

Алимгазина Н.Ш.,
Наурзбаева А.Ж.,
Манапбаева А.Б.,
Тлеубаева И.С.

**Рекуррентный анализ
всплесков радиоизлучения
Солнца**

В работе предложен новый метод анализа временных рядов, основанный на фундаментальном свойстве диссипативных динамических систем – рекуррентности (повторяемости состояний). Целью работы является описание динамического поведения радиовсплесков Солнца методом рекуррентных диаграмм. Рекуррентные диаграммы являются графическим инструментом, по которым выявляют ряд основных структур, отвечающих за тот или иной характер развития системы. В работе показано, что для разных типов радиовсплесков характерны различные особенности в структурах. Так для всплесков I типа характерна топология дрейфа, показывающая неоднородность процесса и медленное изменение параметров. Для радиовсплесков II типа структура рекуррентной диаграммы по топологии является контрастной, это говорит о резком изменении динамики процесса, о его нестационарности. Полученные результаты хорошо согласуются с физической теорией радиовсплесков.

Ключевые слова: всплеск, радиоизлучение, нелинейный анализ, фазовый портрет, рекуррентная диаграмма, топология, текстура.

Alimgazina N.Sh.,
Naurzbayeva A.Zh.,
Manapbayeva A.B.,
Tleubayeva I.S.

**Recurrent analysis of Solar radio
bursts**

In this work it is offered a new method for analysis of time series based on the fundamental property of dissipative dynamical systems – recurrence (repeatability conditions). The aim is to describe dynamic behavior of solar radio bursts by the method of recurrent diagrams. Recurrent diagrams are a graphical instrument which detect a number of basic structures responsible for one or other character of a system development. It is shown that different types of radio bursts have various features in structures. So bursts of type I are characterized by drift topology, showing heterogeneity of a process and a slow change of parameters. For radio bursts of type II a structure of recurrent diagram on topology is contrast, this indicates about a sharp change of a process dynamics, about its non stationarity. The received results are well coordinated with physical theory of radio bursts.

Key words: burst, radio emission, nonlinear analysis, phase portrait, recurrent diagram, topology, texture.

Алимгазина Н.Ш.,
Наурзбаева А.Ж.,
Манапбаева А.Б.,
Тлеубаева И.С.

**Күн радиосәулеленуінің
жарқылдарының рекуррентті
талдау**

Жұмыста диссипативті динамикалық жүйелердің іргелі қасиетіне – рекурренттілікке (күйдің қайталануы) негізделген, уақыт қатарларын талдаудың жаңа әдісі ұсынылды. Жұмыстың мақсаты Күннің радиожарқылдарының динамикасын рекуррентті диаграммалар әдісімен бейнелеу болып табылады. Рекуррентті диаграммаларындағы негізгі құрылым қатарлары арқылы жүйенің дамуының сипатын анықтауға болады. Жұмыста радиожарқылдардың әртүрлі типтері үшін құрылымдардың әртүрлі ерекшеліктері сипаты көрсетілген. Топология бойынша I типті жарқылдарға дрейф топологиясы сәкес келеді, осы кезде процессті біртекті емес және параметрлердің баяу түрде өзгеруі байқалады. Жарқылдардың II типі үшін топология бойынша рекуррентті диаграмманың құрылымы кереғар болып табылады, процесстің динамикасының кенет өзгеруі, оның тұрақсыз екендігін көрсетіп тұр. Алынған нәтижелер радиожарқылдардың физикалық теориясымен жақсы келіседі.

Түйін сөздер: жарқыл, радиосәулелену, бейсызық талдау, фазалық бейне, рекуррентті диаграмма, топология, текстура.

**РЕКУРРЕНТНЫЙ
АНАЛИЗ ВСПЛЕСКОВ
РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
СОЛНЦА****Введение**

В последние десятилетия наряду с традиционными методами исследования временных рядов используются различные методы нелинейной физики. Большое количество исследований посвящено оценке нелинейных характеристик и свойств различных естественных и искусственных систем, которые определяют характер процессов (стохастичность, хаотичность, периодичность и т.д.) и выявляют особенности эволюции. Однако большинство таких методов требуют либо длинных, либо стационарных рядов данных, которые не всегда возможно получить при реальных наблюдениях природного процесса.

