

ISSN 1563-034X
Индекс 75877; 25877

ӘЛ-ФАРАБИ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

ХАБАРШЫ

Физика сериясы

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени АЛЬ-ФАРАБИ

ВЕСТНИК

Серия физическая

AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY

RECENT CONTRIBUTIONS TO PHYSICS

№4 (63)

Алматы
«Қазақ университеті»
2017

**Алимгазина Н.Ш.^{*}, Наурзбаева А.Ж., Манапбаева А.Б.,
Икрамова С.Б., Кумаргазина М.Б., Кенжеғараева А.Д.,
Адилжан К.**

Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,
Алматы қ., Қазақстан, *e-mail: Nazgul.Alimgazinova@kaznu.kz

КҮННІҢ РЕНТГЕНДІК СӘУЛЕЛЕНУ СИГНАЛДАРЫН ТАЛДАУДА РЕКУРЕНТТІК ДИАГРАММА ӘДІСІН ҚОЛДАНУ

Жұмыста Күннің рентгендік сәулелену сигналы үшін диссипативті динамикалық жүйенің іргелі қасиетіне негізделген – рекуренттілік негізіндегі уақыттық қатарларды талдау әдісі көрсетілген. жұмыста Күннің рентгендік сәулелену сигналы үшін диссипативті динамикалық жүйенің іргелі қасиетіне негізделген – рекуренттілік негізіндегі уақыттық қатарларды талдау әдісі көрсетілген. Рекуренттік диаграмма әдісі жүйенің даму сипатына жауап беретін, негізгі құрылым қатарын анықтауға мүмкіндік беретін графикалық құрал болып табылады.

Зерттеу объектісі GEOS-15 ғарыштық аппаратымен тіркелген күннің рентгендік сәулелену мәліметтері болып табылды.

Зерттеу нәтижесінде рекуренттік диаграмма әдісі тұрақты және бірқалыпты емес уақыт қатарындағы өзгерісті (периодтылықты) анықтайды және ерекшелікті дәл табады. Рекуренттік диаграмма бойынша жұмсақ рентгендік сәулелену қатты рентгендік сәулеленуге қарағанда Күнде болып жатқан процесстер жайлы көп ақпарат береді. 2017 жылы рентгендік сәулелену мәні өткен жылдармен салыстырғанда азаятыны көрсетілді. Рекуренттілік өлшем диаграммасын талдау өткен жылдармен салыстырғанда 2017 жылы рекуренттілік өлшемі мәндерінде күрт өзгерістер байқалмайтынын анықтады. Бұл уақыт аралығында қуатты жарылғыш процесстер байқалмады. Сигналдардың тұрғызылған рекуренттік диаграммасынан рентгендік сәулеленудің өркелкі уақыттық қатарындағы стационарлы емес ерекшеліктері мен периодтылығы анықталған.

Түйін сөздер: рентгендік сәулелену, бейсызық талдау, рекуренттік диаграмма, топология, текстура, рекуренттілік өлшем.

**Alimgazinova N.Zh.^{*}, Naurzbaeva A.Zh., Manapbaeva A.B.,
Ikramova S.B., Kurmangazina M.B., Kenzhegaraeva A.D., Adilzhan K.**

Al Farabi Kazakh National University,
Almaty, Kazakhstan, *e-mail: Nazgul.Alimgazinova@kaznu.kz

Application of the method of recurrent diagrams to the analysis of signs of x-ray sun radiation

The paper shows the application of a new method of time series analysis based on the fundamental property of dissipative dynamical systems – recurrence, for X-ray signals of the Sun. The method of recurrent diagrams is a graphical tool by which it is possible to identify a number of basic structures responsible for a particular character of system development.

The object of investigation is solar X-ray data recorded by the GOES-15 spacecraft.

