

А.С. Ережимбетова\* , Ұ. Әбдіғалпай ,

Н.Ш. Алимгазинова , Н.Ұ. Дауылбай 

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

\*e-mail: azhar\_97kz@mail.ru

## КҮННІҢ ЖАРҚ ЕТУ СИГНАЛДАРЫН РЕКУРРЕНТТІК ТАЛДАУ

Бұл жұмыстар екурренттік диаграмма әдісімен Күннің жарқ етуінің пайда болған кезеңдеріндегі рентгендік сәулелену сигналдары егжей-тегжейлі зерттелді. Зерттеу нысаны ретінде GOES-15 (Geostationary Operational Environmental Satellite) ғарыштық спутнигі алған  $\lambda = 0.1 \div 0.8$  нм және  $\lambda = 0.05 \div 0.4$  нм толқын ұзындығындағы рентген сәулесінің уақытша ағындары қолданылды. 2015–2020 жылдардағы Күн белсенділігінің оқиғаларын талдау кезінде 2015–2019 жылдар аралығында ең күшті Күннің жарқ етулері 2017 жылдың қыркүйек айында №2673 дақтар тобында болғандығы анықталды. Осы дақтар тобында 2017 жылдың 6 қыркүйегінде Х9,3 классындағы Күннің жарқ етуінің пайда болған себептері егжей-тегжейлі талданды. Сонымен қатар Күннің жарқ етудің әр оқиғасы үшін уақыттық, сонымен қатар рекурренттік диаграммалар тұрғызылды. Х, М және С классындағы Күннің жарқ ету оқиғаларының рекурренттік диаграммаларды талдау кезінде жұмсақ рентген сәулеленуі қатаң рентген сәулеленуіне қарағанда Күндегі процестер туралы көбірек ақпарат беретіні туралы толығымен анықталды. Қарастырып отырған Күннің жарқ ету кезіндегі жоғары энергиялы бейстационарлы біркелкі емес сигналдардың ерекшеліктерін, сонымен қатар олардың уақыт қатарындағы өзгерістерді (кезеңділікті) рекурренттік диаграмма әдісі арқылы анықтау тиімді екені көрсетілді.

**Түйін сөздер:** күн, дақтар тобы, жарқ ету, рентген сәулеленуі, бейсызық талдау, рекурренттік диаграмма.

A.S. Yerezhimbetova\*, U. Abdigappar,  
N.Sh. Alimgazinova, N.U. Dauylbay

Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty,

\*e-mail: azhar\_97kz@mail.ru

### Recurrent analysis of solar flare signals

In this paper, the signals of the sun's X-ray radiation during solar flares are studied using the method of recurrent diagrams. The time fluxes of X-ray radiation at the wavelengths  $\lambda = 0.1 \div 0.8$  nm and  $\lambda = 0.05 \div 0.4$  nm, obtained by the GOES-15 (Geostationary Operational Environmental Satellite) space satellite, were used as the objects of the study. It was found that in the period from 2015 to 2019, the strongest solar flares occurred in September 2017 in the group of spots №2673. The causes of the Х9,3 class flare from 06.09.2017 that occurred in this group of spots are analyzed in detail. Time and recurrent diagrams are plotted for each solar flare event. Analysis of recurrent diagrams for X-, M-, and C-class solar flare events revealed that soft X-ray radiation provides more information about the processes occurring on the Sun than hard X-ray radiation. It is shown that the method of recurrent diagrams more clearly captures the features and detects changes (periodicity) in a non-stationary non-uniform time series that corresponds to time intervals of high-energy solar events.

**Key words:** Sun, group of spots, flare, X-ray radiation, nonlinear analysis, recurrent diagram.

А.С. Ережимбетова\*, Ұ. Абдіғалпай,  
Н.Ш. Алимгазинова, Н.Ұ. Дауылбай

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы,

\*e-mail: azhar\_97kz@mail.ru

### Рекуррентный анализ сигналов солнечных вспышек

В данной работе были исследованы сигналы рентгеновского излучения Солнца в периоды солнечных вспышек с применением метода теории динамического хаоса – рекуррентного анализа. В качестве объектов исследования были использованы временные потоки рентгеновского

излучения на длинах волн  $\lambda = 0.1 \div 0.8$  нм и  $\lambda = 0.05 \div 0.4$ , полученные космическим спутником GOES-15 (Geostationary Operational Environmental Satellite). Анализ событий солнечной активности за 2015–2020 годы показал, что в период с 2015 по 2019 годы наиболее сильные солнечные вспышки произошли в сентябре 2017 года в группе пятен №2673. В работе подробно проанализированы причины возникновения вспышки класса X9,3 от 06.09.2017 г., возникшей в данной группе пятен. Для каждого события солнечной вспышки построены временные и рекуррентные диаграммы. Анализ рекуррентных диаграмм для событий солнечных вспышек X, M и C класса выявил, что мягкое рентгеновское излучение дает больше информации о происходящих процессах на Солнце, чем жесткое рентгеновское излучение. Показано, что метод рекуррентных диаграмм более четко улавливает особенности и обнаруживает изменения (периодичность) в нестационарном неравномерном временном ряде, который соответствует промежуткам времени высокоэнергетичных солнечных событий.