В настоящее время многие исследователи различных отраслей науки широко применяют визуальный метод – метод рекуррентных диаграмм, разработанный Дж. Экманом, О. Кампостом и Д. Рюэллем [1-4]. Это новый инструмент, основанный на фундаментальных свойствах диссипативных динамических систем, использование которого не предъявляет особых требований к временным рядам данных и позволяет увидеть динамическую картину процесса в целом.

Практически все природные явления обладают ярко выраженным рекуррентным поведением, поэтому целью дипломной работы является исследование динамического поведения всплесков солнечного радиоизлучения различного типа с помощью визуального метода нелинейного анализа – метода рекуррентных диаграмм.

Всплески радиоизлучения Солнца

Солнечное радиоизлучение исследуется в широком диапазоне, начиная с миллиметровых волн и кончая волнами длиной несколько десятков метров. Со стороны длинных волн диапазон ограничен увеличивающейся с ростом длины волны непрозрачностью ионосферы, тогда как прием миллиметровых волн становится затруднительным вследствие поглощения радиоволн молекулами O_2 и H_2O в атмосфере Земли. Кроме того, при исследовании длинноволнового сол-

нечного радиоизлучения существенную роль играют трудности, связанные с выделением радиоизлучения Солнца на фоне интенсивного космического излучения.

Уровень радиоизлучения невозмущенного Солнца и повышенного радиоизлучения, связанного с активными областями, никогда не остается постоянным в течении сколько-нибудь значительного промежутка времени. На фоне этого излучения возникают многочисленные всплески, обладающие различными «временами жизни», интенсивностью и частотным спектром [5].

Всплеск радиоизлучения, в большинстве случаев начинающийся во время хромосферной вспышки, происходит часто внезапно и почти одновременно в широком спектре частот. По-

следующее развитие всплеска характеризуется огромным разнообразием в общем поведении при различных длинах волн. Существует несколько типов кратковременных всплесков, наблюдаемых в широком диапазоне от волн длиной менее 1 см до 50 м, длительностью от долей секунд до нескольких часов. Для наглядности на одной диаграмме в координатах «время – длина волны» в виде заштрихованных областей изображены всплески спектральной классификации, которая была еще в 50-х годах прошлого века впервые введена Дж. Уайлдом (рис.1). Однако данная классификация радио-всплесков Солнца основана на анализе экспериментальных данных и носит, как видно из рисунка 1, более качественный характер, нежели количественный.

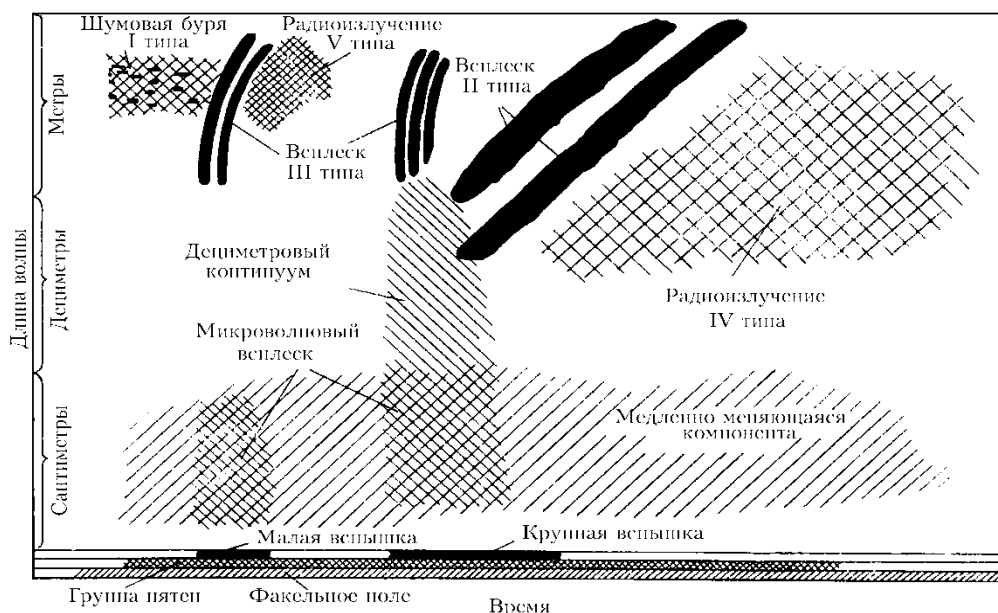


Рисунок 1 – Типы спорадического радиоизлучения Солнца [5]

