

Ш.Ш. Гусейнов

Шемахинская Астрофизическая Обсерватория им. Н.Туси НАН Азербайджана  
shirin.guseyn@gmail.com**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОЩНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК  
ПО РАДИО – ОПТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ**

**Аннотация.** В работе исследованы модуляции S-компоненты микроволнового излучения Солнца на частотах  $f=1-2$  ГГц и  $f=2-4$  ГГц. В качестве наблюдательного материала использовалось 40 изолированных солнечных вспышек мощностью  $\geq 2$  баллов, наблюдавшихся в 1979-82 гг. и 1989-90 гг. на радиотелескопе РТ-12 Института Ионосферы Республики Казахстан и РТ-22 Радиоастрономической станции физического института РАН. Путем радиоспектрографических измерений флуктуации спокойной атмосферы Солнца и в активных областях исследовались низкочастотные пульсации с характерным временем  $t_x \equiv 5-70$  мин. При исследовании предвспышечных состояний в центрах активности с развивающимися группами пятен, также в выбранные дни по Бюллетеню «Солнечные данные» визуально анализировались солнечные оптические карты и были вычислены числа пятен в каждой группе за 1-3 дня до вспышки с силой  $\geq 2$  баллов. Получено, что за 1÷3 дня до начала вспышки в радиоспектрах сантиметрового радиоизлучения Солнца усиливаются пульсации с периодами порядка  $t_x \geq 25$  минут. Методами статистического анализа динамического хаоса установлено, что при определенных условиях с приближением к вспышке турбулентный процесс в хромосфере Солнца постепенно переходит в детерминированный процесс со средним периодом  $T_x \geq 25 \pm 2$  мин. Сделан вывод о возможности использования этих пульсаций в качестве прогностических параметров мощных солнечных вспышек.

**Ключевые слова:** эволюция, орграф, системный анализ, интеллект.

**Введение**

Проблема проявлений вспышечной активности групп пятен в оптическом и микроволновом диапазонах излучения уже длительное время привлекает внимание исследователей. Вспышка на Солнце представляет собой обширный комплекс явлений с чрезвычайно сложным развитием в пространстве и во времени. Эволюция этих событий охватывает большой объем атмосферы Солнца, начиная с нижней хромосферы и кончая короной. Многолетним интенсивным исследованиям в этих диапазонах подтверждено, что неоднородность атмосферы Солнца имеет как регулярную, так и нерегулярную составляющие.

В результате длительных исследований, накоплен большой материал о существовании квазипериодических пульсаций (КПП) в «активных» и «спокойных» областях Солнца [1,2]. Хотя к настоящему времени предложен ряд механизмов этого явления, природа КПП до сих пор не установлена [3]. Основная трудность заключается в очень низком отношении сигнала к шуму для радиоизлу-

чения Солнца (амплитуда флуктуации составляет  $10^{-3} \div 10^{-4}$  от уровня общего радиоизлучения Солнца).

Из вышесказанного следует, что для точного решения поставленной задачи, несомненный интерес представляет определение характерных параметров нестационарности, т.е. его предсказание и анализ.

Целью этой работы является выявление прогностического параметра Солнечной активности.

Для этого выполняется анализ рядов записи микроволнового радиоизлучения S-компоненты  $F_{7.5} - F_{15}$ , которые являются показателями вспышечной активности Солнца.

О методике измерений и результатах предварительной обработки полученных спектров более подробно было изложено в работе [1,2]. Обработка полученных радиоспектров с помощью методов максимальной энтропии (ММЭ), спектрально-временного (СВАН) и фрактального анализов (МФА) были приведены в работах [4, 5].

### Использованный экспериментальный материал и его обработка

Ряд данных включал в себя 40 вспышечных событий. Для его обработки применялись спектрально-временной анализ (СВАН), метод максимальной энтропии (ММЭ), и фрактальной анализ. С помощью применения модифицированного метода, основанного на теории детерминированного хаоса, оценивалась энтропия и фрактальная размерность анализируемого временного ряда.