**Ключевые слова:** Солнце, группа пятен, вспышка, рентгеновское излучение, нелинейный анализ, рекуррентная диаграмма.

## Кіріспе

Күн әр түрлі белсенділік түрлерін көрсетеді және оның сыртқы түрі үнемі өзгеріп отырады, мұны көптеген жердегі және ғарыштағы бақылаулар дәлелдейді. Ең танымал құбылыс – бұл осы кезеңдегі Күн бетіндегі Күн дақтарының санының азаюымен және өсуімен Күн белсенділігінің 11 жылдық циклі [1]. Дақтар әдетте әр Күн циклінде кезектесетін қарама-қарсы магниттік полярлығы бар жұп түрінде болады. Күн дақтарының жанындағы магнит өрісінің сызықтары көбінесе бір-бірімен тоғысады, қиылысады және қайта құрылады. Бұл, Күн жарқ етуі деп аталатын, энергияның кенеттен жарылуына әкелуі мүмкін [2].

Күннің жарқ етуі ғарышқа көп мөлшерде сәулелену шығарады, кейде тәждік массаның атқылауымен және көбінесе жоғары энергиялы протондар мен электрондардың үлкен атқылауларымен бірге жүреді, сол себептен олар Күн желінің бөлшектерінің «қалыпты» энергия деңгейінен асып түседі. Осындай құбылыстар бүкіл Күн жүйесіне әсер етеді. Мысалы, Жердің атмосферасы мен магнитосферадағы көптеген құбылыстар: магниттік дауылдар, қысқа толқындардағы радиобайланыстың үзілуі, радионавигациялық құрылғылардың жұмысының бұзылуы және т.б. осыған байланысты болады. Жарқ ету кезінде пайда болатын процестердің барлық түрлерін және көп мөлшердегі энергияның жылдам шығарылуына әкелетін механизмдерді түсіндіру заманауи астрофизиканың маңызды міндеттері болып табылады [1].

Қазіргі таңда ғылымның әр түрлі бағытындағы зерттеушілердің көбі Дж. Экман, О. Кампост және Д. Рюэлл құрастырылған визуалды әдіс-рекурренттік диаграмма әдісін [3] кең

қолданады. Бұл қолданылуында мәліметтердің уақыттық қатарларына ерекше шарттарды талап етпейтін және процестің динамикалық бейнесін тұтастай көруге мүмкіндік беретін диссипативті динамикалық жүйенің іргелі қасиеттеріне негізделген жаңа құрал. Іс жүзінде барлық табиғат құбылыстары нақты көрінетін рекуррентті көрсеткішті иеленеді [4].

Сондықтан, жұмыстың негізгі мақсаты жарқ ету кезіндегі Күннің сәулелену сигналдарының динамикалық көрсеткішін бейсызық талдаудың визуалды әдісі – рекурренттік диаграммалар әдісі көмегімен зерттеу болып табылады.

## Зерттеу нысаны мен әдісі

### *Рентген сәулелену*

Жарқ ету белгілерін жүйелі түрде 30-шы жылдардың соңында зерттей басталды. Жарқ ету құбылыстың статикасы, динамикасы мен морфологиясына арналған көптеген зерттеулер жасалуда, әр оқиғаның физикалық жағдайлары, құрылымдық ерекшеліктері және басқа сипаттамалары қазіргі кезде әртүрлі әдістермен анықталып жатыр. Сонымен қатар, жарқ ету энергия көздері мәселесін шешу үшін және Күн жарқ етудің табиғатын анықтау үшін олардың сәулеленуінің барлық түрлерін жан-жақты зерттеу қажеттілігі әлі де басты назарда болып отыр [5].

Жарқ етудің энергия таратуымен қатар, рентгендік сәулелену кезінде оның таралуы ерекше қызығушылық тудырады. Шындығында, бұл энергия шығарудың бастапқы көзінің уақыттық әсерін көрсетеді. Осы бағыттағы алғашқы зерттеулер көрсеткендей, қатты рентгендік сәулеледегі жарылу ұзақтығы белгілі бір кезеңдегі Күн белсенділігінің деңгейіне байланысты болып табылады [6].