Всплески I типа. Ярким проявлением солнечной активности в метровом диапазоне являются всплески I типа – солнечные шумовые бури. Солнечной шумовой бурей называется повышенное радиоизлучение, захватывающее широкую полосу частот метрового диапазона волн (80–200 МГц), с налагающимися на этот уровень многочисленными короткоживущими всплесками с длительностью от 0,1 до 3 с. В периоды сильной активности Солнца сотни всплесков могут появляться каждый час, а шумовая буря может продолжаться несколько дней. Диаметр источников шумовых бурь составляет и

увеличивается с уменьшением частоты. Высота области генерации над фотосферой ~ 400000 км. Яркостная температура излучения порядка $10^8 \div 10^{10}$ К. Излучение шумовых бурь сильно поляризовано по кругу, что соответствует обыкновенной волне.

Радиовсплески I типа связаны с магнитными полями солнечных пятен в активных областях. Они возникают в результате конверсии плазменных волн на квазистационарных структурах, создаваемых самими плазменными волнами, которые возбуждаются потоками быстрых электронов, ускоренных ударными

волнами в магнитном поле. Излучение всплесков магнитотормозное в магнитном поле пятна из области выше «плазменного зеркала». Такой процесс оказывается эффективным при достаточно низком уровне плазменной турбулентности.

Всплески II типа. Солнечные радиовсплески II типа представляют собой сигналы электромагнитных процессов без столкновений, распространяющиеся радиально наружу в солнечной атмосфере. Они сравнительно редки и появляются в результате сильных хромосферных вспышек (один раз в несколько суток). В основном, всплески с временем жизни порядка 3 – 30 минут возникают в полосе частот от 10 до 150 МГц (метровые волны) и имеют слабую степень поляризации. Их средний поток достигает $\sim 10^7$ Ян, а максимальные значения достигают 10^{11} Ян.

Механизм возникновения всплесков II типа плазменные колебания, которые возбуждаются на фронте ударной волной распространяющейся из области хромосферной вспышки. Часть энергии колебаний переходит в энергию электромагнитных волн, которые наблюдаются в виде всплеска II типа. При подъеме ударной волны в более высокие слои короны Солнца, где меньше электронная концентрация и, соответственно, ниже плазменная частота, всплеск дрейфует к более низким частотам. Поэтому основными спектральными характеристиками всплесков II типа являются медленный систематический дрейф от высоких к низким частотам со скоростями ~ 200 кГц/с, узкий диапазон частот, резко очерченные особенности. Всплески II типа часто встречаются в виде двух медленно дрейфующих полос излучения с частотным соотношением 1:2. Это можно объяснить наличием магнитного поля, т.е. может происходить модуляция сигнала на плазменной частоте гирочастотой [5].

Метод рекуррентных диаграмм

Рекуррентные диаграммы являются графическим инструментом, по которым можно выявить ряд основных структур, отвечающих за тот или иной характер развития системы. Впервые в 1987 году в работе Экмана и др. [1] предложен способ отображения m – мерной фазовой траектории состояний $x(t)$ на двухмерную квадратную двоичную матрицу размером $N \times N$, в которой 1 (черная точка) соответствует повторению состояния при некотором времени i в некоторое другое время j . Диаграмма

имеет координатные оси являющиеся осями времени. Так получается рекуррентная диаграмма, которая описывается соотношением:

$$R_{i,j}^{m,\varepsilon_i} = \Theta(\varepsilon_i - \|x_i - x_j\|),$$

где $\{x_j\} = \{x_1, x_2, \dots\} \in R^m$, $i, j = 1, 2, \dots, N$, N – количество рассматриваемых состояний наблюдаемого процесса x_i , ε_i – размер окрестности точки x_i в момент i , $\|x_i - x_j\|$ – нормированное расстояние между точками, Θ – функция Хэвисайда.

