

УДК 523.164.32

О ВОЗМОЖНОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ИЗУЧЕНИЮ ПРЕДВСПЫШЕЧНЫХ ЯВЛЕНИЙ В СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЕ ПУТЕМ АНАЛИЗА ФЛУКТУАЦИЙ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

Е. А. Аверьянихина, М. М. Кобрин, И. Я. Орлов

Проведен комплексный анализ наблюдений флуктуаций радиоизлучения Солнца частоты 755 МГц на радиотелескопе РТ-10 РАО в год солнечного максимума. Изучались характер изменения амплитуд, энергетические спектры и функции плотности вероятностей до и после вспышек. Путем сравнения наблюдаемых характеристик флуктуаций с характеристиками, полученными моделированием взаимодействия различных шумовых и квазипериодических процессов, обосновываются возможности изучения процессов в активных областях как в некоторых параметрических системах. Сравнение результатов обработки наблюдений флуктуаций радиоизлучения в предвспышечные периоды с результатами моделирования указывает на модуляционно-мультипликативный характер взаимодействия шумового излучения и квазипериодических процессов на Солнце при общей нестационарности процессов.

Одним из наиболее важных вопросов в исследованиях физики активных областей Солнца является изучение предвспышечных процессов в солнечной плазме. Предвспышечные состояния характеризуются накоплением энергии и возникновением различных неустойчивостей. В настоящее время существует ряд гипотез о физике предвспышечных процессов, но пока нет еще достаточно убедительного обоснования реальности высказанных предположений. При создавшемся положении экспериментальные исследования, открывающие возможности изучения предвспышечных явлений, особенно важны. К числу таких исследований относится изучение флуктуаций радиоизлучения активных областей, которые в предвспышечные периоды испытывают существенные изменения: увеличение интенсивности, возрастание квазипериодических пульсаций (КПП) и появление новых КПП, изменение функций вероятностей распределения амплитуд (см. обзор [1] и [2, 3]). Некоторые дополнительные возможности получения информации о процессах в активных областях возникают, если рассматривать их как плазменные параметрические системы. Поскольку изучение флуктуаций в параметрических системах может дать новую информацию о происходящих в них процессах [4], мы попытались рассмотреть возможности применения параметрического подхода при исследованиях флуктуаций предвспышечного радиоизлучения Солнца. Нами был проведен комплексный анализ флуктуаций, включающий изучение характера изменений амплитуд, энергетических спектров и функций плотности вероятности (ФПВ). Были использованы данные наблюдений интегрального радиоизлучения Солнца на частоте 755 МГц, проводившихся в Радиоастрофизической обсерватории АН Латвийской ССР (РАО) на радиотелескопе РТ-10 с июня по август 1979—1980 гг. (в год солнечного максимума*).

* Как показано в работе [5], влиянием атмосферы Земли, в том числе и ионосферы, для дециметрового радиоизлучения Солнца можно пренебречь.

Экспериментальные исследования проводились с большим количеством наблюдений (~ 100 дней, из них для анализа отобрано 40 записей). В период наблюдений нами было зафиксировано двенадцать мощных (длительностью более одного часа) радиовсплесков, связанных с протонными вспышками. (Для этих наблюдений имеется пять записей флуктуаций радиоизлучения до и после радиовсплеска, десять записей только до радиовсплеска, семь записей только после радиовсплеска.)