Рентген сәулеленуі екі түріне бөлінеді: жұмсақ рентгендік сәулелену ең төменгі фотон энергиясына және сәулелену жиілігіне (ең үлкен толқын ұзындығымен) ие болады, ал қатаң рентгендік сәулелену ең үлкен фотон энергиясымен және сәулелену жиілігімен (ең аз толқын ұзындығына) сипатталады. Жұмсақ және қатаң рентгендік сәулелену арасындағы шартты шекара толқын ұзындықтары шкаласында шамамен 2 Å ( $\approx 6$  кэВ) орналасқан. Жұмсақ рентгендік диапазон ( $1 \div 8$  Å) қызығушылық тудырады, өйткені ол 60 секундтан  $\sim 10$  сағатқа дейінгі ұзақтығы бар энергия шығарудың жылу фазасын сипаттайды, осылайша оптикалық жарқылдың барлық уақыт аралығын қамтиды [7].

1–8 Å диапазонындағы жарқ етудің рентгендік сәулеленуі осы диапазондардағы ағынның қуатын ( $10^{-8}$ ,  $10^{-7}$  Вт/м<sup>2</sup> және т.б.) сипаттайтын және тиісті көрсеткішпен (А, В, С, М, Х) көрсетілген класстарға бөлінеді (1.1-кестеде көрсетілген).

1-кесте – Рентген жарқ етулерінің классификациясы [8]

№	Класс	Жарқ ету қуаты (Вт/м <sup>2</sup> )
1	X	$10^{-4} - 10^{-3}$
2	M	$10^{-5} - 10^{-4}$
3	C	$10^{-6} - 10^{-5}$
4	B	$10^{-7} - 10^{-6}$
5	A	$10^{-8} - 10^{-7}$

Жұмыста Күннің жарқ ету кезеңдеріндегі рентгендік сәулеленуінің күнделікті мәліметтер қолданылды. Бір жыл ішінде В, С, М, Х класстардағы жарқ етудің пайда болу жиілігі және олардың Күн белсенділігі циклінде таралуы туралы ақпарат арнайы жарқ ету мониторингімен айналысатын арнайы көздерден алынды [6]. Күннің жарқ етулерінің оқиғалары және оған сәйкес рентгендік сәулелену деректері NOAA (Мұхиттық және Атмосфералық зерттеулердің ұлттық әкімшілігі) сайтынан алдынды [9]. Бұл деректер – рентгендік сәулелену уақыт қатарлары, олар 2 секунд дискретті уақытымен GOES-15 ғарыш аппаратымен тіркелген.

#### Рекурренттік талдау

Рекурренттік диаграммалар жүйелер дамуының сол және өзге де сипатына жауап беретін негізгі құрылым қатарын айқындайтын графикалық құрал болып табылады. Ең алғаш 1987 жылы Экманнның және басқа да зерттеушілер

жұмыстарында [3]  $x(t)$  күйінің  $m$  – өлшемді фазалық траекторияларын 1 (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. Рекурренттік диаграмма мына қатынаспен анықталады:

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

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

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

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

Аумақты анықтаудың екі әдісі бар:

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

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

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 рекурренттік бейнелердің 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  $\varepsilon_i$  аумақтағы өзінің арақашықтығы таңдалынады.  $x_i$  аумағы  $x_j$  аумағымен сәйкес келмегендіктен  $R_{i,j} \neq R_{j,i}$  тең бола-

ды. Рекурренттік диаграммада негізгі диагональға қатысты асимметрия бақыланады, алайда, диаграмма массивтерінің барлық бағандары бірдей рекурренттілік тығыздығын иеленеді.  $x_i$  нүктесінің аумағын анықтауды таңдау зерттеушімен өз білгенінше таңдалынып алынады.

$\mathcal{E}_i$  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.

Рекурренттік диаграмманың негізгі ерекшелігі қысқа және бейстационарлы қатар жағдайында да көпөлшемді фазалық траекторияларды визуализациялау мүмкіндігі болып табылады. Геометриялық құрылымының түріне байланысты таңдап алынған процестің уақыт бойынша эволюциясын қадағалауға, бақылауға болады. Экманнның және басқа да ғалымдардың жұмыстарында [3, 10] 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 жұмыстарда [10, 11] келтірілген.

### Зерттеу нәтижелері және оларды талдау

*№2673 Күн дақтарының тобындағы Х9.3 класындағы Күннің жарқ етуі*

Жалпы зерттеуде 2015-2020 жылдар аралығында жарқ ету оқиғалары талданды. Ең жоғары

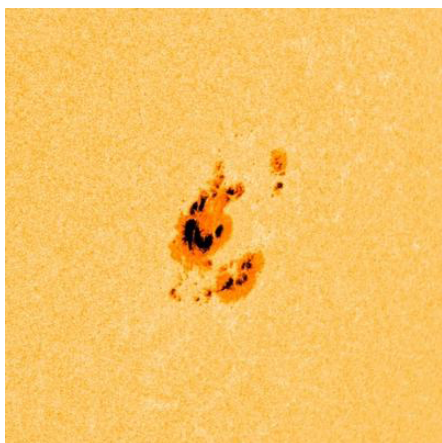
класстағы жарқ етулері 2017 жылдың қыркүйек айында №2673 Күн дақтарының тобында болғанын анықталды. Күн жарқ етулерінің пайда болу себебін түсіну үшін осы топ толығырақ қарастырылды (1 кесте).

