

Ш.Ш. Гусейнов*, С.Ш. Гусейнов

Шамахинская астрофизическая обсерватория им. Н. Туси, Баку, Азербайджан

*e-mail: shirin.guseyn@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФРАКТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ ВСПЫШЕК

Цель работы – качественное и количественное исследование эволюции характеристик всплесков радиоизлучения от мощных протонных и не протонных солнечных вспышек. За последние несколько десятилетий специалисты на основе данных многочисленных микроволновые исследования излучения солнечных вспышек показывают, что эруптивные солнечные вспышки, сопровождающиеся протонными возрастаниями, состоят из импульсной и постепенной фаз. В микроволновом диапазоне ценные исследования, посвященные диагностике радиовсплесков солнечных протонных событий на основе их интенсивностей, базируются на методе ИЗМИРАН. Мы также творчески подошли к решению этих задач и впервые применили фрактальный метод и его версию «скользящего окна» к составленным нами временным рядам, полученным на основе радио всплесков солнечных протонных вспышек, наблюдавшихся одновременно в микроволновых диапазонах $\lambda = 10.7$ и 27.8 см. Наблюдения проводились в 2014÷20 гг. на РТ-12 радиотелескопе Института Ионосферы Республики Казахстан на частотах $f = 1$ и 3 ГГц. Кроме того, наблюдались три протонные события в микроволновых областях $\lambda = 10.7$ и 27.8 см от солнечных вспышек, удовлетворяющие критерию Танаки-Эноме $F_{3\text{CM}} / F_{8\text{CM}} > 1$, аналогичному критерию $F_{10.7\text{CM}} / F_{8\text{CM}} > 1$. На основании рассчитанных нами значений D_t и H_t за период времени, в течение которого произошли события, можно определить его максимальные нестабильные периоды.

Ключевые слова: солнечные вспышки, радиодиагностика, микроволновое излучение, фрактальный анализ, радиовсплески.

Sh.Sh. Huseynov*, S.Sh. Huseynov

Shamakhi Astrophysical Observatory named after. N. Tusi, Baku, Azerbaijan

*e-mail: shirin.guseyn@gmail.com

A study of the dynamics of fractal characteristics of microwave radiation from powerful solar proton flares

The aim of this work is a qualitative and quantitative study of the evolution of the characteristics of radio emission bursts from powerful proton and non-proton solar flares. Over the past few decades, experts have shown, based on data from numerous multi-wavelength studies of solar flare radiation, that eruptive solar flares accompanied by proton enhancements consist of an impulsive and a gradual phase. In the microwave range, valuable research devoted to the diagnostics of radio bursts of solar proton events based on their intensities is based on the IZMIRAN method. We also took a creative approach to solving these problems and for the first time applied the fractal method and its “sliding window” version to the time series we compiled, obtained from radio bursts of solar proton events observed simultaneously in the microwave ranges $\lambda = 10.7$ and 27.8 cm. Observations were carried out in 2014÷20 on the RT-12 radio telescope of the Institute of Ionosphere of the Republic of Kazakhstan at frequencies $f = 1$ and 3 GHz. In addition, three-proton events were observed in the microwave regions $\lambda = 10.7$ and 27.8 cm from solar flares, satisfying the Tanaka-Enome criterion $F_{3\text{CM}} / F_{8\text{CM}} > 1$, similar to the criterion $F_{10.7\text{CM}} / F_{8\text{CM}} > 1$. Based on the values of D_t and H_t calculated by us for the period of time during which the events occurred, we can determine its maximum unstable periods.

Keywords: solar flares, radio diagnostics, microwave radiation, fractal analysis, radio bursts.

Ш.Ш. Гусейнов*, С.Ш. Гусейнов

Әзірбайжан Республикасы Ғылым және білім министрлігінің Н. Туси атындағы

Шамахи астрофизикалық обсерваториясы, Баку, Әзірбайжан

*e-mail: shirin.guseyn@gmail.com

Күшті күн протон жарқырауларының микротолқындық сәулеленуінің фракталдық сипаттамаларының динамикасын зерттеу

Жұмыстың мақсаты – күшті протондық және протондық емес күн жарқылдарынан шығатын радио сәулелену жарылыстарының сипаттамаларының эволюциясын сапалы және сандық тұрғыдан зерттеу. Соңғы бірнеше онжылдықта мамандар күн жарқылдарының сәулеленуіне арналған көптеген көпталқынды зерттеулер деректері негізінде протондық өсулермен бірге жүретін жарылғыш күн жарқылдарының импульстік және біртіндеп фазадан тұратынын көрсетеді. Микротолқынды диапазонда, олардың интенсивтілігіне сүйене отырып, радио жарылыстарын диагностикалауға арналған құнды зерттеулер ИЗМИРАН әдісіне негізделген. Біз де осы міндеттерді шешуге шығармашылық тұрғыдан келдік және алғаш рет фракталдық әдісті және оның «сырғымалы терезе» нұсқасын микротолқынды диапазондарда $\lambda = 10,7$ және $27,8$ см бір мезгілде бақыланған күн протондық жарқылдарының радио жарылыстарына негізделген уақыттық қатарларға қолданылды. Бақылаулар 2014–2020 жылдары Қазақстан Республикасының Ионосфера институтының РТ-12 радиотелескопында $f = 1$ және 3 ГГц жиіліктерінде жүргізілді. Сонымен қатар күн жарқылы кезіндегі микротолқынды аймақтарда $\lambda = 10,7$ және $27,8$ см үш протондық оқиғалар бақыланды, олар Танака-Эноме критерийіне сай келді: $F_{3\text{см}}/F_{8\text{см}} > 1$, бұл $F_{10,7\text{см}}/F_{27,8\text{см}} > 1$ критерийіне ұқсас. Оқиғалар болған уақыт аралығында есептелген D_t және H_t мәндеріне негізделі отырып, олардың ең үлкен тұрақсыз кезеңдерін анықтауға болады.