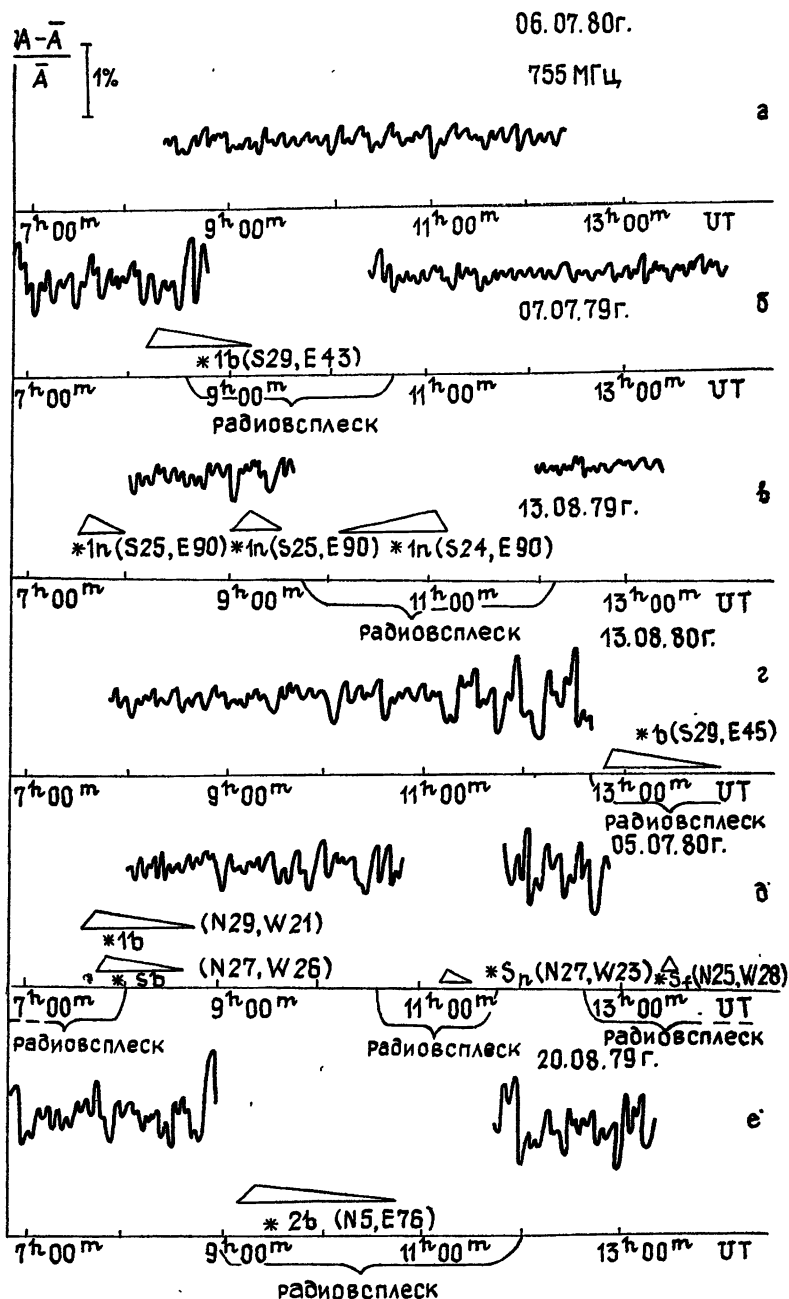


Рис. 1.

На рис. 1 показаны записи флуктуаций радиоизлучения Солнца на частоте 755 МГц для нескольких дней наблюдений, когда были зафиксированы радиовсплески. По оси ординат отложена относительная амплитуда, по оси абсцисс—время. Под записью—данные о солнечной активности (балл H_{α} -вспышки, длительность координаты). Из рассмотрения записей видно, что за 1—3 часа перед изолированной по времени вспышкой, сопровождаемой радиовсплеском (рис. 1б, в), амплитуда флуктуаций в среднем более чем в 2—3 раза выше, чем амплитуда флуктуаций по окончании радиовсплеска. Это имеет место при всех наблюдениях, где фиксировались записи до и после радиовсплеска.

Анализ записей показывает, что в пяти случаях перед радиовсплеском наблюдается постепенное, за 2—4 часа (см., например, рис. 1г, д), и в двух случаях резкое, за 1—2 часа (см., например, рис. 1е), нарастание амплитуды флуктуаций. В остальных случаях время записи до радиовсплеска недостаточно для определения характера нарастания амплитуды флуктуаций. Тем не менее, сравнение с записью флуктуаций радиоизлучения спокойного Солнца (рис. 1а) позволяет сделать вывод о типичности самого эффекта нарастания амплитуды флуктуаций перед радиовсплеском. Анализ записей (см. рис. 1б, в) показывает, что по окончании радиовсплеска амплитуда флуктуаций резко уменьшается, стремясь к величине, характерной для спокойного Солнца. Однако иногда имеет место сохранение и даже нарастание амплитуды флуктуаций после всплеска, что обусловлено многократностью вспышек в данном интервале наблюдений (рис. 1д) или сложным характером солнечной активности (рис. 1е).