Осы кесте бойынша, 06.09.2017 ж. Х9.3 класындағы күшті Күн жарқ етуі Күн бетінің S10W30 координатты аймағын және 2 648,456 млн. км<sup>2</sup> – ге тең ауданын алып жатқан, 33 ірі және майда дақтардан тұратын күрделі дақтар тобында (1 сурет) болғандығын көрсетеді. Бұл кезеңдегі дақтар тобының магнитограммасы (1,ә сурет) оң және теріс полярлықтың болуын көрсетті, яғни бұл Күн дақтарының биполярлық тобы. Ол жетерліктей күрделі, сондықтан магнит өрісінің ешбір күш сызығы қарама-қарсы полярлықты дақтар арасынан өткізіле алмайды. Бұл жерде бір жартыкөлеңкеде қарама-қарсы полярлы аймақты көреміз. Бұл магнит өрісі күштерінің жалпы сызықтарымен байланысқан әртүрлі дипольдердің қарама-қарсы полярлығы бар, Күн дақтарының құрылымының түзілуінен пайда болатын – дельта дағы. Осылайша, дақтардың магнитудалар тобына бір дельта нүктесі бар бета-гамма-магниттік конфигурация жатады. Дельта дақтардың өте белсенді бола алатыны және де осы күнде де бақыланатын ең қарқынды Күн жарқ етуін тудыратыны жақсы белгілі (2 сурет) [17]. Zürich/Macintosh жүйесі бойынша дақтар тобы – ДКС, бұл дақтар ұзындығы <10°, топтағы таралуы симметриялы емес >2,5°, жартыкөлеңкесі ықшамдылыққа ие.

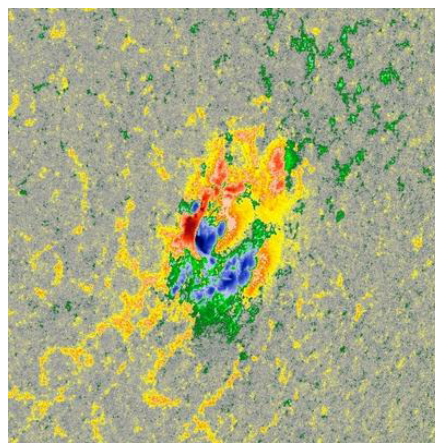
2-кесте – 2017 жылдағы 04.09 – 10.09 аралығындағы №2673 Күн дақтарының тобы туралы негізгі мәліметтер

Күні	Жарқ ету класы	Дақтар саны	Өлшемі, МН*	Магнитудасы б-ша дақтар класы	Zürich/Macintosh жүйесі б-ша дақтар класы	Координаттары
04.09.2017	M5.5	12	130	$\beta$ - $\gamma$ - $\delta$	DSC	S10W02
05.09.2017	M4.2	28	680	$\beta$ - $\gamma$ - $\delta$	DKC	S10W16
06.09.2017	X9.3	33	880	$\beta$ - $\gamma$ - $\delta$	DKC	S10W30
07.09.2017	X1.3	24	960	$\beta$ - $\gamma$ - $\delta$	EKC	S10W43
08.09.2017	M8.1	21	1000	$\beta$ - $\gamma$ - $\delta$	EKC	S10W57
09.09.2017	M3.7	19	1060	$\beta$ - $\gamma$ - $\delta$	DKC	S09W70
10.09.2017	X8.2	8	530	$\beta$ - $\gamma$ - $\delta$	DKC	S09W83

\* Күн дақтары топтарының ауданы «күн жарты шарының миллионнан бір бөлігінде» есептеледі (МН), 1000 МН 3 миллиард 43 миллион 700 мың шаршы шақырымға сәйкес келеді.



а) Көрінетін сәулелену, ажыратымдылығы 1 бұрыштық секунд  $6173 \text{ \AA}$  –дегі FeI жұту жолағындағы дақтар тобының суреті (қарқындылық диаграммасы)