Түйін сөздер: күн жарқылы, радио диагностика, микротолқынды сәуле шығару, фракталдық талдау, радиотолқынды жарқылы.

Введение

Уже более 60 лет специалисты проводят интенсивные исследования по эволюции, прогнозированию, диагностике и оценке диагностике процессов в солнечных протонных вспышках. Исследования, проводимые в этом направлении в разных диапазонах, нашли отражение в работах [1-3].

На основании результатов исследований, проведенных в течение последних несколько десятилетий на основе данных о космическом излучении Солнца (СКЛ), исследователи пришли к выводу, что динамику вспышечных процессов можно условно разделить на три фазы:

1. Предвспышечную; 2. Импульсную (фазу нарастания потока от условного начала до максимума); 3. Постепенную (фазу спада потока после максимума) [4].

В микроволновом диапазоне ценные исследования, посвященные диагностике радио всплесков солнечных протонных событий на основе их интенсивностей, базируются на методе ИЗМИРАН [5-7].

Преимущество изучения солнечной активности в радиодиапазоне состоит главным образом в следующих фактах:

1. Атмосфера Земли меньше влияет на сигнал, который мы принимаем;

2. Наблюдения в очень широком диапазоне частот $\sim 1 \div 24$ ГГц позволяет локализовать различные структуры в атмосфере Солнца, включая активные области, волокна и корональные дыры;

3. Производство радиотелескопов экономически выгодно по сравнению с технологиями внеатмосферных наблюдений и оптических устройств.

Радиоизлучение Солнца не приносит заметной энергии в межпланетную среду и в окрестности Земли. Несмотря на это, он содержит очень полезную информацию о событиях в солнечной атмосфере и условий космической погоды. В отличие от КУФ-линий, микроволновое излучение формируется не атомными переходами отдельных элементов, а свободными электронами. Свойства этого радиоизлучения зависят не только от температуры и плотности плазмы, но и от величины и направления коронального магнитного поля, что делает многоволновые наблюдения уникальным инструментом диагностики корональной плазмы [8,9].

Данные по микроволновому излучению могут быть использованы для оценки свойств потока солнечных протонов. Это указывает на то, что протоны, распространяющиеся в межпланетном пространстве, и электроны, генерирующие микроволновое излучение, имеют вспышечную природу.

Радионаблюдения являются незаменимым источником информации, с одной стороны, для диагностики текущих процессов, связанных с активностью в солнечной атмосфере, а с другой стороны, для создания теории о природе выделения энергии в виде импульсов в вспышечных процессах и разработки алгоритма его прогнозирования [10].

Таким образом, исследование солнечной вспышки, протонных событий и их диагностики в микроволновом диапазоне на основе результатов одновременных наблюдений флуктуаций интегрального потока радиоизлучения во вспышечной области Солнца, генерируемая в переходном слое ($\lambda=10.7$ см) и нижней короне ($\lambda=27.8$ см) не теряют своей актуальности в физике Солнца и солнечно – земных связей.

В первом разделе рассматривается актуальность изучения эволюции и диагностики мощных вспышек и протонных событий, происходящих на Солнце по радио всплескам в микроволновом диапазоне, одновременно на двух частотах (1 и 3 ГГц), а во втором разделе рассматриваются вопросы подготовки и математической обработки данных наблюдений. В третьем разделе обсуждаются взаимосвязи между различными параметрами солнечных вспышек (мощность потока интенсивности, спектральными волнами, в которых они происходят) и отражены основные научные результаты, полученные на основе применения фрактального метода и его версии «скользящего окна» к временному ряду трех протонных событий.

Подготовка и математическая обработка экспериментальных данных

Наблюдения в микроволновом диапазоне проводились в 2014÷20 гг на радиотелескопе РТ-12 Института Ионосферы Республики Казахстана. Данные оцифровываются с пятисекундным ($\Delta t = 5$ сек.) интервалом. Подробные сведения об устройстве радиотелескопа РТ-12 и значениях его основных параметров приведены в работе [11].