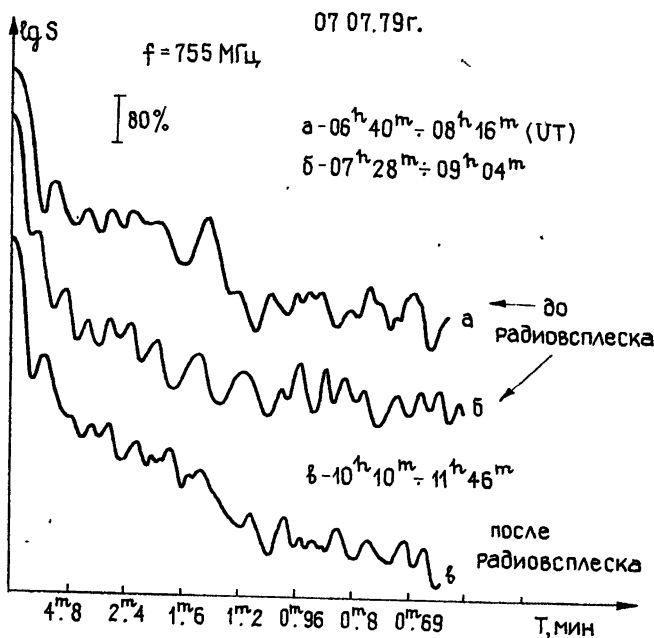


Рис. 2.

На рис. 2 приведены спектры флуктуаций для последовательных интервалов записи длиной 90 минут со сдвигом 48 минут, полученные до и после радиовсплеска 07.07.79 г. На рис. 3 приведены функции плотности вероятности при этих интервалах для записи флуктуаций радиоизлучения Солнца на частоте 755 МГц за 07.07.79 г. (кривая 1)

и за 20. 08. 79 г. (кривая 2). Спектральная обработка результатов наблюдений проводилась по методу Блекмона—Тюки, а вычисление ФПВ амплитуды флуктуаций по общепринятой методике [6,7].

Рассмотрим динамику этих статистических характеристик. Перед радиовсплеском (за 1,5—2 часа) в спектрах наблюдается увеличение числа максимумов при одновременном выравнивании их амплитуд в пределах интервала достоверности (ср. рис. 2а, б). Происходит существенная деформация ФПВ, отличительным признаком которой является многомодовость функции распределения: появление второго (рис. 3а), а также третьего (рис. 3б) максимумов.