As a result of the research, it was revealed that the recurrent diagram method more clearly captures features and discovers changes (periodicity) in a non-stationary uneven time series. It is shown that, according to recurrent diagrams, soft X-ray radiation gives more information about the processes occurring on the Sun than hard X-ray radiation. It is shown that the intensity values of the X-ray radiation decrease in 2017 as compared with previous years. Analysis of the diagrams of recurrence measures revealed that there are no sharp changes in the values of the recurrence measure in comparison with previous years in 2017, while the average values do not capture it, i.e. In this period,

large and powerful flare processes were not observed. The constructed recurrence signal diagrams reveal features and periodicity in the nonstationary nonuniform time series of X-ray radiation.

Key words: X-ray radiation, nonlinear analysis, recurrent diagram, topology, texture, measure of recurrence.

Алимгазина Н.Ш.^{*}, Наурызбаева А.Ж., Маналбаева А.Б.,
Икрамова С.Б., Кумаргазина М.Б., Кенжегараева А.Д., Адилжан К.

Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
г. Алматы, Казахстан, *e-mail: Nazgul.Alimgazina@kaznu.kz

Применение метода рекуррентных диаграмм к анализу сигналов рентгеновского излучения солнца

В работе показано применение нового метода анализа временных рядов, основанного на фундаментальном свойстве диссипативных динамических систем – рекуррентности, для сигналов рентгеновского излучения Солнца. Метод рекуррентных диаграмм является графическим инструментом, по которому можно выявить ряд основных структур, отвечающих за тот или иной характер развития системы.

Объектом исследования являются данные солнечного рентгеновского излучения, зарегистрированные космическим аппаратом GOES-15.

В результате исследования выявлено, что метод рекуррентных диаграмм более четко улавливает особенности и обнаруживает изменения (периодичность) в нестационарном неравномерном временном ряде. Показано, что по рекуррентным диаграммам мягкое рентгеновское излучение дает больше информации о происходящих процессах на Солнце, чем жесткое рентгеновское излучение. Показано, что значения интенсивности рентгеновского излучения уменьшаются в 2017 году по сравнению с предыдущими годами. Анализ диаграмм мер рекуррентности выявил, что резких изменений в значениях меры рекуррентности по сравнению с предыдущими годами в 2017 году не наблюдается, в то время как средние значения этого не улавливают, т.е. в данный период больших и мощных вспышечных процессов не наблюдалось. По построенным рекуррентным диаграммам сигналов выявлены особенности и периодичности в нестационарном неравномерном временном ряде рентгеновского излучения.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, нелинейный анализ, рекуррентная диаграмма, топология, текстура, мера рекуррентности

Кіріспе

Соңғы он жыл ішінде уақыт қатарларын зерттеуде дәстүрлі әдістермен қатар бейсызық физиканың әр түрлі әдістері қолданылып келеді. Зерттеудің көп бөлігі процестер сипатын анықтайтын (стохастылық, ретсіздік, периодтылық) және эволюцияның ерекшеліктерін айқындайтын әр түрлі табиғи және жасанды жүйелердің қасиеттерін, бейсызық сипаттамаларын бағалауға арналған. Алайда осындай әдістердің көбісі табиғи процестерді нақты бақылау кезінде алуда ылғи да мүмкін бола бермейтін мәліметтердің стационарлы қатарын, болмаса ұзақтығын талап етеді.

Қазіргі таңда ғылымның әр түрлі бағытындағы зерттеушілердің көбі Дж. Экман, О. Кампост және Д. Рюэлл құрастырылған визуалды әдіс – рекурренттік диаграмма әдісін кең қолданады [1-5]. Бұл қолданылуында мәліметтердің уақыттық қатарларына ерекше талапты талап етпейтін және процестің динамикалық картинасын тұтастай көруге мүмкіндік беретін

диссипативті динамикалық жүйенің іргелі қасиеттеріне негізделген жаңа құрал.

Іс жүзінде барлық табиғат құбылыстары нақты көрінетін рекуррентті көрсеткішті иеленеді. Сондықтан жұмыстың мақсаты Күннің жұмсақ және қатты рентгендік сәуле шығаруы сигналының динамикалық көрсеткішін бейсызық талдаудың визуалды әдісі – рекурренттік диаграмм әдісі көмегімен зерттеу болып табылады.

