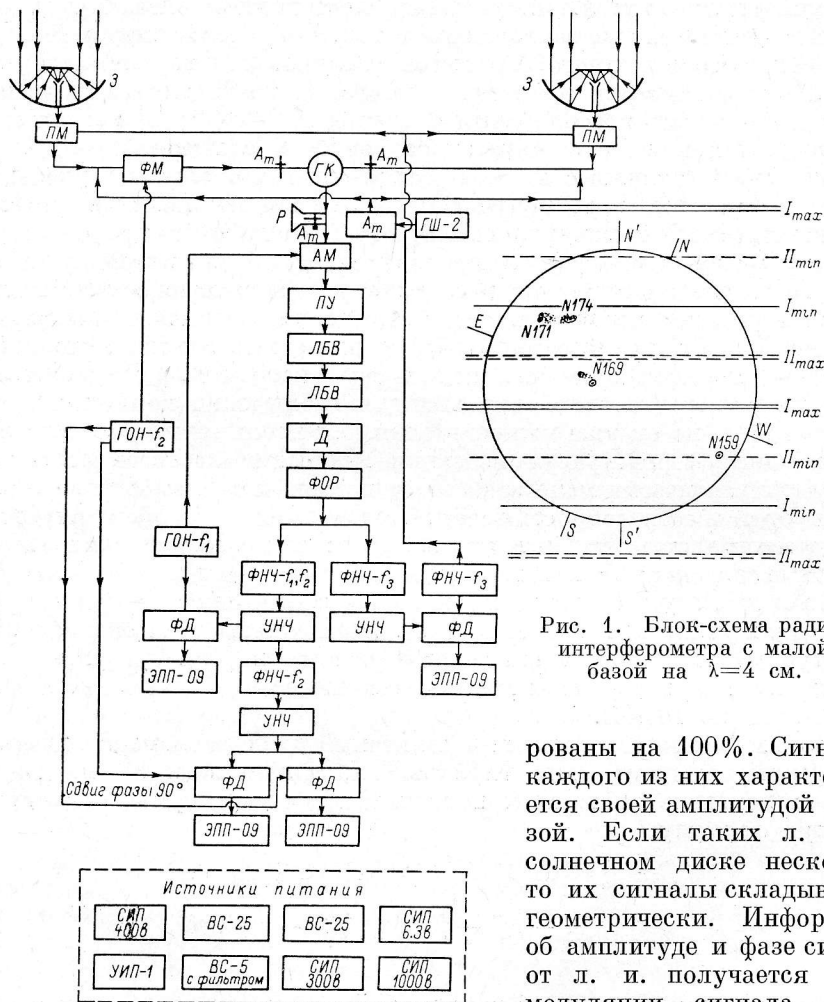


Рис. 1. Блок-схема радиоинтерферометра с малой базой на  $\lambda=4$  см.

рованы на 100%. Сигнал от каждого из них характеризуется своей амплитудой и фазой. Если таких л. и. на солнечном диске несколько, то их сигналы складываются геометрически. Информация об амплитуде и фазе сигнала от л. и. получается путем модуляции сигнала л. и. введением набега фазы в од-

ном плече интерферометра, создавая бегущую диаграмму и регистрируя на выходе приемника сигнал на двух фазовых детекторах с опорными напряжениями, сдвинутыми по фазе на  $90^\circ$ .

На таком принципе в отделе радиоастрономии ГАО АН СССР был сконструирован и изготовлен радиоинтерферометр с малой базой на длину волны  $\lambda=4.0$  см [27].

Блок-схема интерферометра приведена на рис. 1. База интерферометра имеет телескопическую конструкцию для выполнения плавной регулировки ее длины. База расположена вдоль полярной оси. Выбор базы по полярной оси дает независимость фазы интерференционного сигнала от суточного движения Солнца. Ввиду того, что высота Солнца над горизонтом при наблюдениях меняется и угол между направлением на Солнце

и полярной осью равен  $90^\circ - \delta_\odot$ , расстояние между центрами зеркал равно  $D_{\text{инт}} = D / \cos \delta_\odot$ , где  $\delta_\odot$  — склонение центра солнечного диска,  $D$  — значение длины базы для частных случаев из формул (1. 2), (2. 2) при  $M_\odot = 0$ . Каждое зеркало диаметром 1.1 м может независимо поворачиваться по склонению в пределах  $\pm 25^\circ$ . Ширина диаграммы отдельного зеркала по часовому углу и склонению (на уровне 0.5) равна соответственно  $1^\circ 55'$  и  $2^\circ 12'$  при прямоугольном облучателе. Для поляризационных наблюдений был поставлен круглый облучатель, и ширина диаграммы направленности была равна  $2^\circ 05'$ . Ширина интерференционного лепестка равна  $27'$ .

Из рис. 1 виден принцип сложения сигналов, их усиления и разделения по низкой частоте. Частичное описание работы приемника можно найти в [27]. Полоса пропускания приемника 400 Мгц. Усиление СВЧ блока порядка 50 дБ. Наблюдения всплесков и развития л. и. велась при постоянной времени 2.8 сек. Запись флуктуаций излучения л. и. велась при постоянной времени 11 сек. по каналам интерферометра и 12 сек. по каналу поляризации. При этом реальная чувствительность приемника равнялась  $0.06^\circ\text{K}$ , а  $T_\odot \approx 300^\circ\text{K}$ .

Для калибровки каналов интерферометра и интенсивности применялся газоразрядный шумовой генератор на лампе ГШ-2, сигнал от которого через  $T$ -образный ответвитель подключается через аттенюаторы к обоим волноводным трактам, идущим от зеркал. Помимо этого, калибровку канала интенсивности можно производить с помощью рупора (Р), направленного в небо и включенного после гибридного кольца. Калибровка поляризационного канала осуществлялась с помощью специальных сменных секций на облучателе. Калибровки, проводимые перед и после наблюдений, позволили связать каналы интерферометра, канал поляризации и канал общей интенсивности, найти коэффициенты перевода и привести все записи к единому масштабу.

### 3. Материал наблюдений. Анализ возможных ошибок при наблюдениях квазипериодических флуктуаций потока

Наблюдения за Солнцем на РИМБе производились почти ежедневно в течение 7—9 часов в период с 4 мая до 15 июля 1969 г. в Пулковке. Перед каждым наблюдением проводился двухчасовой прогрев аппаратуры и выполнялась калибровка. Затем антенна наводилась на Солнце и включалось сопровождение. Калибровка каналов интерферометра производилась и при записи сигнала от Солнца.

Регистрировался полный суммарный поток излучения от солнечного диска и л. и. на нем по каналу интенсивности; амплитуда и фаза сигнала от л. и. по двум каналам интерферометра и разность круговых поляризаций по каналу поляризации.

Погрешности в наших наблюдениях могут быть как внешнего, так и внутреннего характера. К ним следует отнести колебания напряжения сети и усиления приемника, а также возможности появления флуктуаций за счет атмосферных процессов и плохого слежения максимума диаграммы направленности за центром солнечного диска.

Подключение блоков питания к сети производилось через ферромагнитные стабилизаторы, позволявшие устанавливать напряжение 220 в и проводить контроль за его стабильностью. Влияние колебаний напряжения сети исключалось применением электронных стабилизаторов.

Особенности метода РИМБ позволили значительно уменьшить влияние поглощения в атмосфере по сравнению с квазиулевым методом. Это вызвано тем, что в методе РИМБ главную роль играет не само поглощение, а его градиент в атмосфере, поскольку на канале интерферометра регистрируется сигнал только от неоднородностей яркости на сол-

нечном диске. Дополнительный сигнал, возникающий на канале интерферометра из-за наличия поглощения в атмосфере, вычислялся по формуле:

$$\begin{aligned}
 M &= (1/\pi) \iint_{s_{\odot}} (T - y \partial T / \partial y) (1 - \alpha y^2 - \beta x^2) \cos (py - \varphi_0) dx dy = \\
 &= (T/\pi) \iint_{s_{\odot}} (1 - \alpha y^2 - \beta x^2) \cos (py - \varphi_0) dx dy - \\
 &- \{ (1/\pi \partial) (T/\partial y) \} \iint_{s_{\odot}} y (1 - \alpha y^2 - \beta x^2) \cos (py - \varphi_0) dx dy. \quad (1.3)
 \end{aligned}$$

Первый интеграл при правильно выбранной базе равен нулю. Если угловые размеры облака оценить примерно в  $10^\circ$ , а для водности  $1 \text{ г/см}^2 \cdot \text{км}$  поглощение равно  $0.045 \text{ дБ/км}$ , то дополнительный сигнал на одном детекторе канала интерферометра равен  $0.04\%$ , а на другом детекторе равен нулю. Кроме того, в [23, 24, 33] подробно на основании экспериментальных измерений флуктуаций на двух разнесенных радиотелескопах приведено доказательство того, что сама атмосфера не может быть источником выявляемых в [22—24, 33] флуктуаций.

Система сопровождения обеспечивала достаточную точность слежения за Солнцем. Контроль с помощью оптического гида-теодолита во время записи флуктуаций показал, что уход по часовому углу центра солнечного диска с максимума диаграммы не превышал  $5'$ . Однако в результате этого сползания или опережения максимума диаграммы с центра диска на детекторах канала интерферометра появлялся паразитный сигнал, величину которого можно определить с помощью формулы:

$$\begin{aligned}
 M &= (1/\pi) \iint_{s_{\odot}} (1 - \alpha y^2 - \beta x^2) \cos (py - \varphi_0) dx dy = \\
 &= (1/\pi) \cos \varphi_0 \iint_{s_{\odot}} (1 - \alpha y^2 - \beta x^2) \cos py dx dy + \\
 &+ (1/\pi) \sin \varphi_0 \iint_{s_{\odot}} (1 - \alpha y^2 - \beta x^2) \sin py dx dy. \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

Интегрирование ведется по диску, смещенному из центра диаграммы по часовому углу на величину, равную ошибке сопровождения. На рис. 2 изображены зависимости величин этих сигналов (в % от общего потока) от угла смещения солнечного диска из центра диаграммы. Таким образом, незначительное «качание» сопровождения по диску диаграммой дает в сигнале погрешность, которой можно пренебречь, поскольку оказывается, что она на два порядка меньше наблюдаемого эффекта (см. 5а—ж; 6).

Влияние аппаратуры может сказаться в нестабильности коэффициента усиления. Однако при исследовании приемника было выяснено, что медленный дрейф коэффициента усиления не превышает  $2\%$  за 3 часа, что является довольно малой величиной. Такое медленное, плавное изменение коэффициента усиления не препятствует наблюдению флуктуаций потока с помощью РИМБа. Большую опасность представляют периодические изменения коэффициента усиления приемника, поскольку они могут дать ложные представления об изменениях сигнала от л. и. Поэтому параллельно с солнечными наблюдениями проводились исследования аппаратурных флуктуаций и шумов с помощью сигнала от ГШ-2, питание которой стабилизировано и она сама, следовательно, не могла

служить источником квазипериодических флуктуаций. Обработка специально проведенных для этой цели записей излучения газоразрядной трубки (ГШ-2), показала отсутствие периодических изменений усиления приемника. Это свидетельствует о том, что аппаратура не служила источником флуктуаций при записях радиоизлучения Солнца. Результаты обработки записей шумов от ГШ-2 приводятся вместе с результатами обработки записей радиоизлучения Солнца.

Для записи флуктуаций в крупном масштабе коэффициент усиления приемника увеличивался в два-восемь раз по низкой частоте интерферометра и производилась непрерывная запись сигнала в течение 2—4 часов. Для контроля протяжки ленты и привязки отдельных каналов друг к другу на ЭПП-09 подавались метки времени с интервалом в одну минуту со Службы времени.