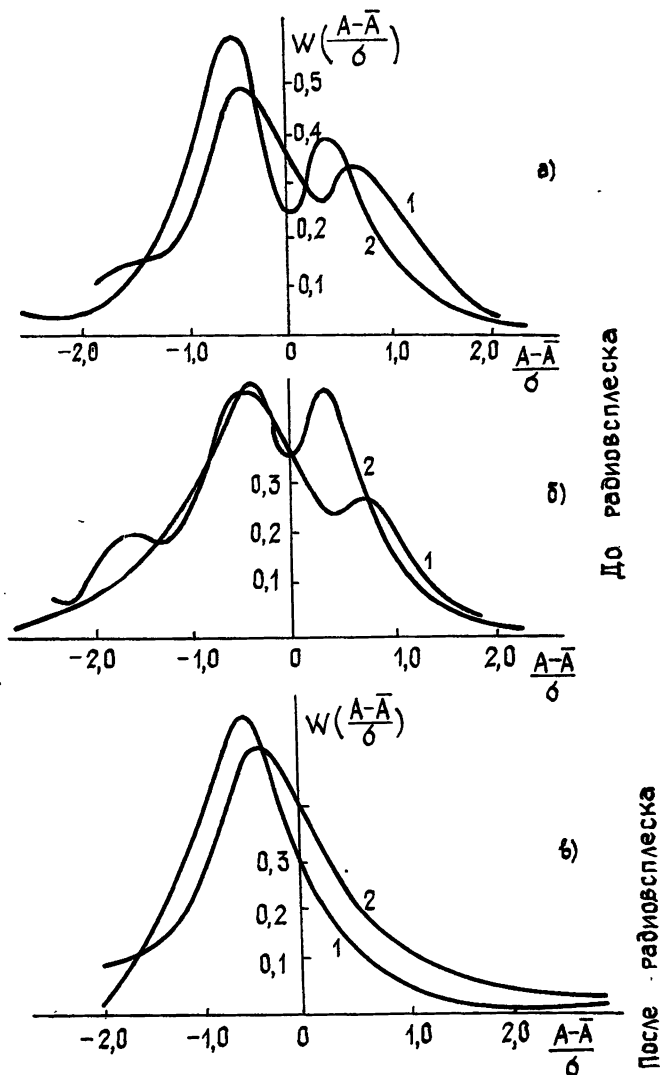


Рис. 3.

По окончании всплеска в течение 1—2 часов спектр, сохраняя шумовой характер, сглаживается по сравнению с предвспышечным (см. рис. 2в). Форма ФПВ приближается к рэлеевской — рис. 3в (за исключением тех случаев, когда амплитуда флуктуаций начинает увеличиваться перед следующим всплеском).

Указанная динамика статистических характеристик имела место при всех наблюдениях, связанных с мощными радиовсплесками. В

относительно спокойные периоды, а также при большом числе всплесков, следующих друг за другом, ФПВ гладкие, и выделить какие-либо закономерности в динамике ФПВ и спектров не удается.

Полученные в результате наблюдений статистические характеристики флуктуации радиоизлучения Солнца не могут непосредственно дать достаточную информацию о физических процессах, их определяющих. Единственный путь в данной ситуации — рассмотрение возможных моделей, которые могут помочь в интерпретации наблюдаемых явлений.

В качестве первого шага мы попытались провести моделирование, исходя из гипотезы об излучении «черного ящика», в котором происходят некоторые взаимодействия шумовых и квазипериодических процессов.

Учитывая возможность и аддитивного, и мультипликативного характера взаимодействия флуктуаций излучения, результат такого взаимодействия можно представить в виде

$$U(t) = \alpha U_{\text{ш}}(t) U_{\text{м}}(t) + \beta U_{\text{а}}(t),$$

где $U_{\text{ш}}(t)$ — флуктуации шумового излучения, $U_{\text{м}}(t)$ — мультипликативная составляющая, $U_{\text{а}}(t)$ — аддитивная составляющая, α , β — весовые коэффициенты мультипликативной и аддитивной составляющих.

Аналитически рассмотреть эту модель при различных законах распределения флуктуаций составляющих не удается. Полное исследование этой модели проводилось вычислительными методами (на ЭВМ) и путем аналогового моделирования с использованием специализированной измерительной аппаратуры.

Определение деформаций ФПВ флуктуаций процесса $U(t)$ по сравнению с ФПВ исходных процессов $U_{\text{ш}}(t)$, $U_{\text{м}}(t)$, $U_{\text{а}}(t)$ проводилось в широком диапазоне изменения их вероятностных характеристик. Рассмотрены комбинации процессов со следующими ФПВ: гауссовой, экспоненциальной, рэлеевской, равномерной и ФПВ квазипериодического процесса. Математически моделирование проводилось по общепринятой методике вычисления ФПВ результирующего случайного процесса [8]. В целях аналогового моделирования использовалось радиоэлектронное выполнение операций суммирования и перемножения в низкочастотной области с регистрацией на цифровом анализаторе вероятностных характеристик типа Х6-8. В качестве примера на рис. 4 приведены некоторые результаты аналогового моделирования: ФПВ флуктуаций результирующего процесса при мультипликативно-модуляционном взаимодействии флуктуаций КПП $U_{\text{м}}(t)$ и нормально распределенного шумового излучения $U_{\text{ш}}(t)$.

Результаты численного и аналогового моделирования показывают следующее:

1) ФПВ имеет «двухгорбую» форму только при взаимодействии (аддитивном или мультипликативном) флуктуаций шумового излучения с излучением, имеющим также «двухгорбое» распределение. (Напомним, что «двухгорбое» распределение является типичным для распределения флуктуаций излучения автогенератора [8].)