1. Қысқа теориялық мәлімет

Рекурренттік диаграммалар жүйелер дамуының сол және өзге де сипатына жауап беретін негізгі құрылым қатарын айқындайтын графикалық құрал болып табылады. Ең алғаш 1987 жылы Экманның және басқа да [1] зерттеушілер жұмыстарында $x(t)$ күйінің m -өлшемді фазалық траекторияларын l (қара нүкте) кейбір i уақыт күйлерінің кейбір басқа j уақыт күйлеріне қайталануына сәйкес келетін екіөлшемді квадраттық $N \times N$ өлшемді екілік матрицаға

бейнелеу әдісі ұсынылған. Диаграмма уақыт осьтері болып табылатын координатты осьтерді иеленеді. Рекуренттік диаграмма мына қатынаспен анықталады:

$$R_{i,j}^{m,\varepsilon_i} = \Theta(\varepsilon_i - \|x_i - x_j\|), \quad (1)$$

мұндағы $\{x_i\} = \{x_1, x_2, \dots\} \in R^m$, $i, j = 1, 2, \dots, N$, N – бақыланатын x_i процестердің қарастырылатын күйлерінің саны, ε_i – i моментіндегі x_i нүктелер аймағының өлшемі, $\|x_i - x_j\|$ – нүктелер арасындағы нормаланған арақашықтық, Θ – Хэвисайд функциясы.

Анықтама бойынша $R_{i,j} = 1 (i = 1 \dots N)$ болғандықтан рекуренттік диаграмма координаттық осьтеріне $\pi/4$ бұрышымен тепе-тең келетін сызық – қара диагональды сызықтарды құрайды. Ерікті таңдап алынған i, j рекуренттік нүкте i және j уақыттарында күйлер жайлы ешқандай пайдалы ақпаратты алып жүрмейді. Жүйенің қасиеттерін қайта қалпына келтіруге тек барлық рекуренттік нүктелер жиынтығы мүмкіндік береді [6].

Нақты уақыттық қатар үшін $x_i = x_j$ тең болғанда және егер олар бір-біріне жақын орналасса, x_i күйі x_j күйіне рекурентті болғандықтан абсолютті рекуренттік күйлерді табу мүмкін болмайды. Жақындық критерийі ретінде ε_i шектік арақашықтық алынады. Бұл x_j векторын радиусы ε_i m -өлшемді аумаққа түсетін рекурентті екенін білдіреді. Сондықтан x_j рекуренттік нүкте деп аталады.

Аумақты анықтаудың екі әдісі бар:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \varepsilon \forall i, & R_{i,j} &= R_{j,i}, \\ \varepsilon_i &\neq \varepsilon, & R_{i,j} &\neq R_{j,i}. \end{aligned} \quad (2)$$

Бірінші жағдайда аумақ x_i нүктесінің центрі болатын және бекітілген радиусы бар шар түрінде беріледі. Бұл әдіс x_i, x_j -ға жақын орналасқандықтан негізгі диагональға қатысты рекуренттік картиналардың симметриялығына кепіл береді. Керісінше, екінші жағдайда аумақ x_j күйлерінің қатаң түрде анықталған саны осы аумаққа түсуі арқылы анықталады. Яғни, әрбір x_i ($i = 1, \dots, N$) үшін ε_i аумақтағы өзінің арақашықтығы таңдалынады. x_i аумағы x_j аумағымен сәйкес келмегендіктен $R_{i,j} \neq R_{j,i}$ тең болады. Рекуренттік диаграммада негізгі диагональға қатысты асимметрия бақыланады, алайда, диаграмма массивтерінің барлық колон-

калары бірдей рекуренттілік тығыздығын иеленеді. x_i нүктесінің аумағын анықтауды таңдау зерттеушімен өз білгенінше таңдалынып алынады [7-14].

ε_i шамасының шектік мәнін таңдау нақты мәліметтердегі шуылдық компоненттердің қатысымен анықталынады. Көп жағдайда аумақтың анықталған радиусын фазалық кеңістіктің максималды диаметрі мәнінен кем дегенде 10 %-ын таңдау ұсынылады.