Для обработки отбирались наиболее надежные участки записи.

Данная методика наблюдений позволила повысить точность наблюдений примерно в 3—5 раз по сравнению с методикой, примененной при наблюдениях в работах [22—24], а также в работах [28—30, 32—35].

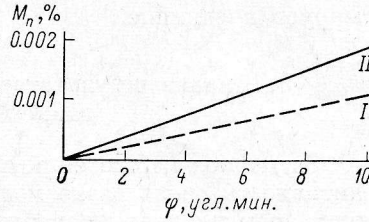


Рис. 2. Зависимость паразитных сигналов по каналам интерферометра от угла расхождения между максимумом диаграммы и центром солнечного диска.

#### 4. Методика обработки записей для выявления периодических составляющих

На случай выявления скрытых периодических составляющих обработана часть материала наблюдений с 4 мая по 15 июля 1969 г. — всего 19 дней наблюдений. В отличие от методики обработки, примененной в большинстве перечисленных работ по наблюдению флуктуаций, качество полученных наших записей позволило не проводить предварительной стационаризации кривой способом скользящего среднего. Для проведения спектрально-корреляционного анализа записей на ЭЦВМ брались значения сигнала через равные промежутки времени  $\Delta t = 9$  сек. Эти числовые данные (по 1201 значению в массиве) вводились в машину «Минск-22М».

Один из способов определения спектров мощности флуктуаций процесса заключается в разложении случайного стационарного процесса  $f(t)$ , известного на промежутке  $[0, t_0]$ , в ряд Фурье [38—40]:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{1201} c_n \cos(2\pi n t / t_0 + \varphi_n), \quad (1.4)$$

где

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \varphi_n = \arctg b_n / a_n,$$

$$a_n = (1/\pi) \int_{-t_0/2}^{+t_0/2} f(t) \cos 2\pi n t / t_0 dt, \quad b_n = (1/\pi) \int_{-t_0/2}^{+t_0/2} f(t) \sin 2\pi n t / t_0 dt.$$

Вычисленные значения коэффициентов разложения в ряд Фурье  $c_n$  и дадут нам амплитуду составляющих гармоник наблюдаемого процесса — флуктуаций потока солнечного радиоизлучения. Для этих же числовых массивов были сосчитаны автокорреляционные нормированные функции  $R_n(\tau)$  [38, 39]:

$$R_n(\tau) = R(\tau) / R(0) = \{ [1/(t_0 - \tau)] \int_0^{t_0 - \tau} f(t) f(t + \tau) dt \} / \{ (1/t_0) \int_0^{t_0} f(t) f(t) dt \}. \quad (2.4)$$

Для автокорреляционной функции необходимо учитывать, что в записи сигнала могут присутствовать несколько колебаний, которые накладываются друг на друга, вследствие чего функция будет иметь сложный вид. Подчеркнем, что  $R_{\pi}(\tau)$  составляющие разной амплитуды нормирует к единице.

### 5. Анализ результатов спектрально-корреляционной обработки записей радиоизлучения Солнца

За период наблюдений с 4 мая по 15 июля 1969 г. уровень солнечной активности очень резко менялся, поэтому за такой сравнительно небольшой срок удалось пронаблюдать развитие л. и. над различными активными областями. Проведенный анализ наблюдений показал, что л. и. на  $\lambda=4.0$  см тесно связаны с группами пятен. При анализе полученного наблюдательного материала было сделано несколько выводов относительно развития л. и. со временем.

1. Локальные источники радиоизлучения, связанные с активными областями на поверхности Солнца, являются долгоживущими, устойчивыми образованиями.

2. Поток л. и.  $S$ -компоненты радиоизлучения Солнца тесно связан с процессами, происходящими в активной области, причем как с медленными (изменение  $S_p$ ,  $H$  группы пятен), так и с быстрыми (хромосферные вспышки).

3. Обычно поток излучения л. и. испытывает медленные, плавные изменения, по-видимому, следуя за медленным развитием группы пятен. Резких скачков, перестроек л. и. не наблюдалось.

4. Иногда при большом масштабе записи на интерферрометрических каналах можно заметить биеение сигнала от л. и., но определить четко период без специальной методики наблюдений и обработки было трудно.

В периоды, когда нет всплесков, поток от л. и. меняется очень слабо, поэтому оказалось возможным применить спектрально-корреляционный анализ для исследования сигнала от л. и.

Ниже мы приведем в качестве примера анализ типичных спектров мощности с параллельным рассмотрением автокорреляционных функций и сопоставлением результатов с оптическими данными об активности Солнца в дни наблюдений.

**а. Пример детального анализа записи флуктуаций радиопотока.** Запись 7 мая 1969 г. приводилась с  $10^{\text{h}} 40^{\text{m}}$  до  $13^{\text{h}} 40^{\text{m}}$  UT. Условия наблюдений хорошие. В предыдущий день был выполнен контроль совпадения диаграмм направленности зеркал антенны и выравнены электрические длины плеч интерферометра. Из полученных при обработке автокорреляционных функций (рис. 3, а) можно выделить следующие периоды:  $P_{a1}=850$  сек. и  $P_{a11}=990$  сек. На автокорреляционную функцию первого канала накладывается волна большого периода  $P_{a1}^m \approx 9000$  сек. Хотя периоды  $P_{a1}$  и  $P_{a11}$  близкие, но они принадлежат различным источникам на солнечном диске, поскольку коэффициент корреляции между сигналами на двух каналах интерферометра мал:  $r_{1,2}=0.086 \pm 0.029$ . Вычисление и обработка спектров мощности (рис. 3, б, в) позволяют установить дополнительно по обоим каналам еще много составляющих гармоник, больших по амплитуде. Амплитуда и периоды выделенных гармоник для записей 7.5 1969 г. приведены в табл. 1. В первом столбце приведены значения амплитуд выделенных гармоник, во втором столбце — значения периодов. В четвертом и пятом столбцах приводятся соответственно амплитуды и периоды выделенных гармоник из записи на втором канале интерферометра. Гармоника считается реальной, если ее амплитуда превышает 0.05% от общего потока Солнца. Значение 0.05% принято из



рассмотрения спада амплитуд в спектрах мощности на больших гармониках.

Можно легко заметить, что гармоники в спектре первого канала интерферометра составляют две группы. Значение частот  $\omega_n = 1/P_n$  первой группы (набраны прямым полужирным шрифтом) относятся друг к другу

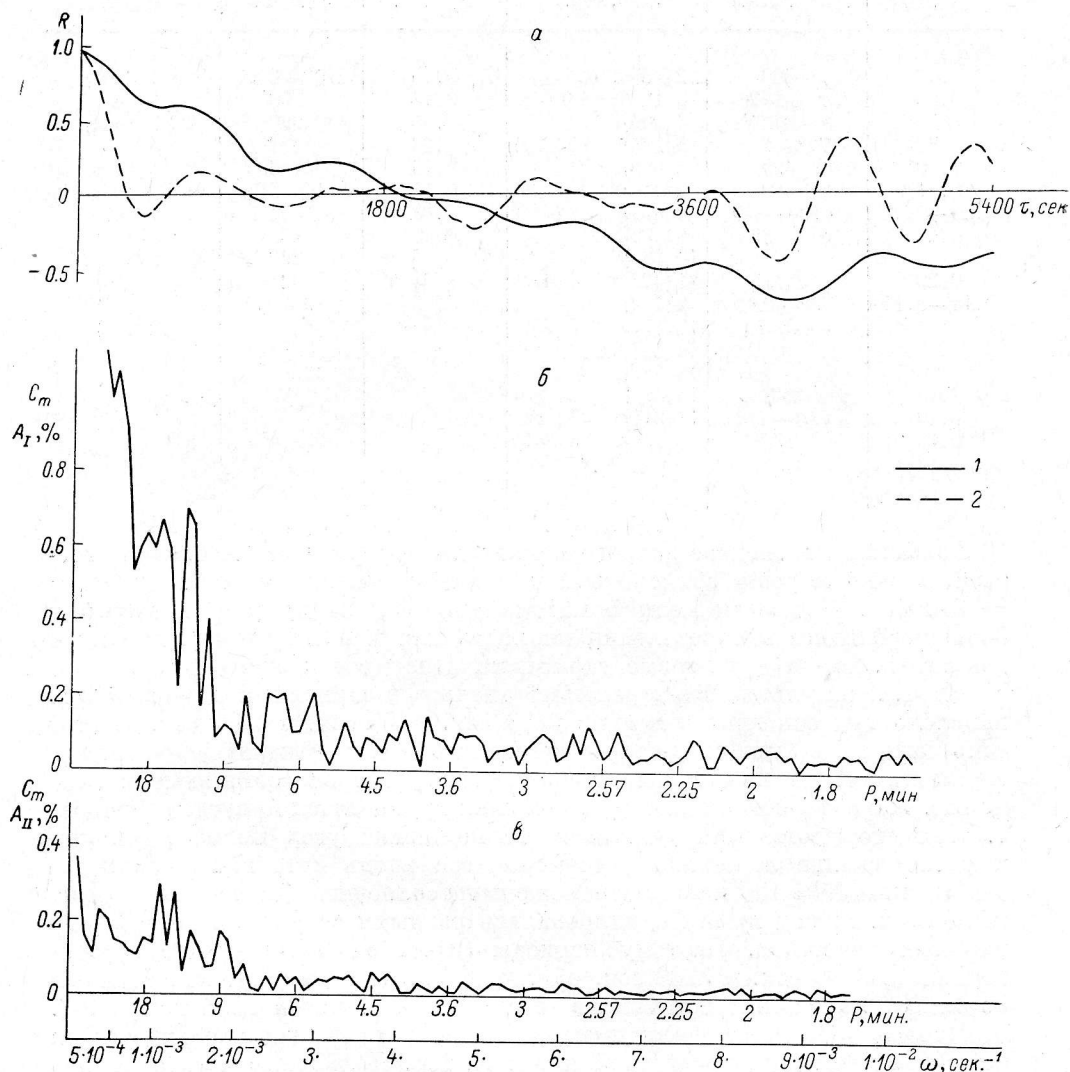


Рис. 3. Результаты обработки записей наблюдений 7 мая 1969 г.

а: 1 и 2 автокорреляционные функции соответственно на первом и втором каналах интерферометра;  
 б и в — спектры мощности флуктуаций соответственно для первого и второго каналов.

как 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 8 : 9 : 10 : 11 : 12 : 13 : 14 : 15 : 16 : 17. Первая гармоника, которую трудно выделить на начальном экспоненциально спадающем участке спектра, но которая легко интерполируется из первой группы, имеет период  $P_{01}^I = 3600$  сек.

Значение частот  $\omega_n = 1/P_n$  второй группы (набраны светлым курсивом) относятся друг к другу как 1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 8 : 9 : 10. Первая гармоника в этом случае выделяется при прямой обработке и ее период  $P_{02}^I = 1350$  сек.