Мы также творчески подошли к решению этих задач и впервые применили фрактальный метод и его версию «скользящего окна» к составленным нами временным рядам, полу-

ченным на основе радио всплесков солнечных протонных вспышек, наблюдавшихся одновременно в микроволновых диапазонах $\lambda=10.7$ и 27.8 см [12-14].

Обработка наблюдательных данных проводилась с помощью фрактального анализа и его версии «скользящего окна». В качестве наблюдательного материала мы использовали 7(семь) изолированных солнечных всплесков. На рис. 1 показаны временные профили вспышек на частоте $f=3$ ГГц наблюдающихся в 2014÷20 гг. В работе на основании данных наблюдений были построены профили интенсивности-время, для 7 обнаруженных вспышечных процессов, из которых были в дальнейшем исследованы 3 протонные вспышки удовлетворяющие критериям Танака-Эноме и протонности. На основе временных профилей приведенных в работе видно, что в записях сигнала имеются максимумы, которые существенно изменяются от реализации к реализации [15].

Из таблицы 1 видно, что рассчитанные значения фрактальных параметров для изученных нами временных рядов вспышечных процессов изменяются в диапазонах $0.5 < H_t < 1$ и $1 < D_t < 1.5$. Эти значения свидетельствуют о том, что временной ряд является непрерывным (инерционным) [13, 15]

Кроме того, наблюдались три протонные события в микроволновых областях $\lambda=10.7$ и 27.8 см от солнечных вспышек, удовлетворяющие критерию Танаки-Эноме $F_{3\text{см}}/F_{8\text{см}} > 1$, аналогичному критерию $F_{10.7\text{см}}/F_{27.8\text{см}} > 1$. Танака и Эноме [16] установили, что перед мощными протонными событиями излучение в активных областях (АО) на короткой волне $f=3$ см увеличивается более резко, чем на более длинной волне $f=8$ см. Исследования показали, что для трех вспышечных событий: В 6.2/~ X 2.4, 01.09.2014 г.; М 2.7, 21.06.2015 г. и М 7.9, 25.06.2015 г. выполняются критерии протонности. Критерием протонности солнечной вспышки является достижение потоками протонов и ионов, ускоренных в результате вспышки или коронального выброса массы, значительных энергий ($E>10$ МэВ) и скоростей, опасных для околоземного пространства. Это отражено в каталоге протонных событий, составленном под руководством Ю. И. Логачёвым [17].