Поскольку $R_{i,j} = 1 (i = 1 \dots N)$ по определению, то рекуррентная диаграмма содержит черную диагональную линию – линию тождественности, под углом $\frac{\pi}{4}$ к координатным осям. произвольно взятая рекуррентная точка i, j не несет какой-либо полезной информации о состояниях во времена i и j . Только вся совокупность рекуррентных точек позволяет восстановить свойства системы [6].

Для реальных временных рядов почти невозможно обнаружить абсолютно рекуррентные состояния в том смысле, что $x_i \equiv x_j$, по этой причине состояние x_i рекуррентно состоянию x_j , если они располагаются достаточно близко друг к другу. Критерием близости выступает граничное расстояние ε_i . Это означает, что векторы x_j , попадающие в m – мерную окрестность радиусом ε_i , являются рекуррентными, тогда x_j называют рекуррентными точками.

Существуют два способа задания окрестности:

$$\varepsilon_i = \varepsilon \forall i, \quad R_{i,j} = R_{j,i},$$

$$\varepsilon_i \neq \varepsilon, \quad R_{i,j} \neq R_{j,i}.$$

В первом случае окрестность задается в виде шара с фиксированным радиусом и с центром в точке x_i . Данный способ гарантирует симметричность рекуррентной картины относительно главной диагонали, так как x_i близко расположено к x_j , и наоборот. во втором случае окрестность определяется так, чтобы в нее попало строго фиксированное число состояний x_j , т.е. для каждого $x_i (i = 1, \dots, N)$ выбирается свое расстояние окрестности ε_i . Величина $R_{i,j} \neq R_{j,i}$, так как окрестность для x_i не совпадает с окрестностью x_j . На рекуррентной диаграмме наблюдается асимметрия относительно главной диагонали, однако все колонки массива диаграммы имеют одинаковую плотность рекуррентности. Выбор задания окрестности точки x_i выбирается исследователем по усмотрению [6].

Для построения рекуррентной диаграммы необходимо выбрать норму: евклидову (L_1, L_2) или максимальную (L_∞). Выбор нормы определяет и форму окрестности (рис.2).

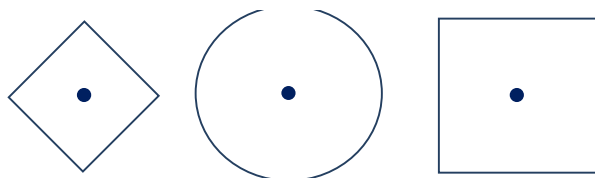


Рисунок 2 – Типы норм в двумерном пространстве:
 L_1 - норма (а), L_2 - норма (б), L_∞ – норма (в)[7]

При построении рекуррентной диаграммы с фиксированным значением ε_i , в окрестность с L_∞ – нормой может попасть наибольшее количество близлежащих векторов фазового пространства по сравнению с L_1 - и L_2 – нормами, а при выборе L_1 – нормы, наоборот, меньше. Выбор нормы зависит от целей исследования. L_∞ - норма не зависит от размерности фазового пространства, поэтому она удобна при вычислениях. L_1 – норма обеспечивает наиболее устойчивую рекуррентность состояний.

Выбор пороговой величины ε_i обусловлен присутствием шумовой компоненты в реальных данных. Чаще всего рекомендуется выбирать фиксированный радиус окрестности не более 10% от значения максимального диаметра фазового пространства.

Основным преимуществом рекуррентных диаграмм является способность визуализировать многомерные фазовые траектории даже в случае коротких и нестационарных рядов, а по виду геометрических структур можно проследить эволюцию во времени выбранного процесса. В работе Экмана и других [1] были введены два основных класса структур: топология и текстура. Топология соответствует крупномасштабным структурам на графиках, текстура – мелкомасштабным структурам. Подробное описание каждого класса структур приведено в работах [1, 6, 7].