ТАБЛИЦА 1

Первый канал интерферометра			Второй канал интерферометра		
Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{sI}$ , %	Периоды выделяемых гармоник $P_{sI}$ , сек.	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s$ ( $P_s$ , сек.)	Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{sII}$ , %	Периоды выделяемых гармоник $P_{sII}$ , сек.	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s$ ( $P_s$ , сек.)
1.00	1800	2 (1800)	0.20	2700—2100	1 (3200)
0.60	1300—1200— —900	3 (1200) 1 (1350) 4 (900)	0.14	1800	2 (1600)
0.70	720—675	5 (720) 2 (675)	0.30	980	3 (1066)
0.40	600	6 (600)	0.28	770	4 (800)
0.11	510	7 (510)	0.16	675—635	5 (640)
0.20—0.08	470—450	8 (450) 3 (448)	0.17	540—515	6 (533)
0.20	416—360	9 (400) 10 (360)	0.08	470	7 (457)
0.20	337	11 (327) 4 (337)	0.05	390	8 (400)
0.14—0.14	300—280 —247	12 (300) 13 (277) 5 (270) 14 (257) 15 (240)	0.05	360	9 (355)
0.15	226	16 (222) 6 (225)	0.04	321	10 (320)
0.10	216—190	17 (211) 7 (193)	0.05	309—260	11 (290)
0.10	175	8 (169)			12 (266)
0.10	135	10 (135)			

Гармоники в спектре второго канала интерферометра, начиная с третьей, можно хорошо объяснить как кратные основному периоду  $P_{01}^{II} = 3200$  сек. Учитывая мелкий масштаб по оси частот (или времени) и большие ошибки в определении периодов для первых гармоник, можно допустить, что и две первые гармоники относятся к этому ряду.

Итак, в результате спектрального анализа в записях от 7 мая 1969 г. выделено три основных периода: 3600 сек., 1350 сек. и 3200 сек. В этот день на Солнце была следующая активность [41, 42]: наблюдалось шесть групп пятен, из них только две средних размеров, остальные четыре малые. Характеристики для двух больших групп пятен приведены в табл. 2. При отождествлении учитываем позиционный угол Солнца, ширину и расположение лепестков интерферометра вдоль суточной параллели. Обе группы №№ 158 и 162 расположены на солнечном диске, так что сигналы от л. и. над ними модулировались разными системами интерференционных лепестков. Поэтому периоды (и их соответствующие группы гармоник) 3600 сек. и 3200 сек. обусловлены, по-видимому, колебаниями потока от локальных источников над группами пятен №№ 158 и 162.

Период 1350 сек., по-видимому, связан с л. и. над наблюдавшейся небольшой биполярной группой пятен № 163. Локальные источники над группами пятен №№ 158 и 163 лежат в одном и том же лепестке интерферометра. Хромосферные вспышки наблюдались с перерывами. Во время записи флуктуаций потока зарегистрировано в метровом диапазоне два слабых всплеска.

**б. Второй пример детального анализа записи флуктуаций радиопотока.** Обработанная запись 12 мая 1969 г. получена за время с 9<sup>h</sup>44<sup>m</sup> до 12<sup>h</sup>44<sup>m</sup> UT. Запись проводилась в солнечный день при хороших условиях наблюдений. На рис. 4, а приведены автокорреляционные функции для полученных записей 12 мая 1969 г. на двух каналах интерферометра. Автокорреляционные функции дают возможность обнаружить периоды  $P_{aI} = 675$  сек. и  $P_{aII} = 720$  сек. На автокорреляционную функцию первого канала накладывается еще длиннопериодическая составляющая:  $P_{aI}^M = 2170$  сек. Коэффициент корреляции между каналами интерферометра

ТАБЛИЦА 2

Номер группы пятен по [41]	Класс группы пятен по [42]	Расстояние от центра диска $r/R$	Площадь группы пятен в единицах диска $S_{\alpha}$	Площадь группы пятен в единицах полусферы $S_p$	Площадь наибольшего пятна в единицах полусферы $S_{pp}$	Число пятен в группе $m$	Значение наблюдаемого основного периода для л. п. $P_{01}$
----------------------------	----------------------------	----------------------------------	--	---	---	--------------------------	--

## а) Характеристики больших групп пятен 7 V 1969 г.

№ 158	E	0.24	640	330	231	14	3600
№ 162	D	0.72	162	114	66	10	3200
№ 163	*B	0.84	36	33	17	6	1350

## б) Характеристики больших групп пятен 12 V 1969 г.

№ 158	J	0.90	238	272	272	2 яд.	3600
№ 162	B	0.39	14	8	4	3	
№ 169	D	0.24	262	135	86	11	1540
№ 174	C	0.62	404	254	194	17	2025

## в) Характеристики больших групп пятен 13 V 1969 г.

№ 158	J	0.98	106	273	273	1	
№ 162	B	0.66	106	70	38	2	1500
№ 171	B	0.52	124	73	22	8	6400
№ 174	C	0.44	544	303	207	14	
№ 169	C	0.08	468	235	140	13	2500

## г) Характеристики больших групп пятен 5 VII 1969 г.

№ 228	D	0.86	208	203	88	16	
№ 239	H	0.48	1258	743	673	24	4050
№ 240	C	0.89	208	250	228	3	
№ 233	J	0.24	198	102	102	1	
№ 238	H	0.47	392	222	219	3	2070

## д) Характеристики больших групп пятен 6 VII 1969 г.

№ 228	C	0.96	92	157	116	3	
№ 233	J	0.39	170	92	84	2	
№ 238	H	0.27	478	248	239	6	
№ 239	H	0.33	1402	744	642	33	4620
№ 240	—	0.96	96	176	176	1	

## е) Характеристики больших групп пятен 7 VII 1969 г.

№ 233	J	0.58	160	98	98	1	
№ 238	H	0.18	480	244	242	3	
№ 239	C	0.31	1336	703	473	43	4200
№ 248	E	0.95	82	124	86	4	

## ж) Характеристики больших групп пятен 8 VII 1969 г.

№ 233	J	0.74	122	90	90	1	
№ 238	H	0.30	428	224	209	8	
№ 239	C	0.39	1264	686	448	54	3600
№ 248	E	0.90	224	254	105	9	

имеет значение  $r_{1,2} = 0.517 \pm 0.025$ . По-видимому, расположение источников на солнечном диске такое, что их излучение частично модулируется диаграммами обоих каналов интерферометра.

Рассмотрение спектров мощности (рис. 4, б, в) позволило выявить еще ряд составляющих гармоник, значительных по амплитуде. Значения амплитуд и периодов гармоник приводятся в табл. 3. Гармоники в спектре записи первого канала интерферометра составляют две группы. Значения

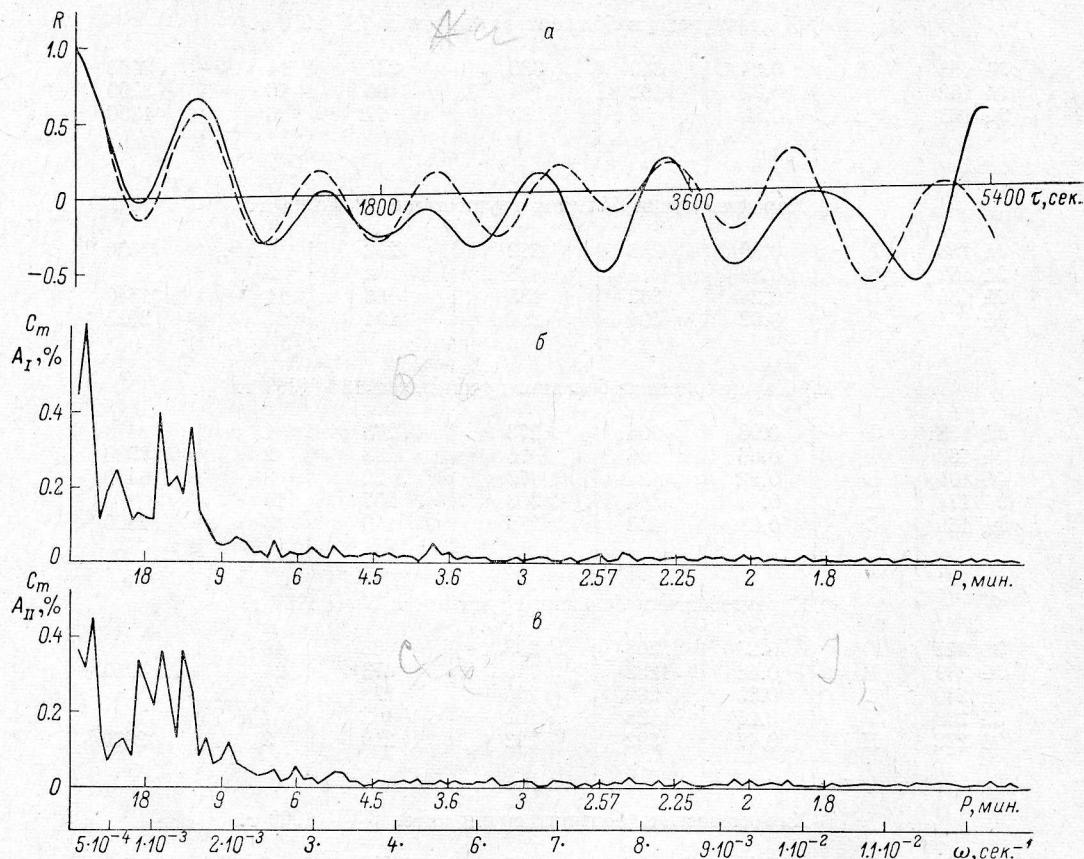


Рис. 4. Результаты обработки записей наблюдений 12 мая 1969 г.

Обозначения те же, что и на рис. 3.

частот  $\omega_{n1} = 1/P_n$ , (полужирные прямые цифры) относятся друг к другу как 1 : 2 : 3 : 4. Третья гармоника наибольшая по амплитуде и поэтому резко выделилась на автокорреляционной функции. Первая гармоника имеет значение  $P_{01}^I = 2025$  сек. и она же является модуляционной для автокорреляционной функции для записи первого канала интерферометра.

Значения частот второй группы гармоник (набраны светлым курсивом) относятся друг к другу как 1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6. Первая гармоника для второй группы имеет период  $P_{02}^I = 1540$  сек.

Спектр мощности второго канала интерферометра также содержит две группы периодов. Первая группа (подчеркнута прямой линией) имеет отношение частот 1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 и первую гармонику с периодом  $P_{01}^{II} = 3600$  сек. Вторая группа (светлый курсив) имеет отношение частот гармоник 1 : 2 : 3 : 4 : 5 и период первой гармоники  $P_{02}^{II} = 1540$  сек., который выявился и в спектре первого канала. Солнечная актив-

ТАБЛИЦА 3

Первый канал интерферометра			Второй канал интерферометра		
Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{sI}, \%$	Значения выделяемых периодов $P_{sI}, \text{сек.}$	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s (P_s, \text{сек.})$	Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{sII}, \%$	Значения выделяемых периодов $P_{sII}, \text{сек.}$	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s (P_s, \text{сек.})$
0.20	2100 ÷ 1540	1 (2025) 1 (1540)	0.45	3600 ÷ 1800	1 (3600)
0.12 ÷ 0.40	1050 ÷ 900	2 (1012)			2 (1800)
0.22	773	2 (770)	0.12	1440	1 (1540)
0.34	675	3 (675)	0.30 ÷ 0.30	1200 ÷ 900 ÷	3 (1200)
0.07	492	4 (506) 3 (513)		-770 - 720	4 (900) 2 (770)
0.05	360	4 (384)	0.12	600	5 (720)
0.04	309	5 (308)	0.11	575	6 (600)
0.05	240	6 (257)	0.05	360	7 (510) 3 (513)
			0.05	309	4 (384)
					5 (308)

ность в этот день имела следующие характеристики. На видимой стороне солнечного диска находилось 13 групп пятен (по [41, 42]), из них три средних размеров, остальные 10 малые. Данные об этих трех больших группах пятен приведены в табл. 2 (раздел б).