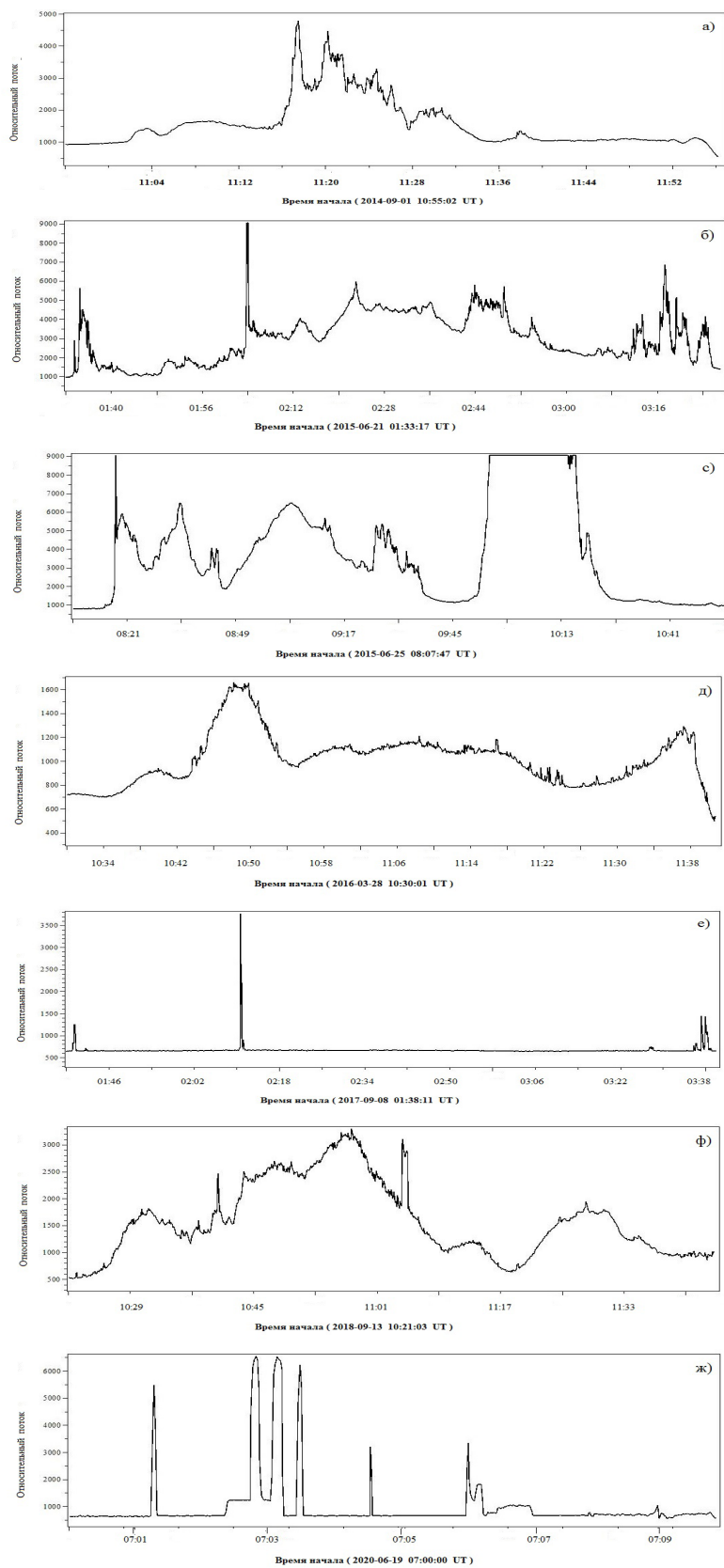


Рисунок 1 – Временные профили 7-и солнечных вспышек наблюдающихся в 2014÷20 гг. на РТ-12 в диапазоне $\lambda = 10.7$ см Института Ионосферы Республики Казахстан

Таблица 1 – Показаны оценки показателя Херста и показатель степени фрактальной размерности

Дата (время событий)	Показатель Херста H_t	Фрактальная размерность D_t
01.09.2014 (10:55:02 – 11:57:42 UT)	0.792	1.207
21.06.2015 (01:33:17 – 03:33:18 UT)	0.812	1.187
25.06.2015 (08:07:47 – 10:58:19 UT)	0.771	1.228
28.03.2016 (10:30:01 – 11:43:47 UT)	0.787	1.212
08.09.2017 (01:38:11 – 03:45:22 UT)	0.583	1.416
13.09.2018 (10:21:03 – 11:47:25 UT)	0.810	1.189
19.06.2020 (07:00:00 – 07:09:49 UT)	0.687	1.312

На рис. 2 показаны временные профили интенсивности микроволнового излучения в трех протонных вспышках, наблюдающихся одновременно на двух частотах ($f=1$ и 3 ГГц).

Началом солнечной вспышки мы условно считаем момент, когда интенсивность радиоизлучения на частоте $f=3$ ГГц начинает возрастать.

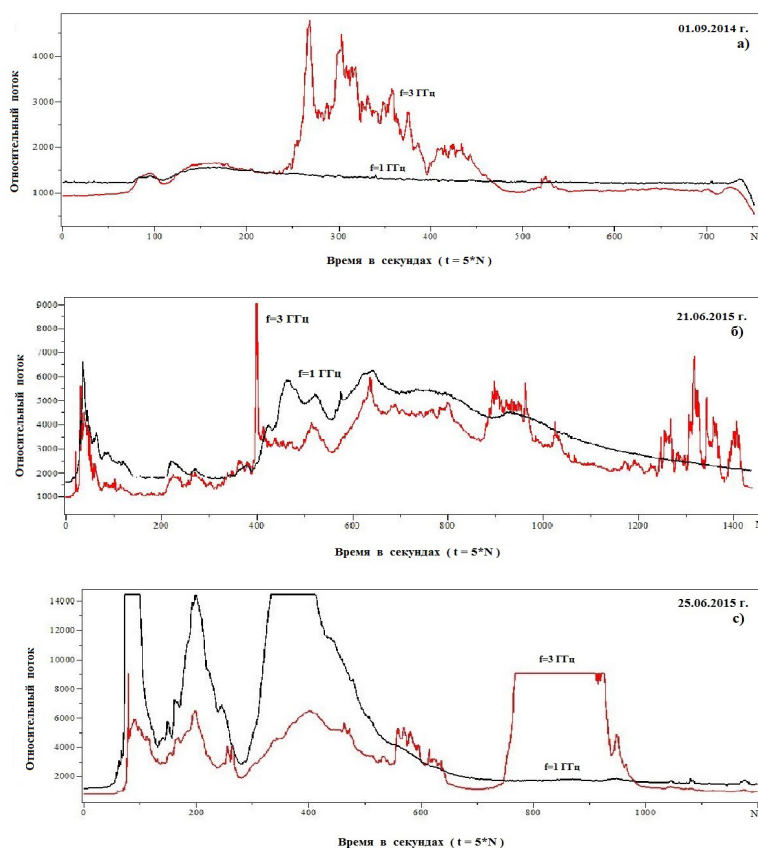


Рисунок 2 – Временные профили интенсивности микроволнового излучения на частотах $f = 1$ и 3 ГГц в трех протонных вспышках наблюдающихся одновременно по наблюдениям радиотелескопа РТ-12

Таблица 2 – Предоставлены значения оценки H_t – показателя Херста, сделанные методом фрактального анализа в версии «скользящего окна» по наблюдениям на частотах $f=1$ и 3 ГГц радиотелескопом РТ-12