В качестве исходных данных использованы материалы наблюдений 1979-82 гг. и 1989-90 гг. Материал был получен на радиотелескопах РТ-22 (Радиоастрономическая станция физического института РАН) и РТ-12 (Института Ионосферы Республики Казахстан). На основании измерения интенсивности в диапазоне  $\lambda = 3$  см и флуктуации наклона спектра медленно меняющегося S-компонента радиоизлучения Солнца в широких диапазонах  $f = 1-2$  ГГц и  $f = 2-4$  ГГц проведен сравнительный анализ наклона спектра S-компонента радиоизлучения активных областей с их вспышечной активностью. Радиоспектрографы, работающие последовательным режиме в диапазонах 1-2 ГГц и 2-4 ГГц были разработаны А.М. Гусейновым, соответственно 1975 и 1978 г. Наблюдения за Солнцем проводились с 8<sup>00</sup> часов утра до 18<sup>00</sup> часов вечера (по местному времени). Время снятия одного спектра по диапазону  $f = 1-2$  ГГц и  $f = 2-4$  ГГц составило 2 минуты в одну сторону. Далее, в спектре S-компонента радиоизлучения Солнца вычислялась разность между интенсивностью сигнала в начале и в конце спектра  $\Delta I_i(t)$ . Соответствующий временной ряд  $\Delta I_i(t)$  – содержит информацию за последовательные 7-8 часов в сутки, что составляет ~250-300 значений, это является вполне достаточным для анализа модуляции изменяющихся с характерным временем  $t_x$  – в интервале от 5 мин до 70 минут.

При исследовании предвспышечных состояний в центрах активности с развивающимся группами пятен, также в выбранные дни по Бюллетеню «Солнечные данные» и «Solar – Geophysical Data» визуально анализировались солнечные оптические карты и были определены числа пятен в каждой

группе за 1-3 дня до вспышки с силой  $\geq 2$  баллов [10, 11].

### Результаты обработки экспериментальных данных

На рис.1 приведены две гистограммы, иллюстрирующие зависимость частоты появления пульсации от её характерного изменения. Были выделены два поддиапазона с характерным временем  $t_x \approx 5-15$  мин. (рис. 1 а) и  $t_x \approx 25-70$  мин. (рис. 1 б). Как видно из графиков рис. 1 а, наиболее часто встречаются пульсации с характерным временем  $t_x$ , близком к 5 мин. Исследователи в основном считают, что такая модуляция определяется глобальными осцилляциями Солнца как газового шара. Одним из возможных механизмов возбуждения пульсаций с периодами около 10 мин. является параметрический резонанс, возникающих в корональных магнитных петлях подходящей длины. В результате взаимодействия с ними происходят возбуждения субгармоники с частотами  $\omega/2$  (10 мин). На рис. 1 б приведена пульсации с характерным временем  $t_x \approx 25-70$  мин. Из графиков видно, что наибольшую частоту появления имеет осцилляция с характерным временем  $t_x \approx 30$  мин.

Для интерпретации полученных результатов, рассмотрим один из возможных механизмов возникновения пульсаций с характерным временем  $t_x \geq 25$  мин в области пятен, которые получили большую популярность среди специалистов за последние 8 лет. Механизм, предложенный А.А. Соловьевом и Е.А. Кричком, называется моделью мелких солнечных пятен [6]. В этой модели имеется несколько типов собственных колебаний. Первый тип осцилляций представляет собой возвратные вращательные движения пятен, в целом или отдельных деталей их структуры. Второй тип пульсаций связан с изменением площади пятен или радиального расстояния между его фрагментами. С этим же типом пульсаций с характерным временем связаны изменения напряженности магнитного поля пятен и вариации интенсивности сантиметрового радиоизлучения. Первый и второй типы пульсаций относятся к пульсациям с характерным временем  $t_x \geq 25-70$  мин.