Видимо, основные периоды (и их соответствующие группы гармоник) 1540 сек. и 2025 сек. с большой степенью вероятности отвечают пульсациям потока от локальных источников над группами пятен №№ 169 и 174 соответственно. Есть основания предполагать, что начальный период  $P_{0I}^{II} = 3600$  сек. связан с колебаниями потока локального источника над группой пятен № 158. Наблюдений хромосферных вспышек (по [41]) во время записи флуктуаций потока не проводилось. Необычных явлений в радиодиапазоне не отмечено.

**в. Третий пример детального анализа записи флуктуаций радиопотока.** Проанализируем записи следующего дня, полученные 13 мая 1969 г. с 8<sup>h</sup>14<sup>m</sup> до 11<sup>h</sup>14<sup>m</sup> UT при хороших условиях наблюдения. Вычисление автокорреляционных функций (рис. 5, а) выявило на записи первого канала интерферометра только «большую волну» с  $P_{0I}^m = 2250$  сек., а на записи второго канала интерферометра выделяется синусоидальная составляющая с  $P_{0II} = 810$  сек. с чуть наметившейся модуляционной волной, ориентировочное значение периода  $P_{0II}^m \approx 2520$  сек. Анализ построенных спектров мощности (рис. 5, б, в) позволил обнаружить дополнительно другие периодические составляющие процесса. Значения их амплитуд и периодов даются в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4

Первый канал интерферометра			Второй канал интерферометра		
Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{sI}, \%$	Периоды выделяемых гармоник $P_{sI}, \text{сек.}$	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s (P_s)$	Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{sII}$	Периоды выделяемых гармоник $P_{sII}$	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s (P_s)$
0.21	3600	2 (3200)	0.06	2100	1 (2500)
0.11	2100	3 (2100)	0.05 ÷ 0.06 ÷	1350 ÷ 1200 ÷	2 (1250)
0.14 ÷ 0.08	1540 ÷ 1350	4 (1600) 1 (1500)	÷ 0.11 ÷ 0.09	÷ 982 ÷ 773	3 (833)
		5 (1285)	0.04	636	4 (625)
0.10	850 ÷ 740	2 (750)	0.04 ÷ 0.03	540 ÷ 470	5 (500)
0.05	490 ÷ 415	3 (500)	0.04	390 ÷ 370	6 (416)
		4 (385)			7 (357)
0.05	310 ÷ 290	5 (300)			

Спектр записи на первом канале интерферометра очень сложный. Его удается расшифровать, допуская наложение двух групп гармоник с начальными периодами  $P_{01}^I = 6400$  сек. и  $P_{02}^I = 1500$  сек.

Спектр мощности второго канал расшифровывается проще. Значения частот гармоник относятся друг к другу как 1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 с на-

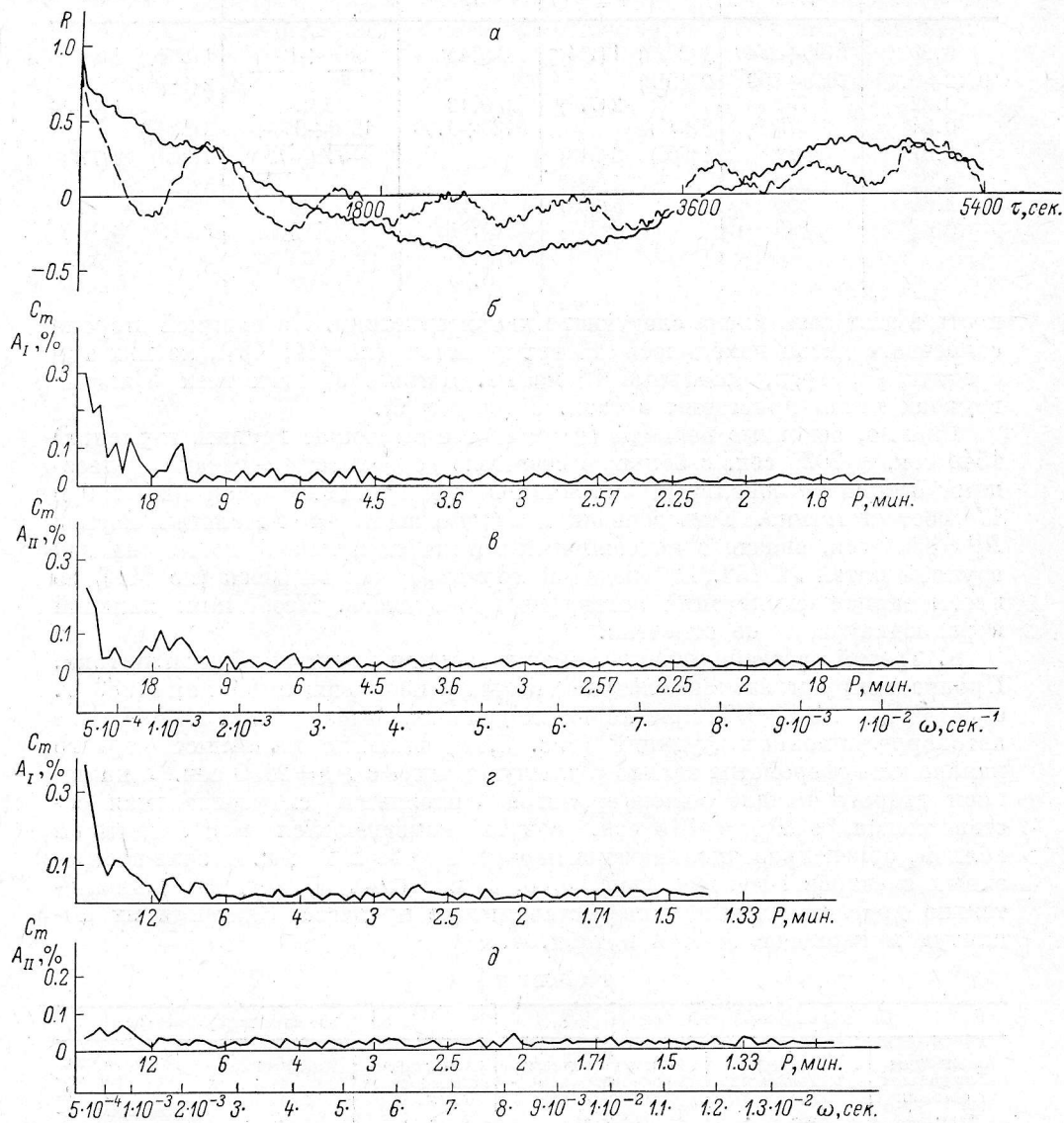


Рис. 5. Результаты обработки записей наблюдений 13 мая 1969 г.

*a* — то же, что и на рис. 3; *б* и *в* — спектры для трехчасовых записей; *г* и *д* — спектры для двухчасовых записей.

чальным периодом  $P_{01}^{II} = 2500$  сек. Первая и третья гармоники выявлены, и при рассмотрении автокорреляционной функции, первая проявилась как модуляционная, третья как основная составляющая. Так как коэффициент корреляции между записями двух каналов интерферометра небольшой:  $r_{1,2} = 0.239 \pm 0.028$ , можно считать, что периоды  $P_{01}^I = 6400$  сек.,  $P_{02}^I = 1500$  сек. и  $P_{01}^{II} = 2500$  сек. обусловлены флуктуациями

потока от различных локальных источников на солнечном диске. На правильность определения периодов указывают спектры мощности записей, полученных несколько позже с  $11^{\text{h}}36^{\text{m}}$  до  $13^{\text{h}}36^{\text{m}}$  UT этого же дня (рис. 5, з, д).

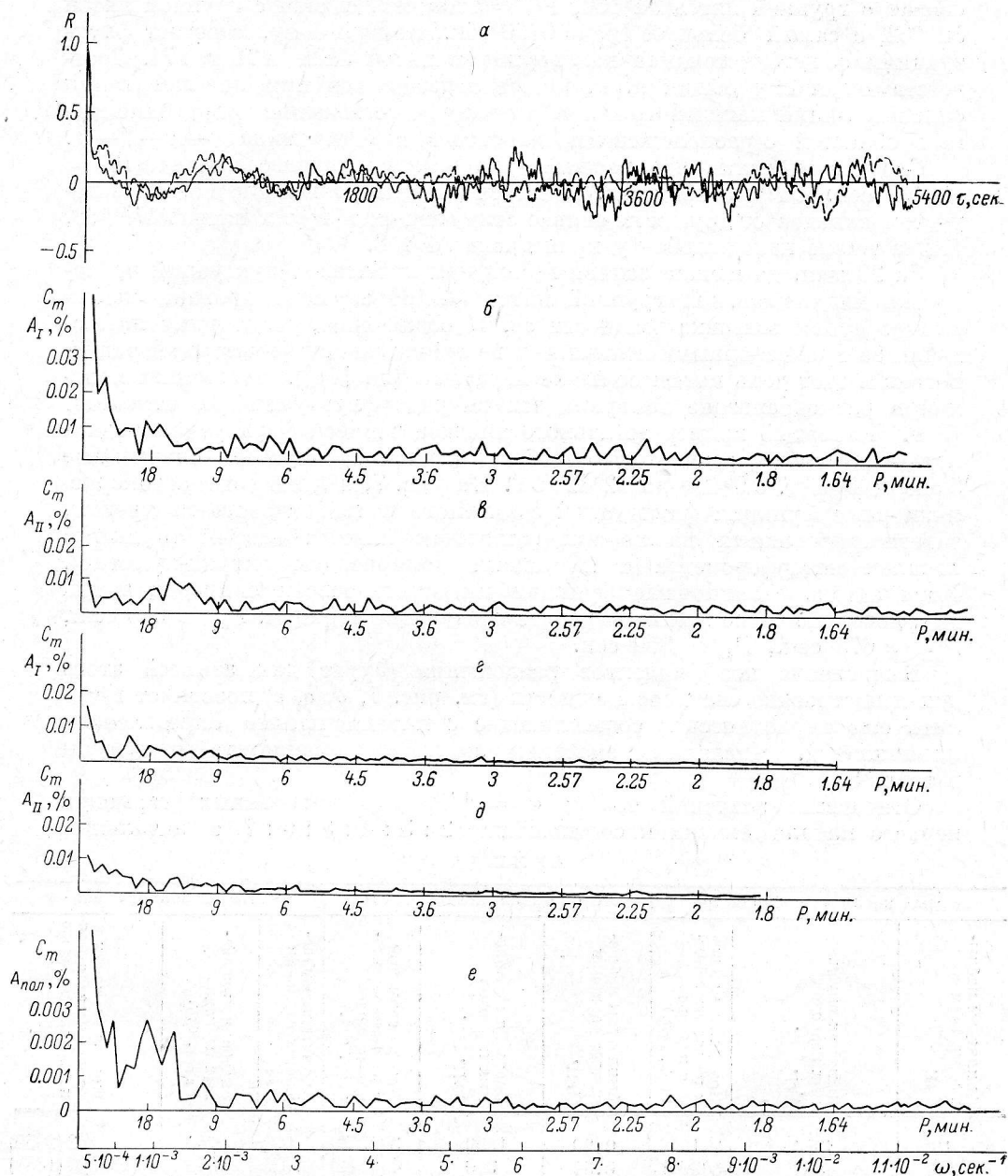


Рис. 6. Обработка записей аппаратных шумов:

а, б, в — то же, что и на рис. 3. (после наблюдений 13 мая 1969 г.); г, д, е — спектры мощности флуктуаций на каналах интерферометра и канале поляризации (после наблюдений 5 июля 1969 г.).