Дата (время событий)	f	H_t	H_{t1}	H_{t2}	H_{t3}	H_{t4}	H_{t5}	H_{t6}	H_{t7}
01.09.2014 (10:55:02–11:57:42 UT)	3 ГГц	0.792	0.735	0.745	0.748	0.721	0.761	0.741	0.740
	1 ГГц	0.779	0.730	0.752	0.797	0.827	0.841	0.878	0.876
21.06.2015 (01:33:17–03:33:18 UT)	3 ГГц	0.812	0.727	0.654	0.674	0.701	0.762	0.764	0.704
	1 ГГц	0.834	0.743	0.747	0.725	0.786	0.774	0.781	0.785
25.06.2015 (08:07:47–10:58:19 UT)	3 ГГц	0.771	0.775	0.761	0.744	0.735	0.790	0.786	0.785
	1 ГГц	0.818	0.745	0.769	0.771	0.771	0.798	0.764	0.735

Таблица 3 – Предоставлены значения оценки D_t – степень фрактальной размерности, сделанные методом фрактального анализа в версии «скользящего окна» по наблюдениям на частотах $f=1$ и 3 ГГц радиотелескопом РТ-12

Дата (время событий)	f	D_t	D_{t1}	D_{t2}	D_{t3}	D_{t4}	D_{t5}	D_{t6}	D_{t7}
01.09.2014 (10:55:02–11:57:42 UT)	3 ГГц	1.207	1.264	1.254	1.251	1.278	1.238	1.258	1.259
	1 ГГц	1.200	1.269	1.247	1.202	1.172	1.158	1.121	1.123
21.06.2015 (01:33:17–03:33:18 UT)	3 ГГц	1.187	1.272	1.345	1.325	1.298	1.237	1.235	1.295
	1 ГГц	1.165	1.256	1.252	1.274	1.213	1.225	1.218	1.214
25.06.2015 (08:07:47–10:58:19 UT)	3 ГГц	1.228	1.224	1.238	1.255	1.264	1.209	1.213	1.214
	1 ГГц	1.181	1.254	1.230	1.228	1.228	1.201	1.235	1.264

На рисунках 3 и 4 представлена динамика хаотических характеристик солнечных протонных вспышек на основе значений параметров H_t

и D_t , рассчитанных на частотах $f=1$ и 3 ГГц с использованием фрактального метода и его версии “скользящего окна”.

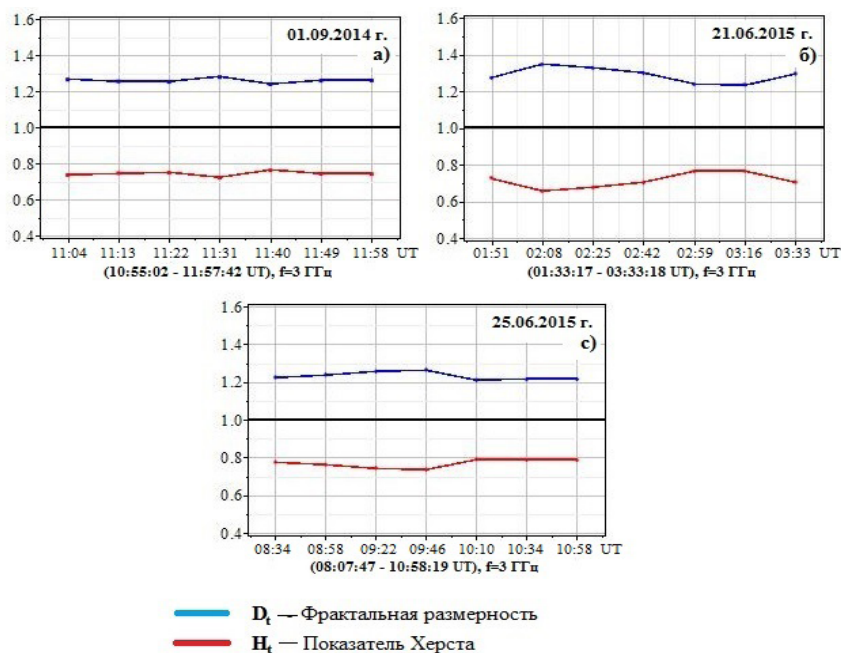


Рисунок 3 – Представлена зависимость показателя Херста и фрактальная размерность, найденные по интенсивности радиоизлучения в протонных вспышках на частоте $f=3$ ГГц с течением времени