Рекуренттік диаграмманың негізгі ерекшелігі қысқа және стационарлық емес қатар жағдайында да көпөлшемді фазалық траекторияларды визуализациялау мүмкіндігі болып табылады. Геометриялық құрылымының түріне байланысты таңдап алынған процестің уақыт бойынша эволюциясын қадағалауға, бақылауға болады. Экманның және басқа да ғалымдардың жұмыстарында [1-14] құрылымның екі негізгі класы енгізілген. Ол топология және текстура. Топология графиктегі ірі ауқымды құрылымдарға, ал текстура – ұсақ ауқымды құрылымға сәйкес келеді. Құрылымның әрбір класы жайлы толық мағлұмат [11-18] жұмыстарда келтірілген.

Рекуренттік диаграмманың құрылған құрылымдарын сандық талдауға болатыны анық [7-19] жұмыста рекуренттік нүкте тығыздығын, вертикаль және горизонталь сызықтарды есептеу негізінде өлшем қатарын есептеу құралдары жасалынған. Рекуренттілік өлшемін, өзұқсастық коэффициентін, жорамалдылықты, энтропияны, трендті, диагональды сызықтың орташа ұзындығын және горизонтальды құрылымдарды есептеуге болады.

Бұл зерттеуде рекуренттілік өлшемі мына формуламен есептелінді:

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j} R_{i,j}^{m,\varepsilon} \quad (3)$$

Бұл өрнек рекуренттілік нүктелерін көрсетеді. Бұл өлшем күйлердің қайталану ықтималдылығын көрсетеді.

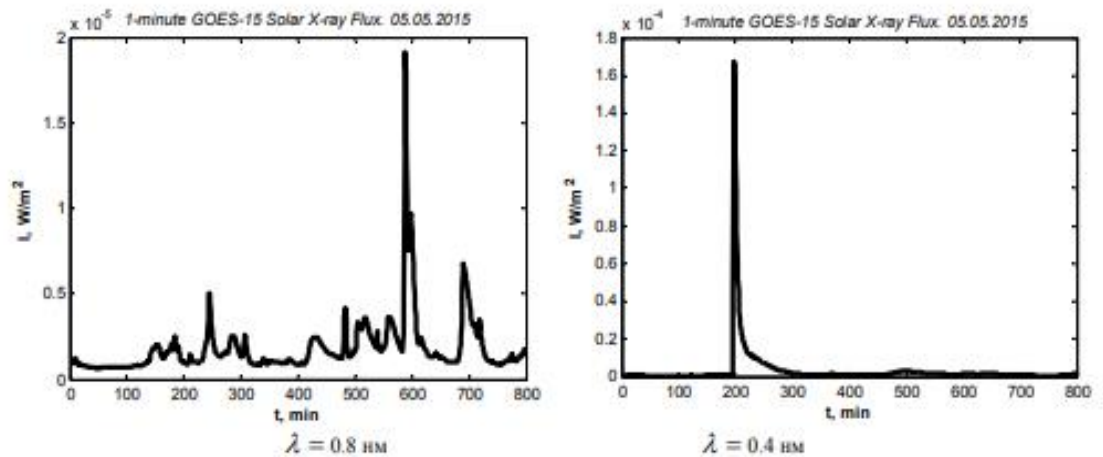
2. Зерттеу нәтижелері

Бұл жұмыста Space Weather Prediction Center National Oceanic And Atmospheric Administration Geostationary Operational Environmental Satellite сайтында көрсетілген GOES-15 ғарыштық аппаратымен тіркелген күннің рентгендік сәуле-

ленудің мәліметтері қолданылған [20]. Біздермен жұмсақ және қатты рентгендік сәуле шығару диапазонына сәйкес келетін сигналдар зерттелінді. Жұмсақ рентгендік сәуле шығару фотонның ең аз энергиясымен және сәуле шығару жиілігімен (және ең үлкен толқын ұзындығымен) сипатталады. Ал қатты рентгендік сәуле шығару фотонның ең үлкен энер-

гиясын және сәуле шығару жиілігін (және ең аз толқын ұзындығын) иеленеді. Жұмсақ және қатты рентгендік сәуле шығару арасындағы шартты шек 2 \AA ($\approx 6 \text{ кэВ}$) маңында жатады.