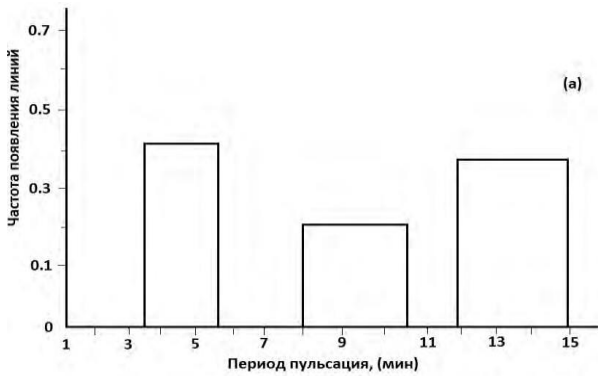


Рисунок 1 (а) – Частота появления пульсации с характерным времени ( $t_x \approx 5-15$  мин.) в радиоизлучении Солнца на частотах  $1.25 \text{ ГГц} \div (1.6 - 1.9) \text{ ГГц}$  и  $(3.6 - 3.9) \text{ ГГц}$ . Наибольшей частотой появления обладает 4-5 мин. пульсаций.

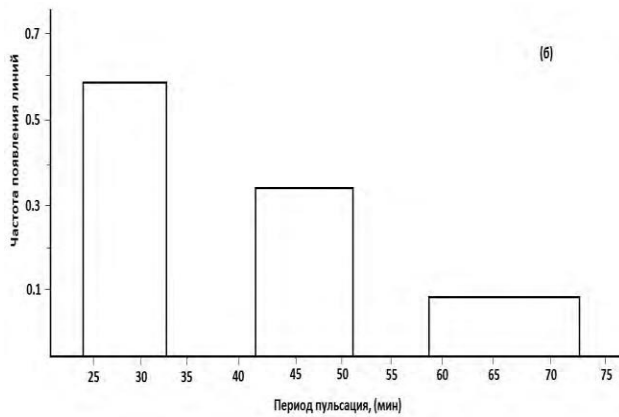


Рисунок 1 (б) – Частота появления пульсаций с характерным времени ( $t_x \approx 25-70$  мин) в радиоизлучения Солнца на частотах  $1.25 \text{ ГГц} \div (1.6 - 1.9) \text{ ГГц}$  и  $(3.6 - 3.9) \text{ ГГц}$ . Наибольшей частотой появления обладает 25-30 мин. пульсаций.

Помимо этого, можно наблюдать группу пятен с развивающейся активностью. Наши исследования показали, что спектр мощности, полученный при относительно спокойном состоянии пятен, показывает многочисленные неустойчивые пики, соответствующих разным пульсациям с характерным временем в интервале от 5 до 70 мин. В случае, когда группы пятен развиваются (увеличиваются площади отдельных пятен и число пятен) наблюдается спектр мощности, в котором исчезают многие периоды пульсаций в интервале от 5 до 15 минут и при этом остается более длинные пульсации с характерным временем  $t_x \geq 25$  минут. Мы предполагаем, что причина исчезновения опреде-

ленной части коротких порядков пульсаций являются новые осцилляции, которые возникают в активизирующихся областях пятен и способствуют затуханию прежних флуктуаций. Вследствие такого затухания в спектрах мощности наблюдаются пики, соответствующие осцилляциям с характерным временем  $t_x \geq 25$  мин [7 - 9].

На рис. 2. приведены усредненные относительные спектры (спектры усреднялись за день) S-компоненты радиоизлучения Солнца в диапазоне 2-4 ГГц, полученные с 12/VI-1989 г. по 16/VI-1989 г. 15/VI-1989 г. произошли длительные вспышки (1.5 час) с мощностью  $>2$  п баллов. Как видно из рис. 2, наибольшие изменения в спектре (в зависимости от повышения солнечной активности) происходят в диапазоне  $f=3.4 \div 4.8 \text{ ГГц}$ .

Обработка временных рядов построенных на основе радиоспектрографических измерений на частоте  $f=1 \div 4 \text{ ГГц}$  методом фрактального анализа в сравнении с методами спектральных анализов ММЭ и СВАН дает лучшие результаты анализа динамических процессов.