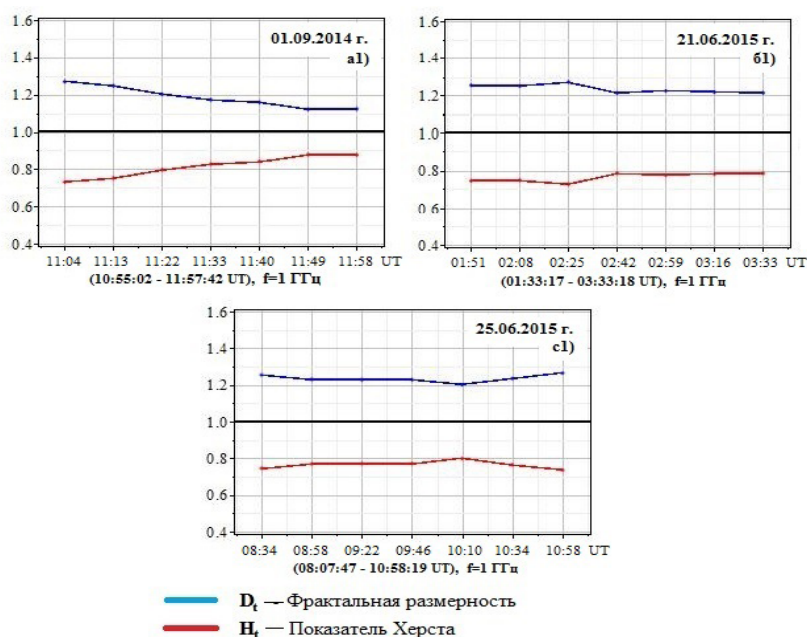


Рисунок 4 – Представлена зависимость показателя Херста и фрактальная размерность, найденные по интенсивности радиоизлучения в протонных вспышках на частоте $f=1$ ГГц с течением времени

Обсуждение и выводы

Суть фрактального анализа состоит в определении степени хаотичности временного ряда. Оценка производится с помощью показателей хаотичности: показателя Херста H_f и фрактальной размерности D_f , которые отражают природу анализируемого процесса. Анализ показателей позволяет правильно выбрать тип математической модели временных рядов [12, 13].

На основании рассчитанных нами значений D_f и H_f за период времени, в течение которого произошли события, можно определить его максимальные нестабильные периоды.

Разделив рассматриваемый нами временной ряд на интервалы, мы можем на основе вычисленных значений H_f – определить при каких интервалах он стремится к 1 а при каких к 0.

Значения фрактальных размерностей $D_{1\text{ГГц}} = 1.165$, $D_{3\text{ГГц}} = 1.187$ и индексов Херста $H_{1\text{ГГц}} = 0.834$, $H_{3\text{ГГц}} = 0.812$ солнечных протонных вспышек, исследованные нами с помощью фрактального метода и его правила динамики сечений на частотах $f=1$ и 3 ГГц, характеризуют инерционность процесса. Рассчитанные нами значения фрактальных параметров (H_f и D_f) характеризуют устойчивость системы. Пересистентный ряд:-временной ряд, который сохра-

няет долговременную память (то есть прошлые события влияют на будущее).

Следует отметить, что рассчитанные с использованием варианта «скользящего окна» фрактального метода значения показателей H_f – Херста в табл. 2 в некоторых диапазонах не удовлетворяют условиям $H_{1\text{ГГц}} > H_{3\text{ГГц}}$. Отсюда мы приходим к выводу, что основной причиной этого является низкое разрешение ($\theta = 1.2^\circ$ vs 3°) радиотелескопа РТ-12 в диапазонах $\lambda=10.7$ и 27.8 см соответственно. Это более выражено в вспыхивающих процессах, которые происходят одновременно или с небольшой разницей во времени в близких друг к другу активных областях (пятнах) солнечной атмосферы.

Исходя из выше изложенного можно сделать следующие основные выводы:

1. Профили интенсивности и времени двухчастотных радиоизлучений (1 и 3 ГГц) солнечных протонных вспышек и вычисленные нами оценки фрактальных параметров (H_f и D_f) позволяют проследить динамику событий.

2. В результате исследования 3-х солнечных протонных вспышек с использованием фрактального метода и его версии «скользящего окна» установлено, что параметры фрактала (H_f и D_f) изменялись в диапазонах $0.5 < H_f < 1$ и $1 < D_f < 1.5$ соответственно. Это также свидетель-

ствует тому, что временные ряды, отражающие процессы адаптации, являются инерционными.

3. Исследование показало, что значения показателей H_t – Херста, рассчитанные нами по радиоизлучению 3-х солнечных протонных вспышек в двухчастотной области (1 и 3 ГГц), удовлетворяют условию $H_{1\text{ГГц}} > H_{3\text{ГГц}}$. Это показывает, что радиоизлучения в нижней короне ($f=1$ ГГц) более устойчивы чем во вспышечной области Солнца, генерируемые в переходном слое ($f=3$ ГГц).

4. В табл. 2 и табл. 3 изменение показателей Херста $0.5 < H_t < 1$, рассчитанные на частотах 1 и 3 ГГц показывают, что тип временного ряда, отражающего динамику солнечных протонных

вспышек является инерционным, а измерение значения фрактальных размерностей $1 < D_t < 1.5$ указывает на сложность события.

Таким образом, изучение динамики мощных вспышек и протонных событий, происходящих на Солнце одновременно на двух частотах (1 и 3 ГГц), с использованием фрактального метода и его версию «скользящего окна» позволяет глубже понять механизмы возникновения подобных явлений и повышает эффективность радио диагностики.

Авторы выражают глубокую благодарность руководству Института Ионосферы Республики Казахстан за доступ к наблюдательным данным.