Во время записи радиопотока на видимой стороне Солнца наблюдалось 13 групп пятен, из них только три средних размеров, остальные 10 групп пятен малые. Необходимые данные для дальнейшего анализа этих трех больших групп собраны в табл. 2 (раздел в). Учитывая геомет-

рическое расположение выделенных групп пятен на солнечном диске, приходится допускать, что основные периоды (и кратные им гармоники) принадлежат л. и. над различными группами пятен:  $P_{01}^{II} = 2500$  сек. связан с группой пятен № 169,  $P_{02}^I = 1500$  сек. связан с группой пятен № 162, а самый большой  $P_{01}^I = 6400$  сек., по-видимому, отвечает флуктуациям общего источника над группами пятен №№ 171 и 174. Соответствующая ему общая к. к. может образоваться при перезамыкании силовых линий магнитного поля, вызванном сближением двух биполярных областей с расположением полюсов в цепочку типа  $S-N-S-N$ .

Следует отметить, что расшифровка спектра первого канала ( $P_{01}^I = 6400$  сек. и  $P_{02}^I = 1500$  сек.) является не очень уверенной в связи с учетом вкладов от других не сильно отличающихся групп пятен №№ 168, 172, а также находящейся у края диска № 158.

За 20 мин. до начала записи в большом масштабе флуктуаций радиопотока над небольшой группой пятен № 166 зарегистрирована слабая хромосферная вспышка мощности  $m$ . К сожалению, регулярные наблюдения за хромосферными вспышками во время записи флуктуаций радиопотока в этот день имели большие перерывы (по [41]). Необычных явлений в радиодиапазоне во время записи радиофлуктуаций не отмечено.

г. **Четвертый пример детального анализа записей флуктуаций радиопотока.** Приведем результаты обработки записи флуктуаций, полученные 5 июля 1969 г. с  $9^h42^m$  до  $12^h42^m$  UT. На рис. 7, а приведены автокорреляционные функции флуктуаций солнечного сантиметрового излучения, зарегистрированных на первом (сплошная линия), втором (пунктир) каналах интерферометра и на канале поляризации (штрих-пунктир). Хотя автокорреляционные функции имеют не совсем синусоидальный вид, довольно четко можно выделить следующие периоды:  $P_{01} \approx 680$  сек.,  $P_{0II} \approx 675$  сек.,  $P_{0III} \approx 850$  сек.

Вычисление коэффициентов разложения Фурье для записей этого дня и построение спектров мощности (см. рис. 7, б, в, г) позволяет выделить еще периодические составляющие с параллельными определением их амплитуд. Численные значения амплитуд и периодов приведены в табл. 5.

Отношения значений частот  $\omega_n = 1/P_n$  для выделенных гармоник первого канала близки к соотношению  $2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7$  с начальным

ТАБЛИЦА 5

Первый канал интерферометра			Второй канал интерферометра			Канал поляризации		
Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{\%I}$ , %	Значения выделяемых периодов $P_{\%I}$ , сек.	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s$ ( $P_s$ , сек.)	Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{\%II}$ , %	Значения выделяемых периодов $P_{\%II}$ , сек.	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s$ ( $P_s$ , сек.)	Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_s$ пол., %	Значения выделяемых периодов $P_s$ пол., сек.	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s$ ( $P_s$ , сек.)
0.13	1350	2 (1350)	0.20	1350	3 (1350)	0.030	2100	2 (2050)
0.06	830	3 (900)	0.30	980	4 (1012)	0.025	1350	2 (1350) 3 (1350)
0.06	680—640	4 (670)	0.15 ÷ 0.10	840 ÷ 670	5 (810)	0.018	1100	4 (1012)
0.05 ÷ 0.05	570 ÷ 540 ÷ 515	5 (540)			6 (675)	0.025	900 ÷ 830	3 (900) 5 (810)
0.04	432	6 (450)	0.08	600	7 (578)	0.02	670 ÷ 636	4 (670) 6 (675)
0.05	373	7 (373)	0.06	490	8 (506)	0.009	568	5 (540) 7 (578)
			0.04	430 ÷ 410	9 (450)	0.01	420	6 (450)
					10 (405)	0.01	370 ÷ 360	7 (373)
			0.12	360	11 (368)	0.005	310 ÷ 280	9 (300)
						0.008	200	



периодом  $P_{01}^I = 2700$  сек. Четвертая гармоника из спектра мощности с периодом 670 сек. проявилась на автокорреляционной функции с периодом  $P_{aI} \approx 680$  сек.

Для второго канала значения частот, выделяемых в спектре мощности флуктуаций, составляют отношения 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 8 : 9 : 10 : 11 с боль-

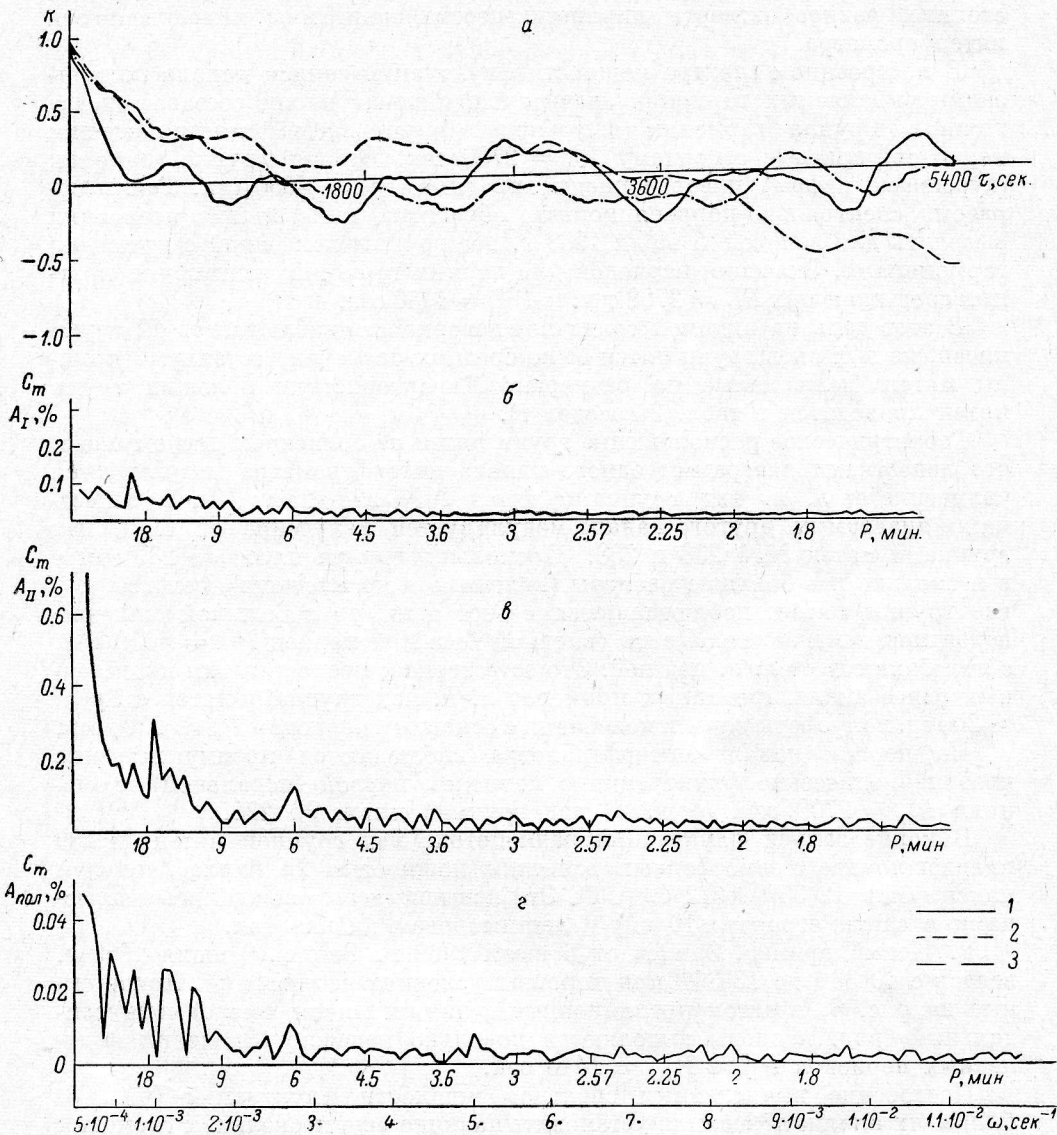


Рис. 7. Результаты обработки записей наблюдений 5 июля 1969 г.

а: 1, 2, 3 автокорреляционные функции соответственно на первом, втором каналах интерферометра и канале поляризации; б, в, г, д — соответствующие спектры мощности флуктуаций.

шим периодом для первой, невыделяемой при прямой обработке, гармоники  $P_{01}^II = 4050$  сек. Как видим, построение автокорреляционной функции для записи по второму каналу интерферометра выделяет только одну периодическую составляющую, которая имеет частоту в шесть раз выше основной.

Следует отметить, что первые (основные) периоды для первого и второго каналов не являются кратными, кроме того, в спектрах этого дня

очень мало гармоник с одинаковыми значениями частот, поэтому коэффициент корреляции между каналами интерферометра очень мал. Малое значение  $r_{1,2} = 0.146 \pm 0.029$  для записей этого дня говорит в пользу того, что колебания периодами  $P_{01}^I = 2700$  сек. и  $P_{01}^{II} = 4050$  сек. вызваны локальными источниками, разнесенными на диске Солнца на угловое расстояние, равное четверти ширины лепестка диаграммы направленности интерферометра.

В построенном спектре мощности флуктуаций записи канала поляризации выделяемых гармоник значительно больше и они составляют две группы. Группа гармоник (полужирные прямые цифры) имеет значения периодов, кратные основному  $P_{01}^I = 2700$  сек. Вторая группа гармоник (курсивные цифры) имеет периоды, кратные  $P_{01}^{II} = 4050$  сек. Таким образом, спектрально-корреляционная обработка и ее анализ позволили выделить для записей 5 июля 1969 г. две группы колебаний с кратными гармониками. Значения периодов для первых гармоник этих групп кратных составляющих  $P_{01}^I = 2700$  сек. и  $P_{01}^{II} = 4050$  сек.

В этот день на видимой солнечной поверхности наблюдалось 12 групп пятен, из них пять групп пятен было средних размеров, остальные группы пятен были малые по размерам. Характеристики больших групп пятен приводятся в табл. 2 (раздел г).

Геометрическое расположение групп пятен на солнечном диске таково, что лепестками диаграммы одного канала интерферометра модулируется излучение от л. и. над группами пятен №№ 228, 239, 240, а лепестками диаграммы другого канала модулируется излучение от л. и. над группами пятен №№ 233 и 238. Поскольку группа пятен № 239 имеет в несколько раз большие размеры (линейные и по площади), чем все другие группы пятен, наблюдавшиеся в этот день, то с большой степенью вероятности можно связывать основной большой период  $P_{01}^{II} = 4050$  сек. с колебаниями от л. и. над ней. Это естественно, поскольку для проведенных ранее анализированных примеров л. и. над группами пятен с  $S_p \approx \approx 200$  ед. полусферы давали колебания с основным периодом  $P_0 \approx 2000$  сек.

На первом канале интерферометра наблюдаются преимущественно квазипериодические флуктуации с периодом первой (начальной) гармоники  $P_{01}^I = 2700$  сек. от л. и. над группой пятен № 238.

В конце записи флуктуаций радиопотока над группой пятен № 239 произошло две хромосферные вспышки мощностью  $2n$  балла (моменты максимумов  $12^h35^m$  и  $12^h40^m$  UT). Эти вспышки сопровождались всплесками в сантиметровом (10 см) и дециметровом диапазонах.