2) Взаимодействие флуктуаций излучения, имеющего «гладкое» распределение (гауссово, рэлеевское, равномерное и т. д.), может привести только к «гладкому» распределению флуктуаций результирующего излучения.

3) При мультипликативном и аддитивном взаимодействии флуктуаций централизованного ($U_{\text{ш}}=0$) шумового излучения $U_{\text{ш}}(t)$ мощностью $P_{\text{ш}}$ с квазипериодическим случайным процессом мощностью $P_{\text{кпп}}$ при $P_{\text{кпп}} > P_{\text{ш}}$ появляется симметричная «двухгорбость» результирующего распределения.

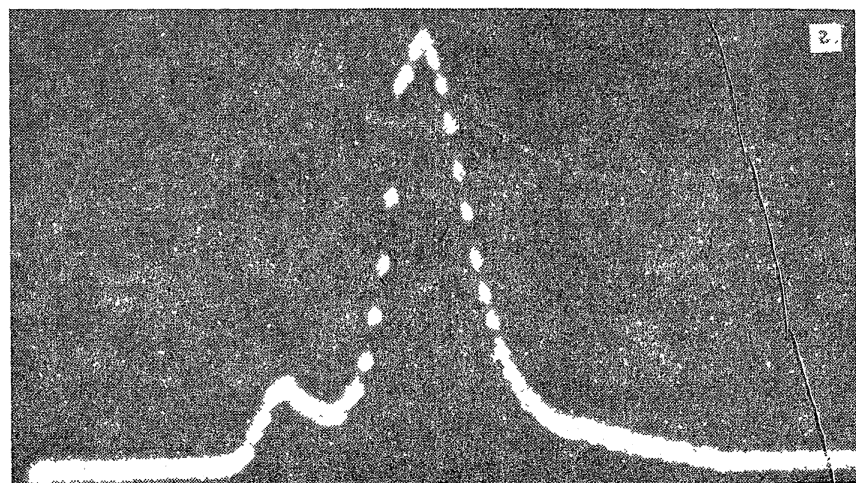
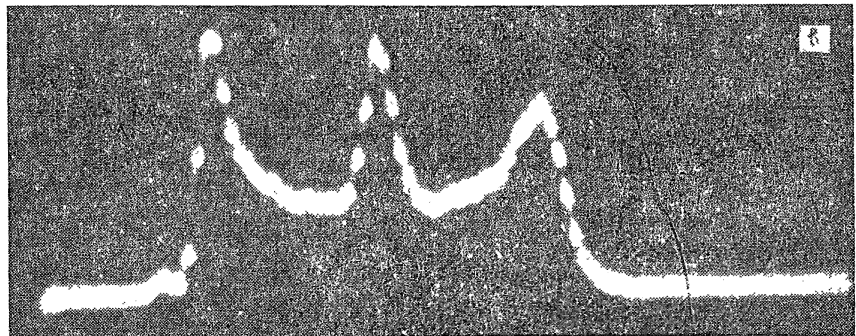
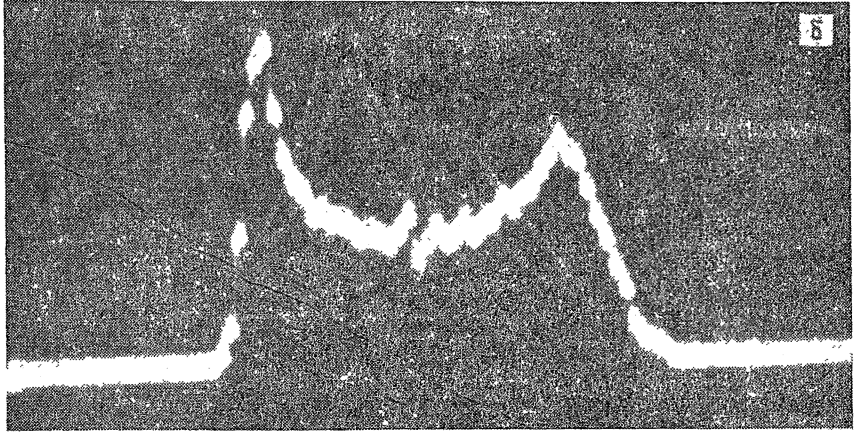
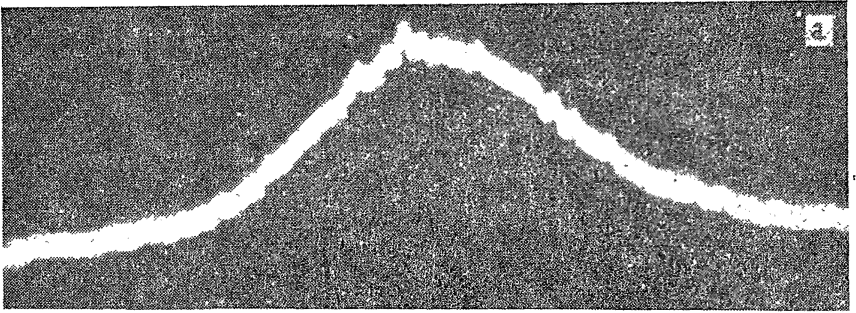