Литературы

1. Bazilevskaya G. A., On the early phase of relativistic solar particle events: are there signatures of acceleration mechanism? *Adv. Space Res.*, V.43, p530-536, (2009), DOI:10.1016/j.asr.2008.08.005.
2. Гречнев В. В., Киселев В. И., Мешалкина Н. С., Черток И. М., О корреляции околосолнечных протонных возрастных > 100 МэВ с параметрами солнечных микроволновых всплесков, *Солнечно-земная физика*, Т.3, N.3, С.3-14, (2017).
3. Струминский А. Б., Солнечные протонные события 6 и 10 сентября 2017 г.: момент первого прихода протонов и электронов, *Известия РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ*, Т.83, N.5, С.579-601, (2019).
4. Струминский А. Б., Григорьева И. Ю., Логачев Ю. И., Садовский А. М., Солнечные электроны и протоны в событиях 4-10 сентября 2017 года и сопутствующие явления, *ФИЗИКА ПЛАЗМЫ*, Т.46, N.2, С.139-153, (2020).
5. Фомичев В. В., Черток И. М., Сопоставление данных о потоках протонов у Земли с результатами диагностики солнечных протонных вспышек по радио всплескам, *Геомагнетизм и аэрномия*, Т.28, N.3, С.353, (1988).
6. Фомичев В. В., Черток И. М., Дель Посо Э., Определение показателя энергетического спектра потоков протонов у Земли по частотному спектру солнечных микроволновых всплесков, *Геомагнетизм и аэрномия*, Т.29, N.3, С.545, (1989).
7. Черток И. М., Зависимость между энергетическим спектром протонов и частотой спектрального максимума солнечных микроволновых всплесков, *Солнечные данные*, N.11, С.85-90, (1990).
8. Смольков Г. Я., Новое в микроволновом излучении солнечных активных областей, *УФН*, Т.163, N.1, С.102, (1993).
9. Смольков Г. Я., Излучение плазменных и магнитогидродинамических процессов в солнечной короне по ее радиоизлучению, *Труды БМНШФ, Иркутск ИСЗФ*, С.39, (2004).
10. Smolkov G. Ya., Maksimov V. P., Uralov A. M., Microwave signatures of solar flare buildup, *Adv. Space Sci.*, V.26, P.193, (2000).
11. Гонтарев О. Г., Жумабаев Б. Т., Левин Ю. Н., Акасов С. М., Бобров М. Н., Николаевский Н. Ф., Водяников В. В., *Радиоастрономия в Казахстане сегодня*, В кн.: *Казахстанские Космические Исследования “Геодинамика и Солнечно – земные связи”*, Алматы, С.208-219, (2013).
12. Гусейнов Ш. Ш., Сомских В. М., Гусейнов С. Ш., Андреев А. Б., Копытин В. И., Моделирование структуры нестационарных и коротких временных рядов радиоизлучения Солнца на основе фрактального анализа, *Журнал проблем эволюции открытых систем (ПЭОС)*, Т.22, N.2, С.60-66, (2020).
13. Hurst H. E., Long stroge of reservoirs: an experimental study, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, V.116, P.779-808, (1951).
14. Huseynov Sh. Sh., Huseynov S. Sh., Application of dynamic methods in radio astronomy data processing, *Journal of Problems of the Evolution of Open Systems (Journal PEOS)*, Almaty, V.24, N.1, P.73-81, (2022), doi.org/10.26577/JPEOS.2022.V.24.i1.i4
15. Huseynov Sh. Sh., Huseynov S. Sh., Levin Yu. N., Variations in fractal characteristics of a solar proton evet, *Journal of Problems of the Evolution of Open Systems (Journal PEOS)*, Almaty, V.26, N.2, P.11-17, (2024), doi.org/10.26577/JPEOS.2024.V.26-i2-a2
16. Tanaka H., Enome S., The microwave structure of coronal condensations and its relation to proton flare, *Sol. Phys.*, V.40, N.1, P.123-133, (1975).
17. Logachev Yu. I., Bazilevskaya G. A., Vlasova N. A., Ginzburg E. A., Daibog E. I., Ishkov V. N. et al., Catalog of solar proton events of the 24th solar cycle activity (2009-2019), Moscow, P.1-964, (2022).

References

1. Bazilevskaya G. A., On the early phase of relativistic solar particle events: are there signatures of acceleration mechanism? *Adv. Space Res.*, V.43, p530-536, (2009), DOI:10.1016/j.asr.2008.08.005.