Очевидно, что образуемые структуры рекуррентных диаграмм можно анализировать и численно. В работах [2-4, 8] разработаны инструменты вычисления ряда мер на основе подсчета плотности рекуррентных точек, вертикальных и горизонтальных линий и т.д. Можно рассчитать коэффициент самоподобия, предсказуемость, энтропию, тренд, среднюю длину диагональных

линий и горизонтальных структур.

Результаты исследования

В связи с тем, что спектральная классификация всплесков основана на анализе многих экспериментальных данных и носит более качественный характер на вышепредставленной диаграмме (рис.1), нежели количественный, и нет однозначных критериев разделения всплесков во временных потоках излучения, нами в данном исследовании показана возможность применения нового анализа нестационарных временных рядов для разделения всплесков по их физической природе.

В исследованиях были использованы временные потоки радиоизлучения Солнца на частотах от 245 МГц до 15400 МГц по данным четырех станций мировой сети солнечных радиотелескопов (RSTN): Palehua (Hawaii), Sagamore Hill (Massachusetts), Learmonth (Western Australia) и San Vito (Italy) [9]. В соответствии с общепринятой спектральной классификацией всплесков, из временного ряда были выделены сигналы, соответствующие событиям I и II типов радиовсплесков.

В данной работе представлены результаты исследования для двух типичных всплесков I и II типов, зарегистрированных в 2006 году в обсерватории San Vito (Italy). Временные диаграммы исследуемых сигналов радиоизлучения Солнца и соответствующие им фазовые портреты представлены на рисунках 3, 4.

При анализе структур фазовых траекторий мы видим, что для радиовсплесков I типа фазовая траектория меняется хаотическим образом, в то время как для радиовсплесков II типа наблюдается некоторая структурность и закономерность в поведении фазовой траектории. Это скорее всего связано с тем, что всплески I типа явление шумоподобное и равновесное, а всплески II типа – результат процесса самоорганизации в активной области Солнца.

Для построения рекуррентных диаграмм были использованы значения размерности вложения и запаздывания по времени равные 1, окрестность точки была задана в виде шара с фиксированным радиусом $\varepsilon = 0.15$. При расчете для двумерного пространства была использована евклидова норма.

На рисунках 5-8 представлены типичные рекуррентные диаграммы для различных типов радиовсплесков.

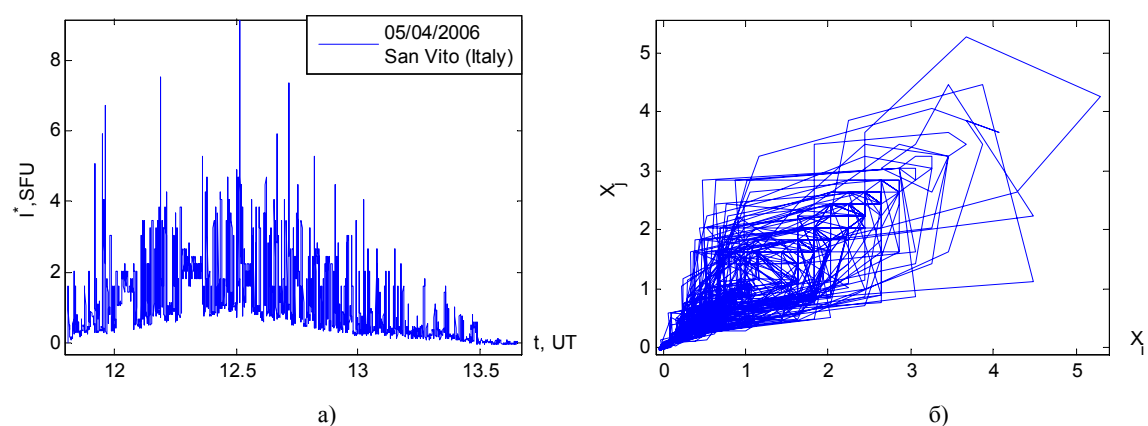


Рисунок 3 – Радиовсплеск I типа: график изменения во времени (а) и фазовый портрет (б)