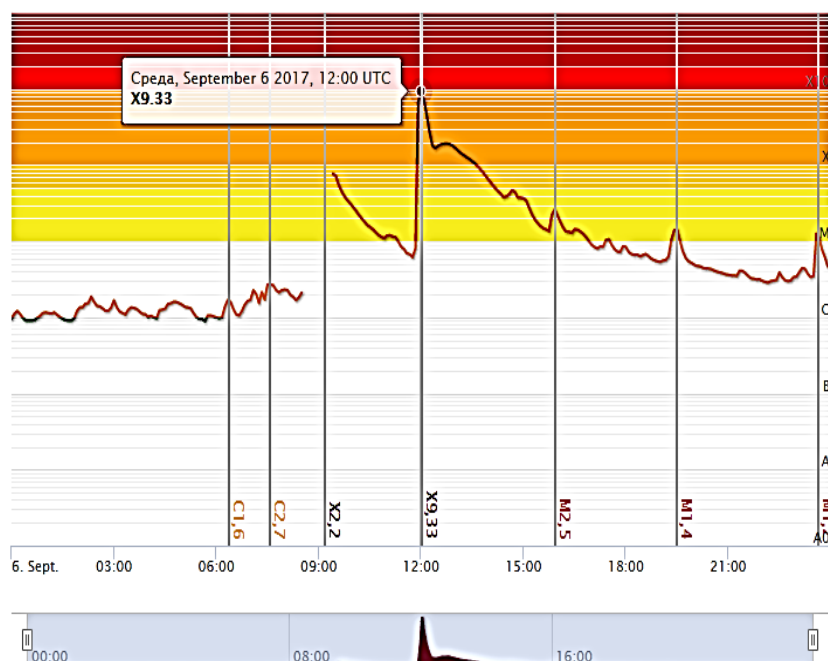


ә) дақтар тобының магнитограммасы: сары-қызыл түстер теріс полярлықты, ал жасыл-көк түстер оң полярлықты көрсетеді

**1-сурет** – 6 қыркүйек 2017 жыл. X9.3 класстағы жарқ ету кезіндегі № 2673 Күн дақтар тобының НМІ (Helioseismic and Magnetic Imager) құралы арқылы алынған бейнелері [12]

2-суретте көрсетілгендей, бұл күні №2673 Күн дақтары тобынан жеті үлкен Күн жарқ етуі тіркелді. Осында M2,5 M1,4 және M1,2 класстарының үш жарқ етулері төмен радиобөгеуілдерді және әлсіз геомагниттік дауылдарды тудыратынын көреміз (R1 деңгейі). X2.2

класында жарқ ету кезінде қатты радиобөгеуілдер мен орташа геомагниттік дауыл пайда болады (R2 деңгейі), ал X9.33 жарқ етуі кезінде өте үлкен радиобөгеуілдер мен күшті геомагниттік дауылдар орын алады (R3 деңгейінің жоғарғы шекарасы).



\*Радиобайланыстың өшу деңгейі – R-шкала: R1 – төменгі (M1 класы бойынша рентгендік шек және ағын ( $10^{-5} \text{ Вт/м}^2$ ) бойынша; R2 – күшті (M5, ( $5 \times 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$ ); R3 – үлкен (X1 ( $10^{-4} \text{ Вт/м}^2$ ); R4 – жоғарғы X10 ( $10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ ); R5 – экстремалды X20 ( $2 \times 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ )

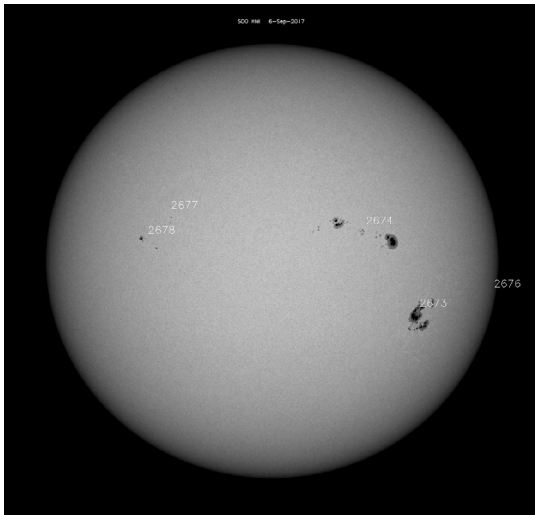
**2-сурет** – GOES рентгендік серіктігінің бақылауы бойынша 6 қыркүйек 2017 жылғы рентген сәулеленуінің 1-8  $\text{\AA}$  өткізу жолағында орташа қарқындылығының минуттық мәліметтері [13]



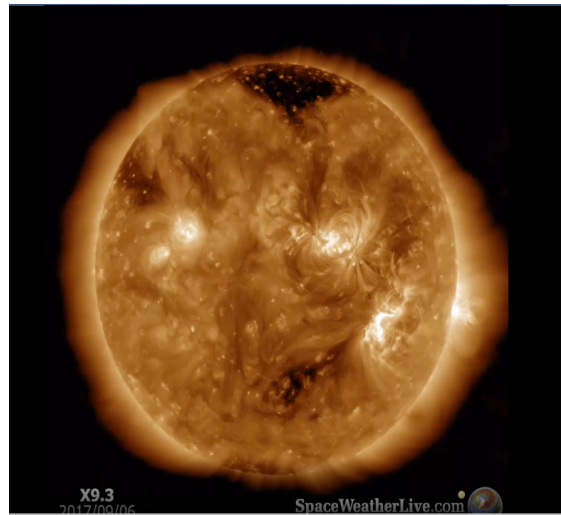
3-суретте 06.09.2017 ж. үшін X9.3 класындағы берілген Күннің жарқ етуі үшін SDO/HMI магнитограммасы ұсынылған. Бұл жерде X класының жарқ етуі пайда болған аймағы, қарастырылып отырған №2673 дақтар тобы Жердің күндізгі жағында және Жерге қарайтын Күн дискісінің орталығына өте жақын орналасқандығын көреміз. Сондықтан