**д. Пятый пример. Запись от 6 июля 1969 г.** Запись 6 июля 1969 г. велась с  $10^h36^m$  до  $13^h36^m$  при хороших условиях наблюдений. Приведенные на рис. 8, а автокорреляционные функции имеют четкий «синусоидальный» вид, периоды выделяются довольно надежно. Значения выделенных периодов  $P_{01}^I \approx P_{01}^{II} \approx 1440$  сек.

Построение вычисленных спектров мощности флуктуаций (рис. 8, б, в) и их анализ позволили установить наличие еще нескольких гармоник на каждом из каналов интерферометра. Значения выделенных амплитуд составляющих гармоник и их периоды приводятся в табл. 6. Последние выделенные гармоники незначительны, выделяются над общим шумом по амплитуде только в два раза.

Значения частот выделенных гармоник спектра мощности первого канала интерферометра относятся друг к другу как  $2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 8 : 9 : 11 : 13 : 15$ . Период первой, ненаблюдаемой в спектре, гармоники  $P_{01}^I = 4620$  сек. Значения частот для гармоник второго канала интерферометра составляют отношения  $2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 8 : 9 : 10 : 12$ , т. е. периоды гармоник, кратные тому же самому начальному периоду  $P_{01}^{II} \approx \approx P_{01}^I = 4620$  сек.

Найденные значения периодов из автокорреляционных функций лежат между периодами третьей и четвертой гармоник. Одинаковые  $P_{01}^I$  и  $P_{01}^{II}$  говорят в пользу того, что флуктуации на двух каналах интерферометра вызваны одним и тем же локальным источником. Это предположение подтверждается и тем, что коэффициент корреляции между записями каналов интерферометра высокий:  $r_{1,2} = 0.902 \pm 0.013$ .

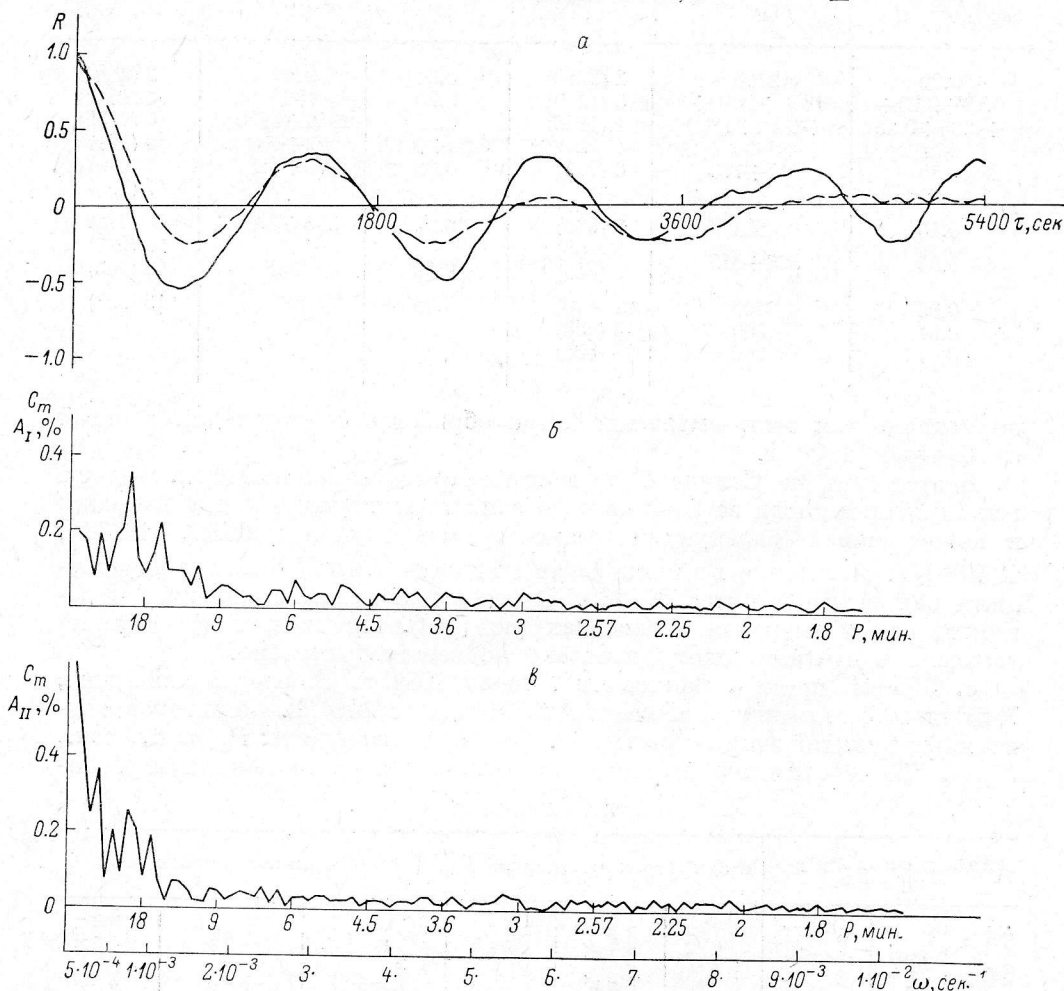


Рис. 8. Результаты обработки записей наблюдений 6 июля 1969 г.

а, б, в — то же, что и на рис. 3.

Записи были получены в день, когда на видимой полусфере солнечной поверхности находилось 12 групп пятен. Данные о больших наблюдавшихся группах пятен в этот день имеются в табл. 2 (раздел д).

Учитывая, что группа солнечных пятен № 239 значительно превосходит по своим размерам остальные группы пятен, есть основания связывать выделенные флуктуации потока с начальным периодом  $P_{01}^I = P_{01}^{II} = 4620$  сек. с л. и. над группой пятен № 239.

Судя по всему, это отождествление верно, поскольку все оставшиеся значительные по размерам группы пятен №№ 228, 233, 238, 240 имеют в отдельности  $S_p \leq 250$ . Локальные источники над такими группами пятен имели периоды для первых (основных) гармоник значитель-

ТАБЛИЦА 6

Первый канал интерферометра			Второй канал интерферометра		
Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{sI}, \%$	Периоды выделяемых гармоник $P_{sI}, \text{сек.}$	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s (P_s, \text{сек.})$	Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{sII}, \%$	Периоды выделяемых гармоник $P_{sII}, \text{сек.}$	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s (P_s, \text{сек.})$
0.20	2700	2 (2310)	0.35	2700	2 (2310)
0.18 ÷ 0.20 ÷	1800 ÷ 1540 ÷	3 (1540)	0.20	1800	3 (1540)
÷ 0.35 ÷ 0.15	÷ 1350 ÷ 1200	4 (1155)	0.25	1350 ÷ 1200	4 (1155)
0.21	900	5 (924)	0.20 ÷ 0.12	982 ÷ 900	5 (924)
0.10	832 ÷ 773	6 (770)	0.08	770 ÷ 675	6 (670)
					7 (760)
0.10	636	7 (660)	0.05	568 ÷ 540	8 (578)
0.05	568 ÷ 515	8 (568)	0.05	470	9 (513)
		9 (513)			10 (462)
0.05	400	11 (420)	0.05	385	12 (383)
0.07	360	13 (355)			
0.07	300	15 (308)			

но меньше, чем этот, выделенный при обработке спектров для записей от 6 июля 1969 г.

В этот день на Солнце было много хромосферных вспышек. Четыре вспышки произошли за 2—3 часа до записи флуктуаций и три вспышки в конце записи флуктуаций (моменты максимумов  $12^{\text{h}}29^{\text{m}}$ ,  $12^{\text{h}}38^{\text{m}}$ ,  $12^{\text{h}}48^{\text{m}}$  UT. Последние вспышки были мощности 1*n* и 2*f* балла и происходили над группой пятен № 239. Отмечены необычные явления в дециметровом и метровом диапазонах (по [41]). При записи флуктуаций всплеска в сантиметровом диапазоне не зарегистрировано.

**е. Шестой пример. Запись от 7 июля 1969 г.** В следующий день, 7 июля 1969 г., записи получены с  $10^{\text{h}}30^{\text{m}}$  до  $13^{\text{h}}20^{\text{m}}$  UT. Из автокорреляционных функций этих записей (рис. 9, а) можно получить:  $P_{aI} \approx 675 \text{ сек.}$ ,  $P_{aII} \approx 720 \text{ сек.}$  Автокорреляционная функция первого канала позволя-

ТАБЛИЦА 7

Первый канал интерферометра			Второй канал интерферометра			Канал поляризации		
Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{sI}, \%$	Значения выделяемых периодов $P_{sI}, \text{сек.}$	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s (P_s, \text{сек.})$	Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{sII}, \%$	Значения выделяемых периодов $P_{sII}, \text{сек.}$	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s (P_s, \text{сек.})$	Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_s \text{ пол., } \%$	Значения выделяемых периодов $P_s \text{ пол. сек.}$	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s (P_s, \text{сек.})$
0.30	2100	2 (2100)	0.30	2100	2 (2100)	0.015 ÷ 0.020	2100 ÷ 1540	2 (2100)
0.15	1350	3 (1400)	0.07	1540	3 (1400)			3 (1400)
0.15	1080	4 (1050)	0.15	1200 ÷ 980	4 (1050)	0.028	980	4 (1050)
0.08	900	5 (840)	0.08	832	5 (840)	0.022 ÷ 0.015	830 ÷ 720	5 (840)
0.15	720	6 (700)	0.15	720	6 (700)			6 (700)
0.08	600	7 (600)	0.08	636 ÷ 600	7 (600)	0.012	600	7 (600)
0.06	540	8 (525)				0.009	450	9 (450)
			0.08	450	9 (450)	0.006	420 ÷ 400	10 (420)
			0.06	380 ÷ 360	11 (368)			11 (382)
						0.004	340 ÷ 270	12 (350)
								13 (323)
								14 (300)
								15 (280)

ет выделить ее и другой период  $P_{\text{д}}^{\text{м}} \approx 2100$  сек., который относится к «модуляционной волне». Для второго канала интерферометра вид автокорреляционной функции не позволяет выделить значения периода для «модуляционной волны» на автокорреляционной функции. Расчет коэф-