2. Grechnev V. V., Kiselev V. I., Meshalkina N. S., Chertok I. M., On the correlation of near-Earth proton increases > 100 MeV with parameters of solar microwave bursts, *Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 3, No. 3, pp. 3-14, (2017). (in Russian)
3. Struminsky A. B., Solar proton events of September 6 and 10, 2017: the moment of the first arrival of protons and electrons, *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. PHYSICS SERIES*, Vol. 83, No. 5, pp. 579-601, (2019). (in Russian)
4. Struminsky A. B., Grigorieva I. Yu., Logachev Yu. I., Sadovsky A. M., Solar electrons and protons in the events of September 4-10, 2017, and associated phenomena, *PHYSICS OF PLASMAS*, Vol.46, No.2, pp.139-153, (2020). (in Russian)
5. Fomichev V. V., Chertok I. M., Comparison of data on proton fluxes near the Earth with the results of solar proton flare diagnostics based on radio bursts, *Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 28, No. 3, p. 353, (1988). (in Russian)
6. Fomichev V. V., Chertok I. M., Del Poso E., Determination of the energy spectrum index of proton fluxes near Earth from the frequency spectrum of solar microwave bursts, *Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 29, No. 3, p. 545, (1989). (in Russian)
7. Chertok I. M., Dependence between the energy spectrum of protons and the frequency of the spectral maximum of solar microwave bursts, *Solar Data*, No. 11, pp. 85-90, (1990). (in Russian)
8. Smolkov G. Ya., New Developments in the Microwave Emission of Solar Active Regions, *UFN*, Vol. 163, No. 1, p. 102, (1993). (in Russian)
9. Smolkov G. Ya., Radiation of plasma and magnetohydrodynamic processes in the solar corona according to its radio emission, *Proceedings of BMMNSHF, Irkutsk ISZF*, p.39, (2004). (in Russian)
10. Smolkov G. Ya., Maksimov V. P., Uralov A. M., Microwave signatures of solar flare buildup, *Adv. Space Sci*, V.26, P.193, (2000).
11. Gontarev O. G., Zhumabayev B. T., Levin Yu. N., Akasov S. M., Bobrov M. N., Nikolaevsky N. F., Vodyannikov V. V., Radio Astronomy in Kazakhstan Today, In: *Kazakh Space Research "Geodynamics and Sun-Earth Relations"*, Almaty, pp. 208-219, (2013). (in Russian)
12. Guseinov Sh. Sh., Somsikov V. M., Guseinov S. Sh., Andreev A. B., Kopytin V. I., Modeling the Structure of Non-Stationary and Short Time Series of Solar Radio Emission Based on Fractal Analysis, *Journal of Problems of Evolution of Open Systems (PEOS)*, Vol. 22, No. 2, pp. 60-66, (2020). (in Russian)
13. Hurst H. E., Long stroge of reservoirs: an experimental study, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, V.116, P.779-808, (1951).
14. Huseynov Sh. Sh., Huseynov S. Sh., Application of dynamic methods in radio astronomy data processing, *Journal of Problems of the Evolution of Open Systems (Journal PEOS)*, Almaty, V.24, N.1, P.73-81, (2022), doi.org/10.26577/JPEOS.2022.V.24.i1.i4
15. Huseynov Sh. Sh., Huseynov S. Sh., Levin Yu. N., Variations in fractal characteristics of a solar proton evet, *Journal of Problems of the Evolution of Open Systems (Journal PEOS)*, Almaty, V.26, N.2, P.11-17, (2024), doi.org/10.26577/JPEOS.2024.V.26-i2-a2
16. Tanaka H., Enome S., The microwave structure of coronal condensations and its relation to proton flare, *Sol. Phys.*, V.40, N.1, P.123-133, (1975).
17. Logachev Yu. I., Bazilevskaya G. A., Vlasova N. A., Ginzburg E. A., Daibog E. I., Ishkov V. N. et al., Catalog of solar proton events of the 24th solar cycle activity (2009-2019), Moscow, P.1-964, (2022).

Сведения об авторах:

Гусейнов Ширин Ширинлы оглы (автор-корреспондент) – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Шамахинской астрофизической обсерватории им. Н. Туси Министерства науки и образования Азербайджанской Республики (Баку, Азербайджан, e-mail: shirin.guseyn@gmail.com).

Гусейнов Сади Ширин оглы – научный сотрудник Шамахинской астрофизической обсерватории им. Н. Туси Министерства науки и образования Азербайджанской Республики (Баку, Азербайджан, e-mail: sedi-huseynov@mail.ru).

Information about authors:

Huseynov Shirin (corresponding author) – candidate of physical mathematical sciences, leading researcher Shamakhy Astrophysical Observatory named after N. Tusi of Ministry of Science and Education of Azerbaijan Republic (Baku, Azerbaijan, e-mail: shirin.guseyn@gmail.com)

Huseynov Sadi – researcher Shamakhy Astrophysical Observatory named after N. Tusi of Ministry of Science and Education of Azerbaijan Republic (Baku, Azerbaijan, e-mail: sedi-huseynov@mail.ru)

Авторлар туралы мәлімет:

Гусейнов Ширин (корреспондент-автор) – физика-математика ғылымдар кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер, Насраддин Туси атындағы Шамахин астрофизикалық обсерваториясы, Шамахи, Әзірбайжан Республикасының Ғылым және Білім министрлігі (Баку, Әзірбайжан, shirin.guseyn@gmail.com)

Гусейнов Сади – ғылыми қызметкер, Насраддин Туси атындағы Шамахин астрофизикалық обсерваториясы, Әзірбайжан Республикасының Ғылым және Білім министрлігі (Баку, Әзірбайжан, edi-huseynov@mail.ru)

Поступила на рассмотрение 24.11.25

Принята 22.12.25