Рис. 4

4) Мультипликативное взаимодействие нецентрированного шумового излучения ($U_{ш} \neq 0$) с квазипериодическим случайным процессом $U_m(t)$ (даже при условии $P_{кпп} \leq P_{ш}$) может сопровождаться проявлением двухгорбости ФПВ и ее деформацией (см. рис. 4а, $\overline{U_{ш}}/\sigma_{ш}=0$, $U_m/\sigma_{ш}=2$, и рис. 4б, $U_{ш}/\sigma_{ш}=8$, $U_m/\sigma_{ш}=1$).

Аддитивное взаимодействие таких процессов не приводит к деформации двухгорбового распределения.

5) Распределение флуктуаций аддитивно взаимодействующих статистически независимых КПП (более трех и близкой амплитуды) приближается к гауссову. Взаимодействие этих компонент с шумовым излучением эквивалентно взаимодействию двух шумовых излучений, т. е. ФПВ результирующего излучения не имеет особенностей, проявляющихся в «двухгорбости» ФПВ.

При наличии взаимной когерентности между отдельными КПП следует ожидать эффекта деформации ФПВ аналогично рассмотренному ранее при взаимодействии одного интенсивного КПП с шумовым излучением.

6) К существенным деформациям ФПВ флуктуаций результирующего излучения может привести нестационарность амплитудных флуктуаций и постоянных составляющих взаимодействующих процессов. В зависимости от характера нестационарности (быстрота, длительность) форма ФПВ изменяется и претерпевает различные деформации. Так, возможно появление двух и более несимметричных максимумов. На рис. 4в, 4г в качестве примера приведены результаты физического моделирования мультипликативного взаимодействия шумового излучения и квазипериодического процесса с нестационарной амплитудой. Кратковременное по отношению к времени анализа $T_{ан} (\Delta t/T_{ан} = 0,05)$ уменьшение мощности квазипериодической составляющей от $U_m/\sigma_{ш} = 10$ до $U_m/\sigma_{ш} = 0,5$ приводит к появлению центрального максимума на ФПВ в области математического ожидания шумового излучения. Длительное ($\Delta t/T_{ан} = 10$) увеличение амплитуды мультипликативной квазипериодической компоненты (на рис. 4г — от $U_m/\sigma_{ш} = 0,5$ до $U_m/\sigma_{ш} = 10$) также приводит к существенным деформациям ФПВ результирующего процесса — появлению несимметричного максимума.

7) Параметрическое взаимодействие шумового излучения с мощной, но нестационарной по частоте КПП не приводит к особенностям в энергетическом спектре (он остается сплошным). Однако такое взаимодействие приводит к существенной деформации ФПВ (появление провала).

Сравнение результатов обработки наблюдения флуктуаций солнечного радиоизлучения с результатами моделирования указывает на модуляционно-мультипликативный характер взаимодействия шумового излучения и квазипериодических процессов на Солнце. Специфические деформации ФПВ флуктуаций шумового сигнала, аналогичные полученным при моделировании мультипликативного взаимодействия, наблюдались ранее при исследовании прохождения шумового сигнала через параметрическую систему [4].