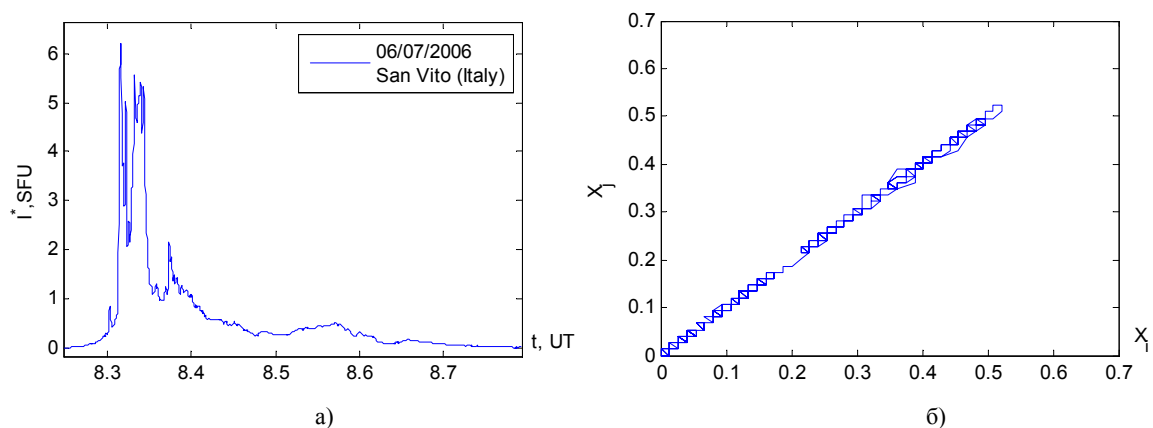


Рисунок 4 – Радиовсплеск II типа: график изменения во времени (а) и фазовый портрет (б)