Для определения оценки времени предсказания  $T_n$  детерминированной хаотической системы вычисляют значения корреляционного интеграла [12].

$$C_d(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H\left(r - \left| \frac{x_i}{x_j} - \frac{x_j}{x_i} \right| \right) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{N_j(r)}{N} \quad (1)$$

где  $H(x)$  - функция Хевисайда, которая равна единице при положительных  $x$  и нулю - при остальных значениях,  $d$  - размерность пространства вложения.

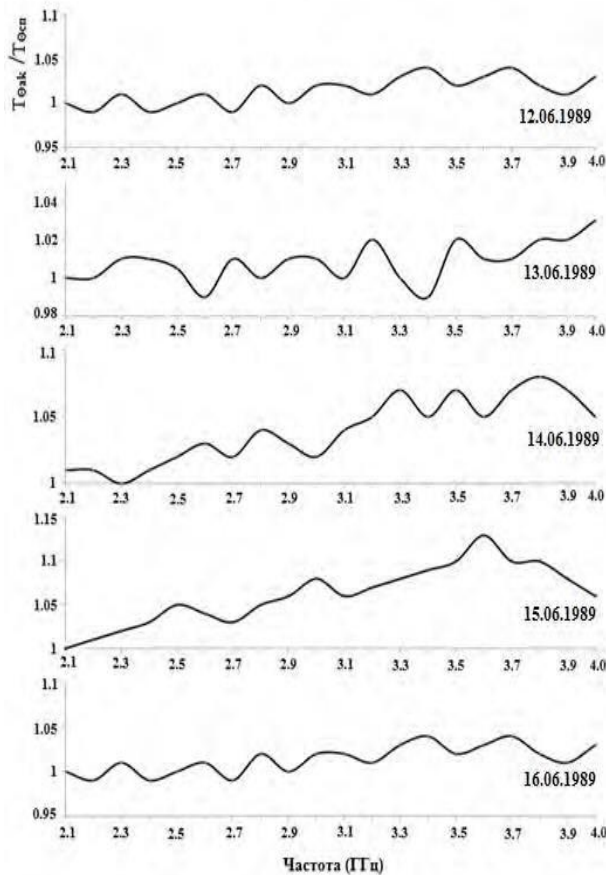


Рисунок 2 – Усредненные (за 1 день) относительные спектры S-компонента радиоизлучения Солнца в диапазоне 2-4 ГГц, полученные с 12.VI.1989 г. по 15.VI.1989 г.

Затем образуются  $d$ -мерные векторы  $x_n$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , координаты которых состоят из  $x$  выборок с последовательно возрастающими  $\tau$ -сдвигами, то есть

$$x_n = \{x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (d-1)\tau)\}, \quad (2)(2)$$

где  $\tau$  - время задержки.

При достаточно большом сдвиге векторы становятся независимыми. Оптимальную задержку  $\tau$  солнечных временных рядов также определяют с помощью автокорреляционной функции  $A(\tau) < 0,5$ . Значения  $\tilde{N}_d(r)$  используются для определения корреляционной энтропии  $K_2$ , являющейся оценкой снизу энтропии Колмогорова в динамической системе  $K_2$  [13]:

$$K_2 = \frac{1}{\tau_m} \ln \frac{C_d(r)}{C_{d+m}(r)} \quad (3)$$

На основе обратной зависимости между корреляционной энтропией и временем предсказания состояния динамической системы находят оценки  $T_n$ .

### Заключение

На основании проведенных исследований (в радио и оптических диапазонах) и полученных количественных оценок, были сделаны следующие выводы:

1) Получено, что частотный спектр S-компоненты радиоизлучения Солнца в диапазонах  $f = 1-2$  ГГц и  $f = 2-4$  ГГц имеется «тонкая структура» с размерами, соответственно, 70-120 МГц и 100-200 МГц.

2) Построенные временные ряды по вариации потоков S-компоненты  $F_{7.5}-F_{15}$  – в основном содержат пульсации с характерным временем больше чем  $t_x \geq 25$  мин. за 1-3 дня до вспышки с уровнем  $\geq 2$  балла.