да жарқ етуден радиобөгеуілдердің жоғарғы деңгейі (R3), сондай-ақ өз кезегінде тәж массасының айтарлықтай атқылауын тудыратын, Жердегі қатты геомагниттік дауылдарға әкелетін күшті және ұзақты Күн сәулеленуі туындайды.

4- және 5-суреттерде әр түрлі уақыт кезеңінде Күн жарқ етуі көрсетілген.



а) магнитограмма

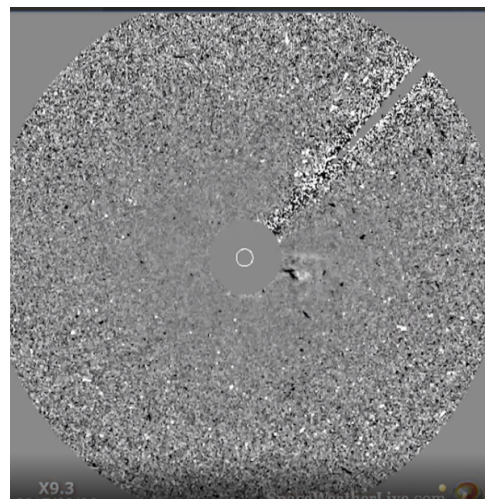


ә) көрінетін диапазонда Күннің суреті

**3-сурет** – HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) бейнелері. 6 қыркүйек 2017 жылғы X9.3 класстағы жарқ ету кезіндегі Күн дақтар топтарының магнитограммада орналасуы [14-13]

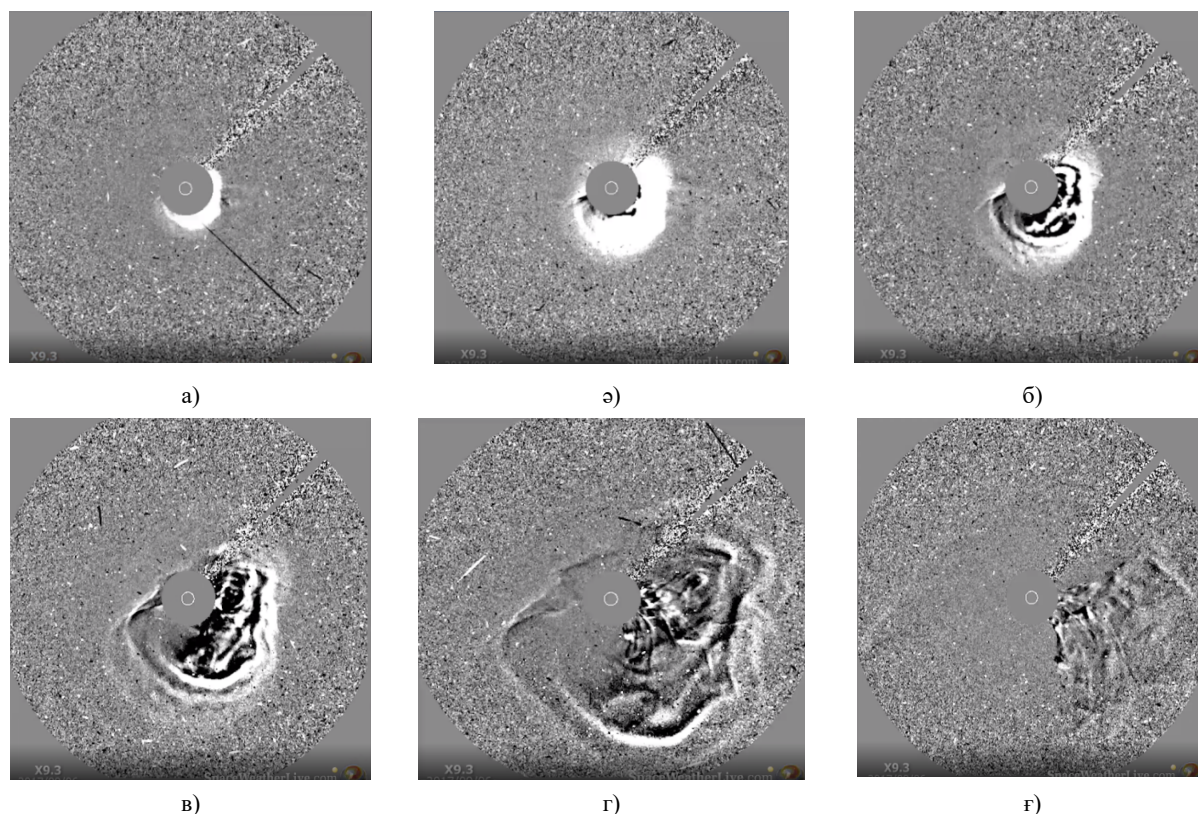


а) HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) құрылғысымен алынған көрінетін диапазонда Күннің суреті