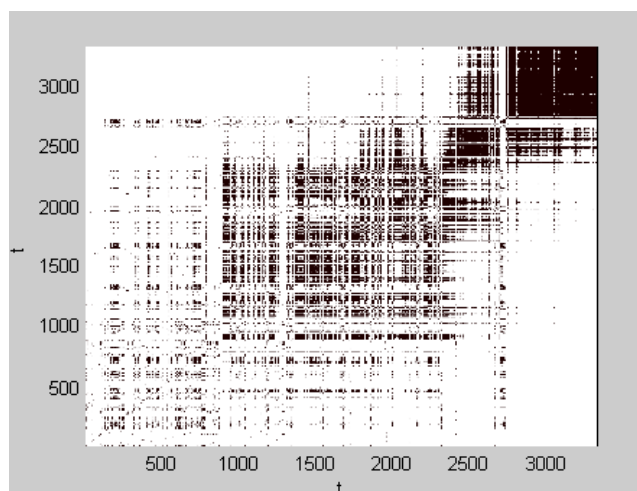


Рисунок 5 – Топология на рекуррентной диаграмме радиовсплеска I типа

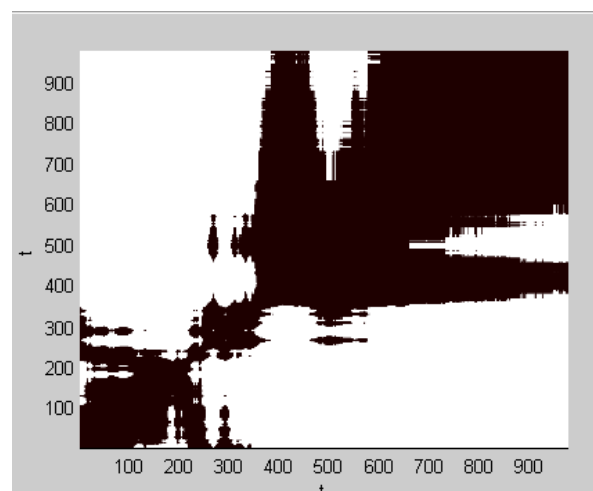


Рисунок 6 – Топология на рекуррентной диаграмме радиовсплеска II типа

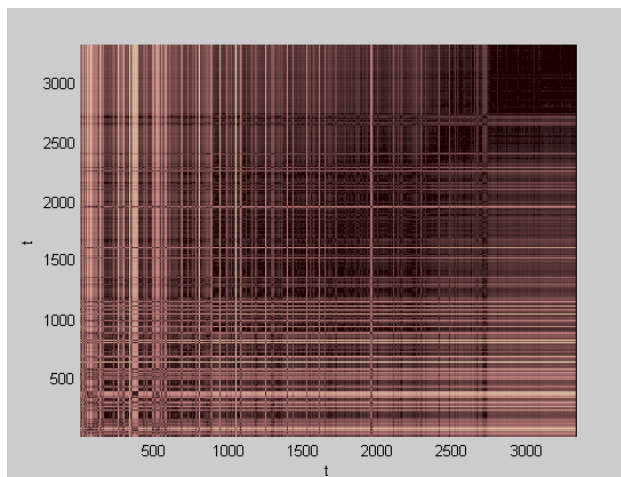


Рисунок 7 – Текстура на рекуррентной диаграмме радиовсплеска I типа

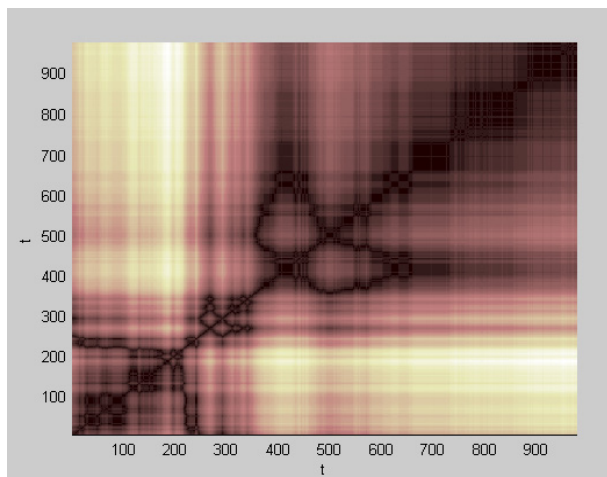


Рисунок 8 – Текстура на рекуррентной диаграмме радиовсплеска II типа

На рисунке 5 мы видим, что для радиовсплесков I типа мы наблюдаем характерное изменение яркости изображения от нижнего правого и верхнего левого углов. Этот вид крупных структур относится к топологии дрейфа. Дрейф характерен для динамических систем, не обладающих абсолютной неоднородностью, но содержащих медленно изменяющиеся параметры.

Анализируя текстуру, мы видим смешанный вид текстуры, с одной стороны на интервалах времени от начала события до времени равным ≈ 2750 секунд наблюдаются скопления светлых вертикальных и горизонтальных линий. На диаграмме рисунка 7, с увеличением времени скопления светлых полос наблюдаются все реже. Такая текстура соответствует состояниям системы, которая незначительно изменяется с течением времени. Кроме того, нерегулярное появление черных зон, соответствующих скоплениям вертикальных и горизонтальных линий, а также белых зон, указывает на нерегулярность процесса, скорее всего на коррелированность шумов. Действительно, это характерно для всплесков данного типа.

Рекуррентная диаграмма, построенная для радиовсплесков II типа (рис. 6) по топологии является контрастной. В этом случае, это говорит о резком изменении динамики процесса. Яркие выраженные белые зоны на рекуррентной диаграмме говорят о нестационарности происходящего процесса. Действительно, всплески II типа возникают вследствие нестационарных и высокоэнергетических процессов в атмосфере Солнца.

При рассмотрении геометрических структур на малых масштабах (рис. 8) мы видим также смешанные разновидности текстуры: на интервалах времени менее ≈ 350 секунд наблюдаются как диагональные, так и горизонтальные, и вертикальные линии под некоторым углом к основной диагонали. Появление диагональных линий соответствует ситуации, когда некая часть фазовой траектории протекает параллельно другой, действительно, это наблюдается на рисунке 4,б. На больших интервалах времени диагональные линии не наблюдаются. Нерегулярное появление диагональных линий указывает на то, что рассматриваемый процесс – хаотический.