3) Из 40 мощных солнечных вспышек в 35 (~ 88%) случаях на поверхности Солнца число пятен в группах уменьшается (~ 20 ÷ 50%) за 1-3 дня до вспышки с силой  $\geq 2$  балла.

4) На вспышки с силой  $\geq 2$  f и 2 b за 1-3 дня в группах количество пятен примерно стабильно или увеличивается (30- 50%).

5) Получено, что после мощных солнечных вспышек с силой  $\geq 2$  баллов количество пятен в группах увеличивается ~ 1.5 – 2 раза.

Таким образом, обнаружено, что наблюдаемые пульсации с характерными минутными измерениями времени  $t_x \geq 25$  в сантиметровом диапазоне радиоизлучения Солнца, увеличение и уменьшение числа пятен в группах, возможно является одним из критериев для предсказания солнечных вспышек с мощностью  $\geq 2$  баллов за 1-3 дня до начала событий.

### Список литературы

- 1 Ш.Ш. Гусейнов. О солнечной и атмосферной природе флуктуаций сантиметрового радиоизлучения Солнца. Диссерт. на соискан. канд.физ.-мат.наук, Ашгабат 1993, с 155;
- 2 А.С. Гребинский, Ш.Ш. Гусейнов. Механизмы формирования флуктуаций радиоиз-

лучения спокойного Солнца. Изв. БГУ, Т. XX, №2, 2004, с 123-127;  
3 А.С. Гребинский, Ш.Ш. Гусейнов. Пуассоновские модели формирования флуктуаций радиоизлучения Солнца. Изв. БГУ, Т. XX, № 22, 2004, с 135-139;  
4 А.М. Гусейнов. Исследование спектрографических измерений спектра S-компонента радиоизлучения Солнца в диапазоне  $f=1 \div 4$  ГГц. Диссерт. на соискан. канд. физ.-мат. наук, Москва 1987, с 160;  
5 А.М. Гусейнов, Ш.Ш. Гусейнов. Спектрографические измерения спектра S-компонента радиоизлучения Солнца в диапазоне  $f=1-2$  ГГц. Астрон. Циркуляр АН СССР, 1982, № 1242, с 3-5;  
6 А.А. Соловьев, Е.А. Киричек. Солнечная и солнечно-земная физика. Тр. XII-Пулковской международ. конф. по физике Солнца. С.Петербург, Пулково, 2008, с 349;  
7 А.Р. Аббасов, Ш.Ш. Гусейнов, В.М. Сомиков. Об определении спектрального состава

ва радиоизлучения Солнца на длине волны  $\lambda=3\text{см}$  методом спектрально-временного анализа. Радиоизлучение Солнца. Изд. ЛГУ, город Ленинград, Вып. 5, 1984, с 164-170;  
8 А.М. Гусейнов, Ш.Ш. Гусейнов. Оценка времени предсказуемости в солнечной атмосфере. Изв. НАН Азерб. 2002, № 5, с 127-131;  
9 Ш.Ш. Гусейнов, И.Г. Гахраманов. 95 лет БГУ, Современ. пробл. физики. Материалы VIII – Респуб. конферен., 24-25 декабря 2014, с 129-132;  
10 Бюллетень «Солнечные данные» 1979-82 гг и 1989-90 гг.;  
11 Solar-Geophysical Data, 1979-82, 1989-90;  
12 Д.М. Ваврив, В.Б. Рявов. Проблемы вычислительной математики и математической физики. 1989, 29, с 987;  
13 P. Grasberger, J. Procaccia, Phys. Rev. Lett., 1983, 50/ 346 p.