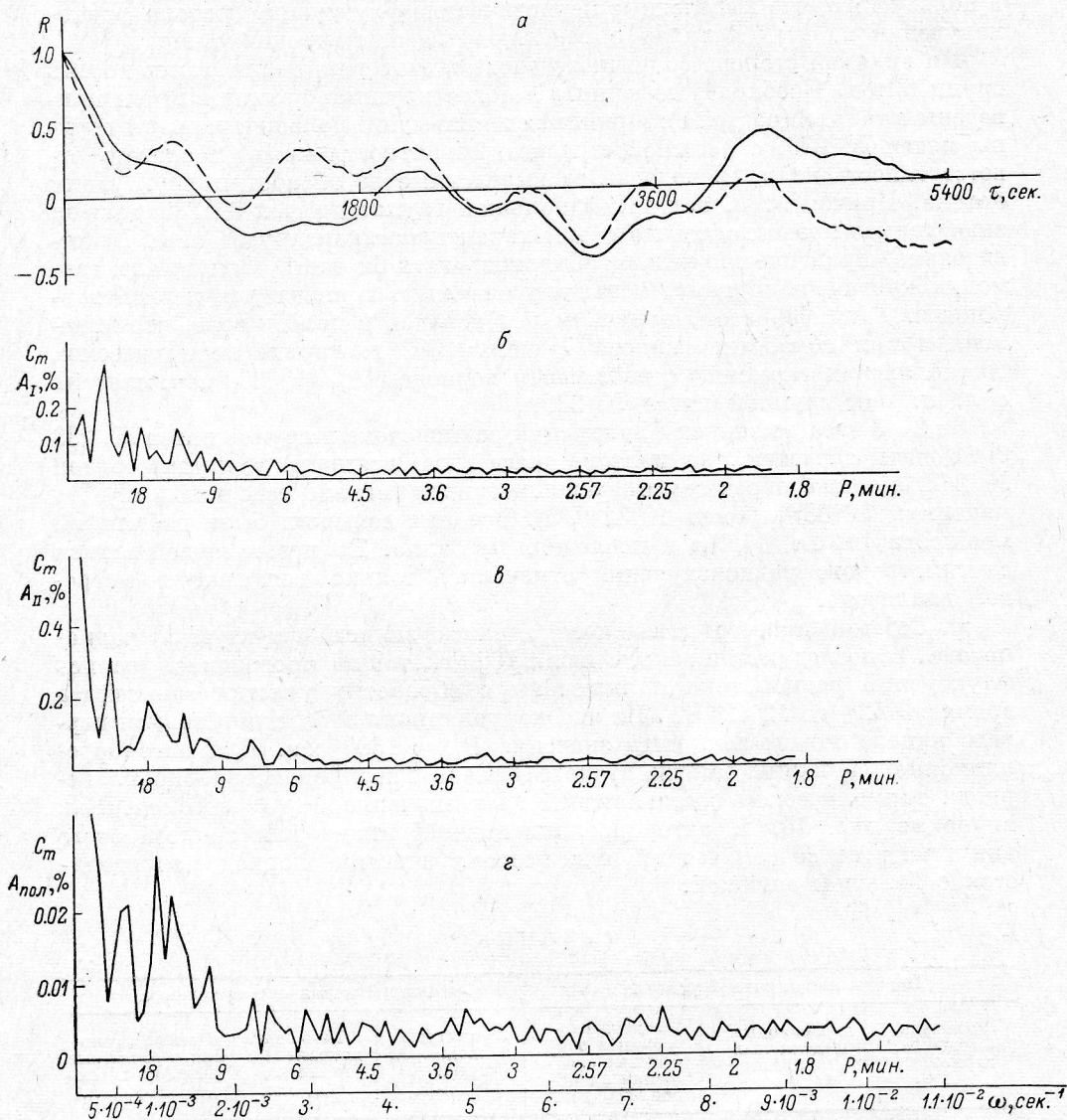


Рис. 9. Результаты обработки наблюдений 7 июля 1969 г.

а, б, в — то же, что и на рис. 3; г — спектр флуктуаций на канале поляризации.

эффициентов разложения в ряд Фурье временного хода записей и построение спектра мощности (рис. 9, б, в, г) приводит к определению еще ряда дополнительных периодов колебаний. Значения амплитуд и периодов составляющих гармоник, найденных из спектров, приводятся в табл. 7.

Значения частот гармоник для спектра первого канала интерферометра относятся друг к другу как 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 8, для второго канала — как 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 9 : 11, а для канала поляризации составляют отношения 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 9 : 10 : 11 : 12 : 13 : 14 : 15. Ин-

терполяция для спектров всех каналов интерферометра дает один и тот же период первой гармоники  $P_{01}^I = P_{01}^{II} = P_{01}^{пол} = 4200$  сек.

Коэффициент корреляции между записями первого и второго каналов интерферометра очень высокий:  $r_{1,2} = 947 \pm 0.009$ . Все это говорит в пользу того, что выделенные периодические флуктуации потока радиоизлучения на всех каналах определяются одним источником.

На видимой стороне солнечного диска в этот день наблюдалось восемь групп пятен. Необходимые данные о более крупных группах пятен приведены в табл. 2 (раздел е). Принимая во внимание большие размеры группы пятен № 239, с большой степенью вероятности может возлагать ответственность на л. и. над ней за выделенные из обработки флуктуации потока. Причем л. и. над такой большой группой пятен № 239 должен значительно превосходить по своим характеристикам другие л. и. Действительно, практически нельзя объяснить хотя бы часть выделенных гармоник кратными другому, меньшему значению периода для первой гармоники. Таким образом, получили ряд доводов в пользу того, что выделенная при обработке записей 7 июля 1969 г. группа периодических составляющих гармоник с начальным периодом  $P_{01} = 4200$  сек. связана с л. и. над группой пятен № 239.

За 2—3 часа до записи флуктуаций радиопотока в группе пятен № 233 было пять вспышек, за полтора часа две вспышки в группе пятен № 247, а также перед самым началом записи (начало вспышки в  $10^h05^m$ , максимум  $10^h08^m$ , конец  $10^h32^m$  UT). Все эти вспышки были небольшой мощности  $1n$ ,  $2n$ ,  $1f$ ,  $1n$  и последняя  $1f$  балла. Во время нашей записи сантиметрового радиоизлучения отмечались только всплески в метровом диапазоне.

**ж. Седьмой пример детального анализа записи флуктуаций радиопотока.** В последующий день, 8 июля 1969 г., также проводилась запись флуктуаций радиопотока и включены в обработку участки записей за время с  $9^h42^m$  до  $12^h42^m$  UT. Из автокорреляционной функции записи первого канала можно получить значение  $P_{01} = 1300$  сек. Для автокорреляционной функции записи второго канала интерферометра оценка периода гармонической составляющей дает значение  $P_{01}^{II} = 900$  сек. Как видно из рис. 10, а, автокорреляционные функции для записей этого дня имеют не совсем четкий вид, поэтому значение периодов определяется с большой ошибкой.

ТАБЛИЦА 8

Первый канал интерферометра			Второй канал интерферометра		
Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{sI}$ , %	Периоды выделяемых гармоник $P_{sI}$ , сек.	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s$ ( $P_s$ , сек.)	Амплитуды наблюдаемых гармоник $A_{sII}$ , %	Периоды выделяемых гармоник $P_{sII}$ , сек.	Номера гармоник и расчетные значения периодов $s$ ( $P_s$ , сек.)
0.18	2100 ÷ 1800	2 (1800)	0.05 ÷ 0.08	1800 ÷ 1200	2 (1800)
0.12	1200	3 (1200)			3 (1200)
0.06	900	4 (900)	0.10	900	4 (900)
0.10	770	5 (720)	0.1 ÷ 0.08	770 ÷ 630	5 (720)
0.10	600	6 (600)			6 (600)
0.08	540	7 (510)	0.06	515	7 (510)
0.05	432	8 (450)	0.08	430	8 (450)
0.10	400 ÷ 370	{ 9 (400) 10 (360)			
0.06	310 ÷ 270	{ 11 (327) 12 (300) 13 (277)			

Построение спектров мощности флуктуаций (рис. 10, б, в) для записей этого дня выявило присутствие других периодических составляющих. Численные значения амплитуд и периодов этих периодических составляющих приводятся в табл. 8. Значение частот для отмеченных в спектре первого канала составляют соотношение: 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 8 : 9 : 10 : 11 : 12 : 13. Первая гармоника не выделилась при прямой обработке в спектре. Но ее период легко найти из имеющихся значений периодов для других гармоник:  $P_{01}^I = 3600$  сек. Для спектра второго канала ин-

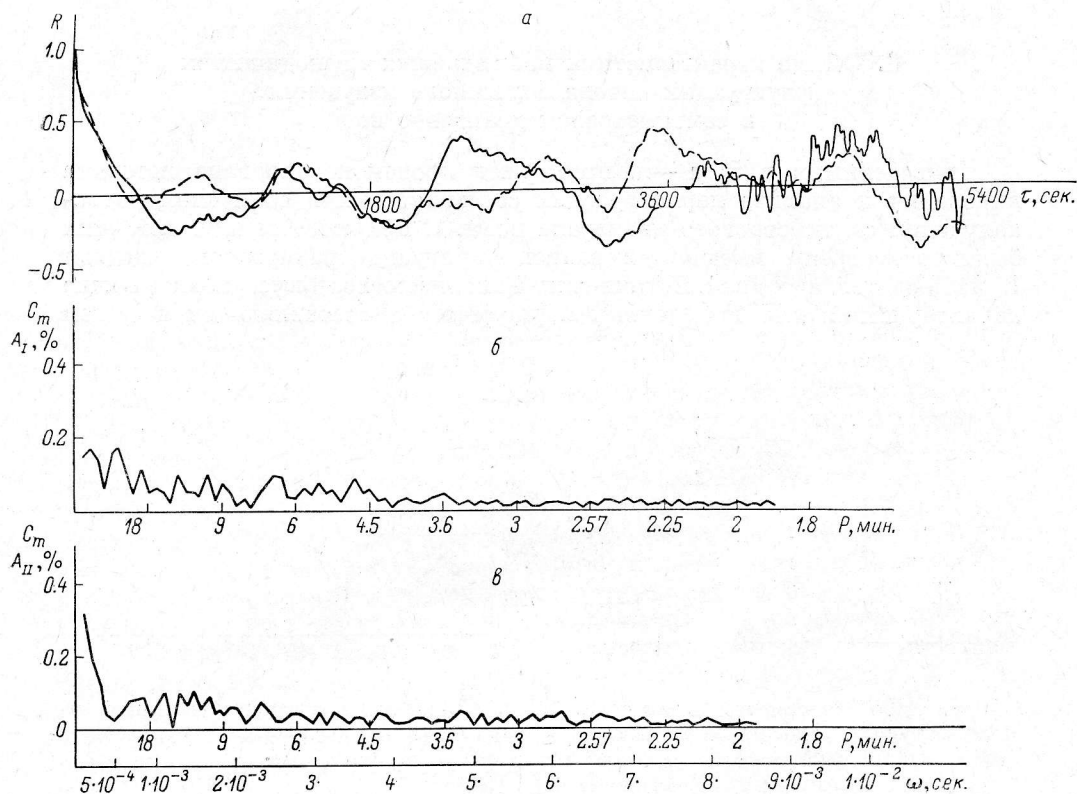


Рис. 10. Результаты обработки записей наблюдений 8 июля 1969 г.

а, б, в — то же, что и на рис. 3.

терферометра соотношение для частот выделенных по амплитуде гармоник отвечает 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 8. Первая гармоника и в этом случае лежит в начале спектра на экспоненциальном начальном участке и при обработке спектра ее трудно выделить. Интерполяция дает  $P_{01}^{II} \approx 3600$  сек.  $\approx P_{01}^I$ .

Коэффициент корреляции между записями на первом и втором каналах интерферометра довольно высокий:  $r_{1,2} = 0.758 \pm 0.019$ . Следовательно, почти все выделенные гармоники на первом и втором каналах интерферометра отвечают одному и тому же источнику на солнечном диске.

На время записи флуктуаций была следующая активность. На наблюдаемой стороне солнечной поверхности существовало 10 групп пятен. Четыре группы пятен имели средние размеры, шесть остальных были малые. Необходимые данные о четырех больших группах пятен помещены

в табл. 2 (раздел ж). Как и для трех предыдущих рассмотренных дней (§ 5, г — § 5, е), группа пятен № 239 имеет доминирующие размеры. Поэтому и в последнем случае естественно предполагать, что наблюдаемые периодические составляющие, выделенные из автокорреляционных функций и спектров мощности по обоим каналам интерферометра, определены флуктуациями потока от л. и. над группой пятен № 239.

Хромосферных вспышек, согласно данным [41, 43], во время записи флуктуации не происходило. Необычные явления (всплески малой мощности) отмечены только в метровом диапазоне.