Наличие вертикальных и горизонтальных линий и их скопление в черных зонах, проявляющихся нерегулярно на диаграмме, указывает на то, что процесс радиовсплесков II типа нерегулярен, что и соответствует действительности. Всплески II типа являются довольно не частым явлением по сравнению со всплесками других типов.

Анализируя рекуррентные диаграммы мы видим, что для каждого типа всплеска нельзя однозначно наблюдать ярко выраженную периодичность в подпроцессах исследуемого события. Для радиовсплесков I типа периодичность наблюдается лишь на малых интервалах времени (порядка нескольких секунд) в начале события, а для всплесков II типа периодичность не наблюдается.

Для других исследованных сигналов, соответствующих всплескам I и II типа, наблю-

даются схожие особенности в рекуррентных диаграммах.

Заключение

В работе были исследованы временные потоки радиоизлучения Солнца с применением метода визуального анализа нестационарных временных рядов – метода рекуррентных диаграмм,

который позволил выявить характерные особенности в динамическом поведении исследуемых сигналов.

Далее планируется проведение более детального численного анализа рекуррентных диаграмм радиовсплесков различных типов с целью выявления количественных критериев их классификации по одной временной зависимости плотности потока излучения.

Литература

- 1 Eckmann J.-P., Kamphorst S.O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems // *Europhysics Letters* 5. – 1987. – P. 973-977.
- 2 March T.K., Chapman S.C., Dendy R.O. Recurrence plot statistics and the effect of embedding // *Physica D*, 2005. – Vol. 200. – P. 171-184.
- 3 Marwan N., Romano M. C., Thiel M., Kurths J. Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems // *Physics Reports*, 2007. – Vol. 438(5-6). – P. 237-329.
- 4 Kulkarni A., Marwan N., Parrott L., Proulx R., Webber Jr. C. L. Recurrence plots at the crossroad between theory and application // *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2011. – Vol. 21(4). – P. 997-1001.
- 5 Алимгазинова Н.Ш. Информационно-энтропийный анализ радиоизлучения Солнца: дисс... канд. физ.-мат. наук: 01.03.02 / Казахский национальный ун-т им. аль-Фараби. – Алматы, 2010. – 98 с.
- 6 Киселев В. Б. Рекуррентный анализ – теория и практика // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. – 2006. – Вып. 29. – С. 118-127.
- 7 Золотова Н. В., Понявин Д.И. Нелинейный анализ климатических временных рядов и солнечной активности посредством рекуррентных и кросс-рекуррентных графиков // *Вопросы геофизики*, 2005. – №38 (438). – С. 203-231.
- 8 Zbilut J.P., Giuliani A., Webber Jr.C.L. Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environments using cross – recurrence quantification // *Phys. Lett. A*, 1998. – Vol. 246. – P. 122-128.
- 9 National Geophysical Data Center. – <http://www.ngdl.noaa.gov/stp/SOLAR>.

References

- 1 J.-P. Eckmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle, *Europhysics Letters*, 5, 973-977, (1987).
- 2 T.K. March, S.C. Chapman, R.O. Dendy, *Physica D*, 200, 171-184, (2005).
- 3 N. Marwan, M.C. Romano, M. Thiel, J. Kurths, *Physics Reports*, 438(5-6), 237-329, (2007).
- 4 A. Kulkarni, N. Marwan, L. Parrott, R. Proulx, Jr. C.L. Webber, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 21(4), 997-1001, (2011).
- 5 N.Sh. Alimgazinova, *Informatsionno-entropiynyy analiz radioizlucheniya Solntsa: diss... kand. fiz.-mat. nauk: 01.03.02 / Kazakhskiy natsional'nyy un-t im.al'-Farabi*, Almaty, 2010. – 98 s. (in russ).
- 6 V.B. Kiselev, *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik SPbGU ITMO*, 29, 118-127, (2006) (in russ).
- 7 H.V. Zolotova, D.I. Ponyavin, *Voprosy geofiziki*, 38(438), 203-231, (2005) (in russ).
- 8 J.P. Zbilut, A. Giuliani, Jr.C.L. Webber, *Phys. Lett. A*, 246, 122-128, (1998).
- 9 National Geophysical Data Center. – <http://www.ngdl.noaa.gov/stp/SOLAR>.