Принято в печать 20.10.14

### Ш.Ш. Гусейнов

*Н.Туси атындагы Шемахин Астрофизикалык Обсерваториясы, НАН Азербайджан*  
[shirin.guseyn@gmail.com](mailto:shirin.guseyn@gmail.com)

## РАДИО – ОПТИКАЛЫҚ СИПАТТАМЛАРЫ БОЙЫНША ҚУАТТЫ КҢН ЖАРҚЫЛДАРЫН БОЛЖАУ

**Аннотация.** Бұл жұмыста Күннің микротолқындық сәулеленуінің  $f=1-2$  ГГц және  $f=2-4$  ГГц жиіліктеріндегі S-компонентінің модуляциясы зерттелінді. Бақылау материалдары ретінде 1979-82 жж. және 1989-90 жж. аралығындағы Қазақстан Республикасы Ионосфера институтының РТ-12 телескопындағы және РТ-22 РФА физикалық институтының Радиоастрономиялық станциясында бақылған 40 оқшауланған  $\geq 2$  балдан жоғары қуатылығындағы күн тұтанулары қолданылды.

Күн атмосферасының белсенді аймақтарында байсалды флуктуациясын радиоспектрографиялық жолмен  $t_x \equiv 5-70$  мин. сипаттамалық уақыттағы төменгі пульсациясы зерттелінді. Дамушы дақтарының топтары белсенділігінің орталығындағы жарқыл алдындағы күйді зерттеу кезінде, сонымен қатар «Күн мәліметтері» Бюллетені бойынша таңдалған күндерін күннің оптикалық картасы көзбен талданылды және әрбір топтағы тұтынуға дкйінгі 1-3 күндер аралығындағы  $\geq 2$  баллдан жоғары күштегі дақтар саны есептелінді. Жарқыл бастамасының  $1\div 3$  күн аралығында радиоспектрлерінің Күннің сантиметрлік радиосәулеленуіне  $t_x \geq 25$  минут дәрежедегі периодтағы пульсациямен ұлғаяды. Динамикалық хаостың статистикалық талдау әдістері белгілі бір алғышарттардың кезінде Күн хромосферасының тұтынуының турбуленттік процестері біртіндеп  $T_x \geq 25 \pm 2$  мин. орташа периодтағы детерминді процеске айналатындығы туралы бекітілген. Қуатты күн жарқылын болжау параметрлері ретінде бұл пульсациялардың қолдану мүмкіндіктері туралы қорытынды жасалынған.

**Кілт сөздер:** күн тұтынулары, радиосәулелену, динамикалық хаос.

**Sh.Sh.Guseynov**

*Shemakha Astrophysical Observatory named N. Tusi of Azerbaijan National Academy of Sciences  
[shirin.guseyn@gmail.com](mailto:shirin.guseyn@gmail.com)*

## **FORECASTING OF POWERFUL SOLAR FLARES BY RADIO - OPTICAL CHARACTERISTICS**

**Abstract.** In this paper we studied the modulation S-component of the microwave radiation of the sun at frequencies  $f=1-2\text{Ghz}$  and  $2-4\text{Ghz}$ . For the study we used 40 isolated solar flares with power  $\geq 2$  points obtained from the radio telescope RT-12 of Institute of Ionosphere of the Republic of Kazakhstan and RT-22 radio astronomy station of Institute of Physics RAS in the period 1979-1982 and 1989-1990. In active regions were studied low-frequency pulsations with characteristic time  $t_x \equiv 5-70$  minutes, using radio and spectrographic measurements of fluctuations in calm atmosphere of the Sun. . In the study of state of pre- flare at the active centers of a growing group of spots, in the selected days of the bulletin "Solar data" we visually analyzed solar optical cards, and we calculated the numbers of spots in each group for 1-3 days before the outbreak with a force  $\geq 2$  points. The result is that the 3 days prior to the the start of the outbreak in the radio spectrum of the solar radio emission of centimeter range there has been increasing of ripple with period about  $t_x \geq 25$  minutes. Using the methods of statistical analysis of dynamic chaos it was found that under certain conditions, with the approaching to the outbreak, turbulent processes in the chromosphere of the Sun is gradually transformed into the deterministic process with a mean  $T_x \geq 25 \pm 2$  min. We have conclusion about the possibility of using these pulsations as prognostic parameters of powerful solar flares.

**Key words:** evolution, orgraph, system analysis, intelligence.