## 6. Общие характеристики наблюдаемых периодических флуктуаций потока солнечного излучения в сантиметровом диапазоне волн

Приведенными в 5, а — ж примерами продемонстрирована методика выделения и анализа периодических составляющих в солнечном радиолучении сантиметрового диапазона волн. С помощью данной методики были рассмотрены имеющиеся записи флуктуаций радиопотока еще для 12 наблюдательных дней. Выполненный анализ позволил установить общие характеристики для выделенных периодических составляющих в общем

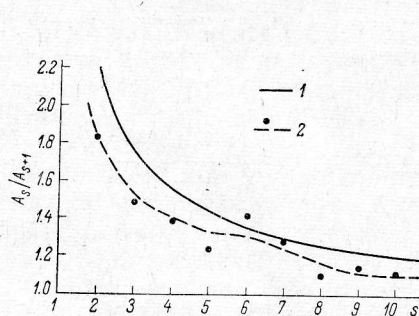


Рис. 11. Зависимость отношения амплитуд  $A_s/A_{s+1}$  от номера гармоник  $s$ .

1 —  $A_s/A_{s+1} = (s+1)^2/s^2$ ; 2 — усредненные результаты наблюдений.

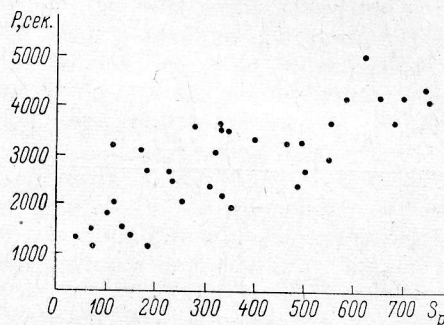


Рис. 12. Зависимость периода первой гармоники  $P_{01}$  от площади группы пятен  $S_p$ .

потоке солнечного радиолучения. Основные наблюдательные факты по низкочастотным флуктуациям потока радиолучения Солнца на  $\lambda = 4$  см приводятся ниже.

1. Значения наблюдаемых периодов гармонических составляющих самые разнообразные, от 180 сек. до 2100 сек., имеются указания на существование периодов первых (начальных) гармоник со значением  $\sim 4500$  сек.

2. Выделяемые периоды в спектрах мощности флуктуаций радиопотока образуют группы с кратными частотами гармоник  $\omega_s = s\omega_1$ .

3. Имеется статистическая зависимость  $A_s \approx A_1 s^{-2}$ , т. е. амплитуды кратных гармоник спадают примерно по квадратичному закону (рис. 11).

4. Проведенный анализ позволяет предполагать связь групп кратных гармоник (периодов) в спектрах мощности флуктуаций потока с колебаниями потока от отдельных л. и., расположенных над группами солнечных пятен.

5. Отмечается рост флуктуаций с повышением солнечной активности — числа групп пятен и их площади.



6. Наблюдается зависимость  $P_{01} \sim Sp$ , т. е. период первых гармоник пропорционален площади соответствующей группы пятен (рис. 12).

7. Амплитуды гармонических составляющих имеют значения от 0.05% до 1.0% от общего солнечного радиоизлучения. Если считать, что периодические колебания потока вызваны изменениями потока от л. и. над группами пятен, то в пересчете поток от различных л. и.  $\Delta I/I$  должен меняться от 0.5% до 10%. Такие значения амплитуд могут иметь отдельные периодические гармоники. В суммарном же потоке от л. и. будут наложения всех этих гармоник и амплитуда биений может быть значительно меньше.

8. Характеристики периодических флуктуаций в поляризованном по кругу излучении хорошо совпадают с таковыми в неполяризованном излучении.

Основными новыми результатами данной работы являются:

- а) кратность выделяемых периодов (пункт 2);
- б) спад амплитуд кратных гармоник приближенно по квадратичному закону (пункт 3);
- в) пропорциональность периода первой гармоники площади группы пятен (пункт 6).

Остальные пункты существенно дополняют и уточняют результаты работ [22—24, 26, 28—30, 32—34], а также сообщения на VII Всесоюзной конференции по радиострономии в июне 1972 г. в г. Горьком по наблюдениям флуктуаций солнечного сантиметрового радиоизлучения [35].

При расшифровке спектров мощности флуктуаций потока радиоизлучения для конкретных дней наблюдений группы гармоник с кратными частотами  $\omega_s = \omega_1 s$  и зависимость  $A_s = A_1 s^{-2}$  выделить довольно трудно при наблюдениях на обычных малых телескопах. Это связано с тем, что наблюдается поток от всего Солнца, и на средние гармоники от л. и. над большими группами пятен накладываются первые гармоники от л. и. над малыми группами пятен. Часть гармоник может быть опущена наблюдателем из-за принятой методики наблюдений и обработки записей. По-видимому, из-за этого большинство наблюдателей на различных волнах сантиметрового диапазона для различных дней наблюдений дают разные периоды выделяемых гармонических составляющих потока с наиболее выделяемыми амплитудами. При этом первые гармоники могут быть не замечены. В нашей работе метод РИМБа позволил во многом обойти трудности в регистрации флуктуаций и расшифровке их спектров мощности.

Следует отметить, что объяснение 60-минутных колебаний потока радиальными пульсациями всего Солнца [30, 31] маловероятно, поскольку в наших случаях все длиннопериодические флуктуации потока надежно связываются с отдельными л. и. В этом смысле настоящая работа подтверждает связь флуктуаций радиопотока с локальными источниками над активными областями, впервые указанную в [26] и затем поддержанную в работе [34].

Подводя итоги наблюдательных данных, необходимо отметить, что теория низкочастотных периодических флуктуаций потока солнечного сантиметрового излучения должна объяснить три основных пункта: связь параметров флуктуаций с характеристиками активных областей, кратность наблюдаемых гармоник и их амплитуду.

В заключение авторы приносят благодарность Г. Б. Гельфрейху за интерес к работе, А. Б. Берлину, Г. М. Тимофеевой, Л. А. Стасюк, и Л. Н. Черкову за техническую помощь, оказанную в процессе выполнения работы.

## Литература

1. И. С. Шкловский. Физика солнечной короны. Изд. 2-е, ГИФМЛ, М., 1962.
2. К. де — Ягер. Строение и динамика атмосферы Солнца. ИЛ, М., 1962.
3. В. В. Железняков. Радиоизлучение Солнца и планет. Изд-во «Наука», М., 1964.
4. R. Kundu, Solar radio astronomy. Interscience, New-York, 1965.
5. M. Waldmeier, Z. Astrophys., 20, 195, 1940.
6. М. Вальдмайер. Результаты и проблемы исследований Солнца. ИЛ, М., 1950.
7. M. Waldmeier, Z. Astrophys., 40, 229, 1956.
8. В. Н. Ихсанова, Изв. Главн. астрон. obs., 21, вып. 5, № 164, 62, 1960.
9. Г. Б. Гельфрейх, Ш. Б. Ахмедов и др., Изв. Главн. астрон. obs., № 185, 167, 1970.
10. Е. Я. Злотник, Астр. ж. 45, 2, 310, 1968; 45, 3, 585, 1968.
11. С. К. Всехсвятский и др. Солнечная корона и корпускулярное излучение в межпланетном пространстве. Изд-во Киевского ун-та, 1965.
12. Д. В. Корольков, Н. С. Соболева, Г. Б. Гельфрейх, Изв. Главн. астрон. obs., 21, вып. 5, № 164, 81, 1960.
13. Г. Б. Гельфрейх, Д. В. Корольков и др. Радиоастрономия. Парижский симпозиум 1958 г. ИЛ, М., 1961, стр. 125.
14. Г. Б. Гельфрейх, Н. Г. Петерова, Астр. ж., 47, 4, 689, 1970.
15. Г. Альвен, К. Г. Фельтхаммер. Космическая электродинамика. Изд-во «Мир», М., 1967.
16. Н. П. Стасюк, сб. «Проблемы космической физики», вып. 6, стр. 45, 1971.
17. С. Б. Пикельнер, Астрон. ж., 38, 3, 552, 1961.
18. М. Марик, Астрон. ж., 43, 2, 400, 1966; 44, 2, 336, 1967.
19. М. А. Лившиц, В. Н. Обридко, С. Б. Пикельнер, Астрон. ж., 43, 6, 1135, 1966.
20. Я. Б. Зельдович и Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. Изд. 2-е, Изд-во «Наука», М., 1966.
21. А. Ф. Богородский. Магнитная гидромеханика. Изд. Киевского ун-та, 1966.
22. О. И. Юдин, Докл. АН СССР, 180, № 4, 821, 1968.
23. М. С. Дурасова, Г. А. Лавринов и др. Изв. высших учебных заведений, Радиофизика, 11, № 12, 1782, 1968.
24. О. И. Юдин. Автореф. канд. дисс., Горький, 1968.
25. R. V. Leighton, R. W. Noyes, G. W. Simon, Astrophys. J., 135, 2, 474, 1962.
26. Г. Б. Гельфрейх, О. Г. Деревянко и др. Бюллетень «Солнечные данные», изд-во «Наука», Л., № 9, 88, 1969.
27. Г. Б. Гельфрейх, Д. В. Корольков, Г. М. Тимофеева, Изв. Главн. астрон. obs., № 184, 85, 1968.
28. М. С. Дурасова, М. М. Кобрин и др. Астрон. цирк. № 531, 1, 1969.
29. И. Ф. Белов, М. М. Кобрин и др. Астрон. цирк. № 531, 3, 1969.
30. М. М. Кобрин, А. И. Коршунов, А. К. Чандаев, Астрон. цирк., № 575, 1, 1970.
31. М. М. Кобрин, Сборник докладов сессии Научного Совета по комплексной проблеме «Радиоастрономия» ИЗМИРАН СССР, 13—16 октября 1970, стр. 27—39, М., 1972.
32. M. Simon and F. J. Shimabukuro, Astrophys. J., 168, No. 3, I, 525, 1971.
33. M. S. Durasova, M. M. Kobrin, O. J. Yudin, Nature, Phys. Sci., 229, 3, 82, 1971.
34. М. С. Дурасова, Г. А. Лавринов и др., Бюллетень «Солнечные данные», изд-во «Наука», Л., № 8, 90, 1971.
35. Программа VII Всесоюзной конференции по радиоастрономии, стр. 19—20, Горький, 1972.
36. М. С. Дурасова, О. И. Юдин, Бюллетень «Солнечные данные», изд-во «Наука», № 7, 72, 1966.
37. Г. Б. Гельфрейх, Д. В. Корольков, Изв. Главн. астрон. obs., 21, вып. 5, № 164, 179, 1960.
38. М. Г. Серебrenников, А. А. Первозванский. Выявление скрытых периодичностей. Изд-во «Наука», М., 1965.
39. Г. Дженкинс, Д. Ваттс. Спектральный анализ и его приложения. Вып. 1, Изд-во «Мир», М., 1971.
40. Г. Ф. Теленин, Ф. В. Подсыпанин. Численные методы статистического анализа случайных процессов с помощью ЭЦВМ. Научные труды № 6. Институт механики Моск. гос. ун-та, М., 1970.
41. Бюллетень «Солнечные данные», изд-во «Наука», Л., № 5, № 6, № 7, 1969.
42. Helio-graphic Maps of the Photosphere for the Year 1969. By M. Baldmeier. Publikation der Eingenössischen sternwarte Zürich. Band 13, Heft 4. Zürich, 1970.
43. Bulletin of solar phenomena, 21, No. 2, No. 3, 1969. Tokyo Astronomical Observatory.