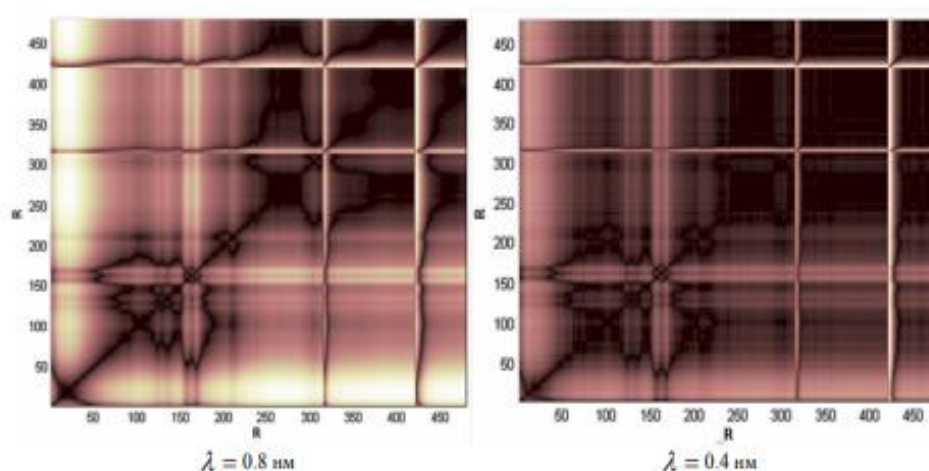
Барлығы Күннің рентгендік сәуле шығаруының 200 жуық сигналдары зерттелінді. 1-суретте зерттелініп отырған сигналдың уақыттық диаграммасы көрсетілген.



1-сурет – Рентгендік сәуле шығару (5/05/2015)

2-суретте уақыт периоды үшін күннің жарк ету периодына сәйкес келетін жұмсақ және қатты рентгендік сәуле шығару үшін рекуренттік диаграммалар көрсетілген. Көріп тұрғанымыздай, бір және сол процесте үлкен толқын ұзындығында (жұмсақ сәуле шығару) рекуренттік диаграмма кіші толқын ұзындығына карағанда стационарлық емес процесті анығырақ көрсетеді. Ірі ауқымды құрылымдарды көрсететін топологиялық диаграммалар периоды рекуренттік диаграмма класына сәйкес келеді. Мұнда біз осцилляцияланатын жүйелерге сәйкес келетін қайталанатын құрылымдарды бақылаймыз. Біздің жағдайда бұл рентгендік сәуле шығарудың уақыттық қатар мәнінің флуктуациялық нәтижесі. Диаграммадағы ақ жолақтар жүйе динамикасындағы күрт өзгерістерді көрсетеді. Бұл жарк етудің өзінің уақыт периодына сәйкес келеді.

Біз екі диаграмманы салыстыра отырып қысқа толқындарда мұндай ерекшеліктер бақыланбайтынын көрдік. Қоңыр нүктелер оқиғаның қайталанушылығына сәйкес келеді. Біздің жағдайда бұл рентгендік сәуле шығарудың интенсивтілігі ($\epsilon = 0.2$ тең кезінде) мәндерде аз флуктуацияны иеленетіндігін білдіреді. Текстураны талдай отырып, қарапайым нүкте, горизонталь және вертикаль сызықтар арқылы құрылған ұсақ ауқымды құрылымдарда біздің жағдайымызда вертикаль және горизонталь сызықтардың болуы негізді. Бұл сызықтар жүйенің күйлері өзгермейтін немесе болмашы өзгертін уақыт аралығын бөліп көрсетеді. Мысалы, зерттелініп отырған сигналдың уақыттық диаграммасын талдай отырып 320-дан 400 минут мәндерінде жүйенің күйі өзгермейтінін көрдік. Дәл осы ерекшелікті біз рекуренттік диаграмманы да көрдік.