Итак, совпадение эффектов динамики ФПВ, полученных по результатам наблюдений в предвысшечный период и по результатам аналогового и математического моделирования, а также сравнение их с результатами экспериментальных исследований параметрических систем дает основание для рассмотрения процессов солнечной активности как процессов в параметрической системе. Как уже отмечалось выше, попытки параметрического подхода делались и ранее. Однако при этом теоретически рассматривались только возможности параметрической генерации тех или иных видов колебаний. Результаты проведенной статистической обработки флуктуаций позволяют высказать

гипотезу о возможности рассмотрения активной области как некоей параметрической системы, в которой в предвспышечный период развиваются процессы неустойчивости. Эти процессы наиболее четко проявляются в многомодовости ФПВ, являющейся, по-видимому, следствием параметрического взаимодействия достаточно интенсивных единичных КПП или нескольких когерентных между собой КПП с фоновым шумовым излучением Солнца. Возникновение нескольких когерентных КПП может быть следствием как возникающих перед вспышками значительных нелинейностей плазмы в активных областях (например за счет увеличения турбулентности или взаимодействия волн [9]), так и гармоник, определяемых геометрическими размерами структуры, в которой возникает неустойчивость.

Необходимо обратить внимание на возможную нестационарность по частоте КПП, что не позволяет обнаружить их путем рассмотрения энергетических спектров без исследования ФПВ флуктуаций. При физической трактовке предвспышечных процессов в активной области необходимо учитывать механизм нестационарности параметров шумового излучения. Таким механизмом может быть, по-видимому, наличие длительно действующего потока, вызывающего перестройку магнитного поля. Используемый нами подход может быть вполне объединен с трактовкой активных областей в виде некоторых эквивалентных электрических контуров, рассматриваемых Спейсером [10] и Джонсоном [11] при объявлении механизмов возникновения вспышек и нагрева короны.

Приведенные результаты могут быть использованы для физической трактовки предвспышечных явлений, а также при решении задач прогнозирования солнечной активности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кобрин М. М. — Phys. Sol., 1976, 2, p. 3.
2. Аверьянихина Е. А., Кобрин М. М. — Астрон. циркуляр АН СССР, 1974, № 834, с. 2.
3. Fridman V. M., Scheiner O. A., Semenova S. V. — Phys. Sol., 1981, 17, p. 127.
4. Егорычев В. П., Кобрин М. М., Кузьмин В. Г., Орлов И. Я. — Радиотехника и электроника. 1980, 25, № 11, с. 2309.
5. Снегирев С. Д. — Изв. вузов — Радиофизика, 1979, 22, № 1, с. 5.
6. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложение. — М.: Мир, 1971.
7. Бендант Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. — М.: Мир, 1974.
8. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. — М.: Сов. радио, 1966.
9. Петрухин Н. С. — Астрон. журн., 1974, 51, вып. 3, с. 571.
10. Speiser D. S. — Space Science Rev., 1982, 31, p. 351.
11. Jonson J. A. — Astroph. J., 1982, 254, p. 318.

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
25 ноября 1983 г.

THE POSSIBILITY OF THE PARAMETRIC APPROACH TO THE STUDY OF PREFLARE PHENOMENA IN THE SOLAR PLASMA BY THE ANALYSIS OF THE SOLAR RADIO EMISSION FLUCTUATIONS

E. A. Aver'yankhina, [M. M. Kobrin], I. Ya. Orlov

A complex analysis has been made for observations of the solar radio emission fluctuations at 755 MHz by the radiotelescope RT-10 RAO in the year of the solar maximum. The character of the amplitude variations, energy spectra and probability density functions (PDF) before and after the flares have been studied. By the comparison between the observed characteristics of fluctuations and characteristics obtained by modeling of interaction between different noise and quasi-periodic processes, we substantiate possibilities of investigation of processes in the active regions as in some parametric systems. A comparison over PDF between results of processing of the fluctuation observations in preflare periods and the modeling results indicates to the modulation-multiplication character of the interaction between the noise radiation and quasi-periodic processes on the Sun at the general nonstationarity of the processes.