ә) Күн дискісінен (орталықтағы сұр диск) түсетін жарықты түсірмейтін спектрометриялық коронограф (LASCO) арқылы түсірілген SOHO суреті

**4-сурет** – 6 қыркүйек 2017 жыл. X9.3 класстағы жарқ етудің бастапқы кезеңі [13-15]



**5-сурет** – Спектрометриялық коронограф (LASCO) арқылы түсірілген SOHO суреті [16].  
6 қыркүйек 2017 жыл. X9.3 класстағы жарқ ету процесінің уақыт бойынша дамуы

*Рентген сәулелену сигналдарының рекурренттік диаграммалары*

Күн сыртқы ортамен энергиямен, затпен және ақпаратпен алмасатын ашық динамикалық жүйенің жарқын үлгісі болып табылады. Мұндай динамикалық жүйе әр түрлі толқын ұзындықтарында тіркелетін сәулелену ағынын талдауы арқылы зерттелуі мүмкін болады.

Күндегі көптеген процестер периодтылық немесе қалыпсыз цикл сияқты айқын рекуррентті мінез-құлыққа ие болып табылады. Бізді Күндегі бейстационарлық жоғары энергиялық процестер қызықтырады. Сондықтан бірінші ең жоғары деңгейдегі сигналдарды анықтап алдық – олар X класстағы жарқ ету кезіндегі сигналдар болып табылады (2-кесте).

**3-кесте** – X классындағы 2017 жылы қыркүйек айында №2673 дақтар тобында пайда болған жарқ етулер тізімі

№	Жарқ ету класы	Күні	Басталу уақыты, UT	Максимум мәні уақыты, UT	Аяқталу уақыты, UT
1	X9,3	06.09.2017	11:53	12:02	12:10
2	X8,2	10.09.2017	15:35	16:06	16:31
3	X2,2	06.09.2017	08:57	09:10	09:17
4	X1,3	07.09.2017	14:20	14:36	14:55

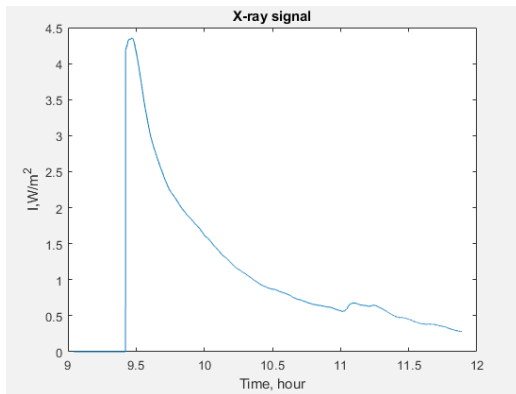
Рентгендік сәулеленудің жұмсақ және қатаң түрлеріне уақыт бойынша нормаланған қарқындылығының өзгеру графиктері 6-суретте келтірілген. 7-суретте осы сигналдарға сәйкес рекурренттік диаграммалар көрсетілген.

Рекурренттік диаграммалар графиктік құрал болып табылғандықтан, онда жүйенің әр түрлі даму сипатына жауап беретін негізгі құрылымдарды анықтауға болады. Диаграммаларда құрылымдардың екі негізгі класын ажыратады: топология және текстурасы. Ірі масштабты құрылымдарға топология сәйкес келеді. Тексуралар класына шағын масштабтарда сипатталатын рекурренттік графиктердің геометриялық құрылымдарын жатқызады.

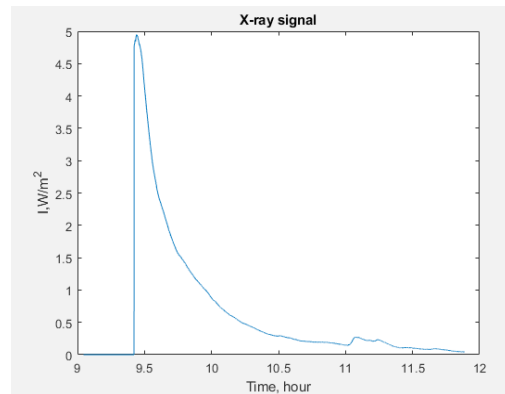
Рекурренттік талдау жоғарыдағы кестеде келтірілген оқиғалар үшін қолданылды. Рекурренттік диаграммаларды құру үшін диапазон

мен қарастырылатын нүктелердің қамтылу аймағын таңдау керек болды. Диапазон тікелей  $p$  параметріне байланысты болады. Қамтылу аймағы  $\varepsilon$  шамасымен сипатталады. Біздің зерттеуде кеңістікті енгізудің өлшемділігі 2-ге тең, ал уақыт бойынша қадам 1-ге тең деп таңдалды.  $p$  және  $\varepsilon$  параметрлері рекурренттілік өлшем  $RR$  шамаларының сәйкестігін ескере отырып, 0,5 және 0,15 мәндері таңдалынды.