2-сурет – Әр түрлі толқын ұзындығы мәніндегі рентгендік сәуле шығарудың рекуренттік диаграммасы 23.10.2012 ж., $\varepsilon = 0,2$, $\rho = 0,5$

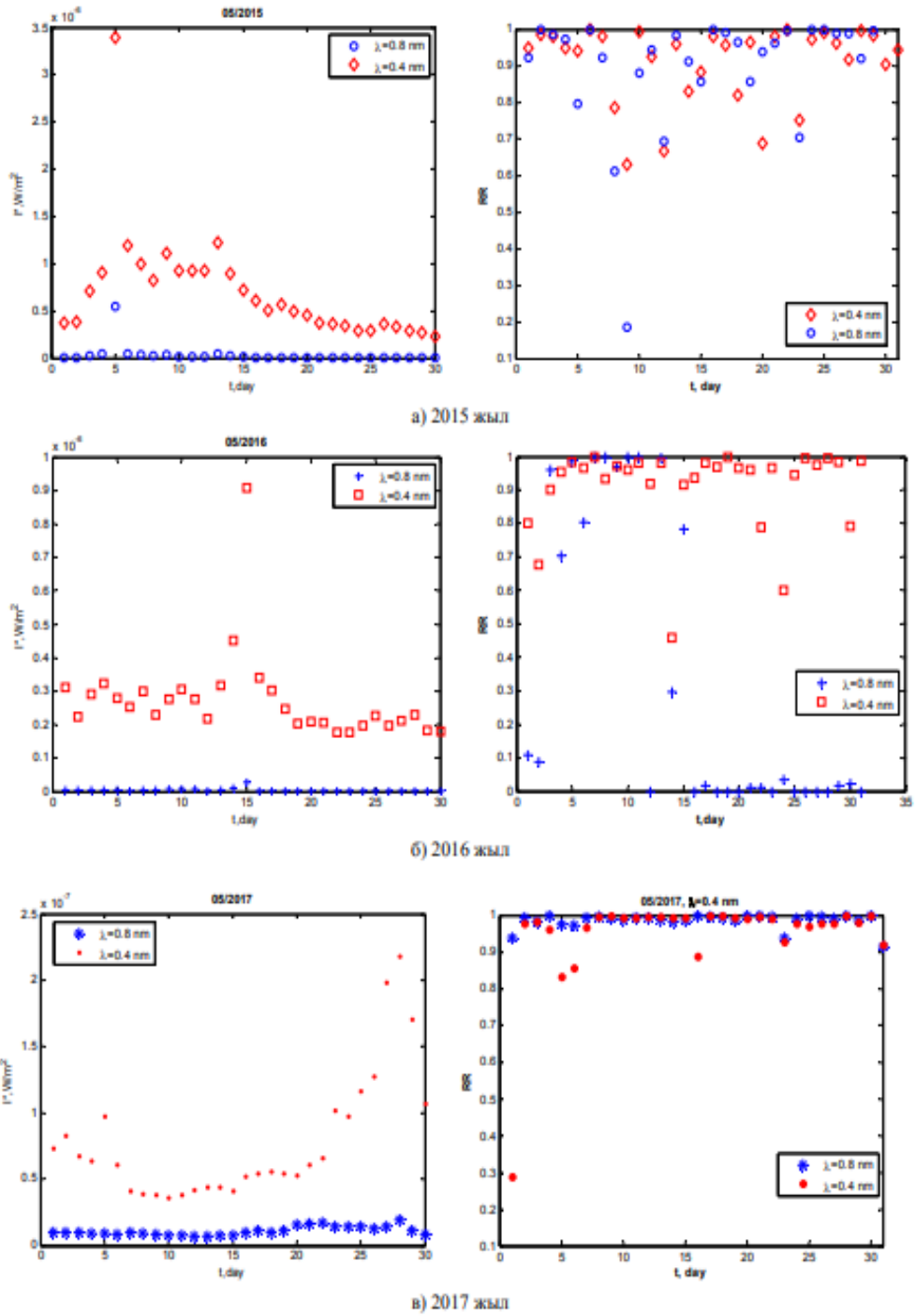
Келесі зерттеуімізде біз әр түрлі толқын ұзындығындағы әр түрлі жыл үшін бір ай ішіндегі әрбір күн үшін интенсивтіліктің орташа мәнін талдадық. Әрбір күн үшін рекуренттік диаграммалар құрылды және диаграммадағы рекуренттік нүктенің тығыздығын сипаттайтын RR сәуле шығару ағынының рекуренттілік өлшемін тұрғыздық (3-сурет).

2015, 2016 және 2017 жылдардағы «мамыр» айы үшін бір күндік қатты және жұмсақ рентгендік сәуле шығарудың интенсивтілігінің орташа мәнін талдай отырып, біз рентгендік сәуле шығарудың интенсивтілік мәні жылдан жылға азаятынын көрдік. Рекуренттілік өлшеінің диаграммаларын талдай отырып, біз RR рекуренттілік өлшемінің мәніндегі тез өзгерістер алдыңғы жылдарды 2017 жылмен салыстырғанда байқалмайды, сол уақытта мұның орташа мәнін таба алмайды. RR рекуренттілік өлшемі уақыттық қатардағы интенсивтіліктің қайталанатын мәндерінің болуын көрсетеді. Егер де RR шамасы аз болса, бұл интенсивтілік мәнінде үлкен флуктуацияның болатынын білдіреді. Мысалы 2016 жылғы «мамыр» айы үшін құрылған

диаграмма сияқты. Егер RR шамасы 1-ге жақын болса, онда сәуле шығарудың уақыттық қатары аз флуктуацияны иеленетінін білдіреді. Яғни, бұл периодта жарқ ету процесі байқалмады.

Қорытынды

Зерттеу нәтижесінде рекуренттік диаграмма әдісі стационарлы емес әркелкі уақыттық қатардағы ерекшеліктер мен өзгерістерді (периодтылықты) анығырақ табатыны анықталды. Рекуренттік диаграмма арқылы жұмсақ рентгендік сәуле шығару қатты рентгендік сәулеге қарағанда Күнде болып жатқан процестер жайлы көп ақпарат беретіні көрсетілді. Алдыңғы жылдарға қарағанда 2017 жылы рентгендік сәуле шығарудың интенсивтілік мәні азаятындығы көрсетілді. Рекуренттілік өлшем диаграммасын талдау алдыңғы жылдармен салыстырғанда 2017 жылда рекуренттілік өлшемі мәндерінің тез өзгерісінің байқалмағандығын анықтады. Сол уақытта мұның орташа мәнін таба алмайды. Яғни, бұл периодта үлкен және қуатты жарқ ету процесі байқалмады.



3-сурет – Мамыр айы үшін әр түрлі жылдағы әр түрлі толқын ұзындығындағы рентгендік сәуле шығарудың орташа мәні (сол жақта) және олардың рекурренттілік өлшемі (оң жақта)

Әдебиеттер

- 1 Eckmann J.-P., Kamphorst S.O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems // *Europhysics Letters* 5. – 1987. – P. 973-977.
- 2 Manuca R., Savit R. Stationarity and nonstationarity in time series analysis. // *Physica D* 99 (2-3). 1996. P. 134-161.
- 3 Zbilut J.P., Webber Jr., C.L. Detecting deterministi signals in exceptionally noisy environments using cross – recurrence quantification. // *Phys. Lett. A*, 1998. – Vol. 246. – P. 122-128.
- 4 Iwanski J.S., Bradley E. Recurrence plots of experimental data: To embed or not to embed? // *Chaos*. 8 (4). 1998. P. 861-871.
- 5 Schreiber, T., Interdisciplinary application of nonlinear time series methods, // *Phys. Reports*, 308, p. 1_64, 1999
- 6 Webber Jr.C.L. Recurrence Quantification Analysis, 2003. URL: <http://homepages.luc.edu/~cwebber>
- 7 Ponyavin, D. I., Zolotova, N. V., Nonlinear analysis of climatic time series with cross recurrence plots, // *Proceedings of the 5th International conference «Problems of Geocosmos»*, St. Petersburg, p. 259_262, 2004
- 8 Ponyavin, D. I., Zolotova, N. V., Cross recurrence plot analysis of the North-South sunspot activities, // *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity*, Proceedings IAU Symposium No. 223, p. 141_142, 2004
- 9 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.
- 10 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.
- 11 Marwan, N., Kurths, J., Line structures in recurrence plots, // *Phys. Lett. A*, 2005. –Vol. 336. – P. 349-357
- 12 Киселев В. Б. Рекуррентный анализ – теория и практика // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*, 2006. – Вып. 29. – С. 118-127.
- 13 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.
- 14 Быкова В. Математические методы анализа рекурсивных алгоритмов // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics* 2008, 1(3), 236-246
- 15 Ismailov B. Recurrence analysis of hydroelectric power station force equipment vibration signals // *The third International conference «Problems of cybernetics and informatics»* Vol. III. – September 6-8, Baku, 2010. – P. 221-224.
- 16 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.
- 17 Белозеров В.Е., Зайцев В.Г. Нелинейный рекуррентный анализ в обработке временных рядов // *Системные технологии*, 2014. – №3 (92). – С.42-49.
- 18 Кириченко Л., Барановский А., Кобицкая Ю. Рекуррентный анализ самоподобных и мультифрактальных временных рядов // *International Journal «Information Content and Processing»*, 2016. – Vol.3. – № 1. – С.16-37.
- 19 Алимгазина Н.Ш., Наурызбаева А.Ж., Маналбаева А.Б., Тлеубаева И.С. Рекуррентный анализ всплесков радиоизлучения Солнца // *«Вестник КазНУ»* 2016. – Т.3. – №58. – С.112-119.
- 20 <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/>

References

- 1 Eckmann J.-P., Kamphorst S.O., Ruelle D. *Europhysics Letters* 5. 973-977, (1987).
- 2 Manuca R., Savit R. *Physica D* 99 (2-3), 134-161, (1996).
- 3 Zbilut J.P., Webber Jr., C.L. *Phys. Lett. A*, (246), 122-128, (1998).
- 4 Iwanski J.S., Bradley E. *Chaos* 8 (4), 861-871, (1998).
- 5 Schreiber, T., *Phys. Reports*, 308, 1_64, (1999).
- 6 Webber Jr.C.L. *Recurr. Quantification Analysis*, 2003. <http://homepages.luc.edu/~cwebber>
- 7 Ponyavin, D. I., Zolotova, N. V., *Proceedings of the 5th International conference «Problems of Geocosmos»*, (St. Petersburg, 2004), 259_262.
- 8 Ponyavin, D. I., Zolotova, N. V., *Proceedings IAU Symposium*, 2004, 223, 141-142.
- 9 March T.K., Chapman S.C., *Physica D* 200, 171-184. (2005).
- 10 Zolotova H. V., Ponyavin D. I. *Voprosy geofiziki*, 38 (438), 203-231, (2005). (in russ)
- 11 Marwan, N., Kurths, J., *Phys. Lett. A* 336, 349-357, (2005).
- 12 Kiselev V.B. *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik SPbGU ITMO* 29. 118-127, (2006). (in russ)
- 13 Marwan N., Romano M. C., Thiel M., Kurths J., *Physics Reports*, 438(5-6), 237-329. (2007).
- 14 Bykova V. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics* 1(3), 236-246, (2008). (in russ)
- 15 Ismailov B., *The third International conference «Problems of cybernetics and informatics»* (September 6-8, Baku, 2010 Vol. III), p. 221-224.
- 16 Kulkarni A., Marwan N., Parrott L., Proulx R., Webber Jr. C. L. *International Journal of Bifurcation and Chaos* 21(4), 997-1001, (2011).
- 17 Belozеров V.Ye., Zaytsev V.G. *Sistemnyye tekhnologii* 3 (92), 42-49. (2014).
- 18 Kirichenko L., Baranovskiy A., Kobitskaya YU., *International Journal «Information Content and Processing»* 3 (1), 16-37. (2016). (in russ)
- 19 Alimgazina N.Sh., Naurzbaeva A.Zh., Manapbaeva A.B., Tleubaeva I.S. *Bulletin of KazNU, physical series* 3 (58), 112-119, (2016). (in russ)
- 20 <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/>