Іс жүзінде барлық рекурренттік диаграммаларда динамикалық жүйенің кенет өзгерістерін және бейстационарлықты сипаттайтын, нәтижесінде рекурренттік графиктің құрылымында айқын көрінетін ақ аймақтар пайда болды, контрастты топологиясы анық көрінген. Сондай-ақ біз рекурренттік диаграммаларда текстураны байқамадық, яғни бұл сигналдар күшті уақыттық флуктуацияларға ұшырамаған болып табылады.

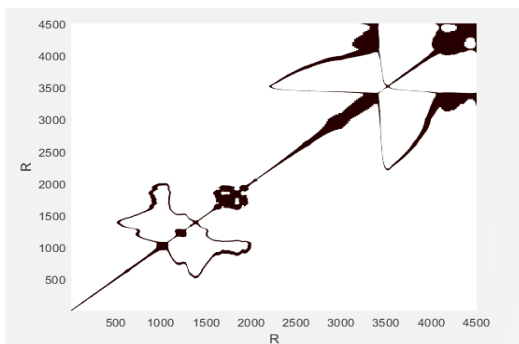


а)  $\lambda=0.1 - 0.8$  нм

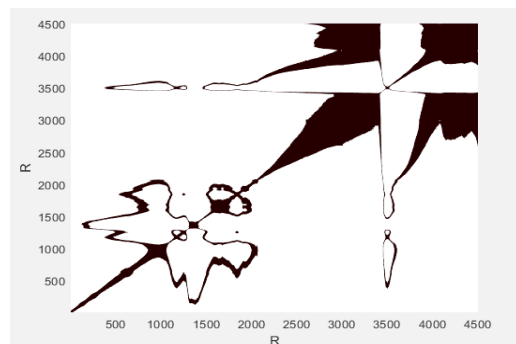


ә)  $\lambda=0.05 - 0.4$  нм

6-сурет – 6 қыркүйек 2017 жыл. Х9.3 класстағы жарқ ету кезіндегі рентген сәулеленуі



а)  $\lambda=0.1 \div 0.8$  нм



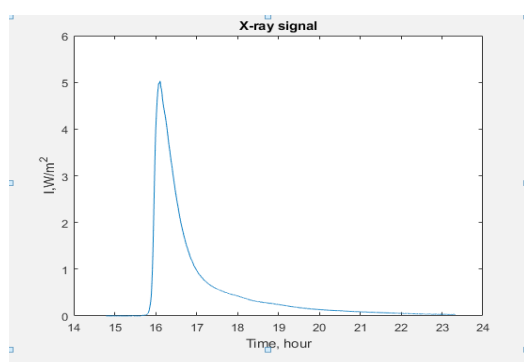
ә)  $\lambda=0.05 \div 0.4$  нм

7-сурет – 6 қыркүйек 2017 жыл. Х9.3 класстағы жарқ ету сигналдарының рекурренттік диаграммалар

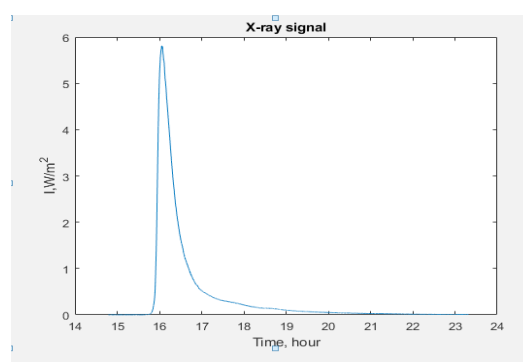


Барлық X классты жарқ ету сигналдардың (жұмсақ және қатаң рентген сәулеленуі бойынша) рекурренттік диаграммаларда үлкен құрылымдарды қарастырдық. 8 суретте 10.09.2017 жылғы жарқ ету үшін (X8,2) көрсетілген диаграмма басқалардан (6, 10, 12 суреттер бейнеленген) айтарлықтай ерекшеленетінін көреміз. Айырмашылық мынада: 8 суретте диагональды осьте қосымша құрылымдар жоқ, ал 6, 10 және 12 суреттерде диаг-

рамманың осьтері мен диагональдарына параллель және перпендикуляр сызықтармен түзілген құрылымдарды байқаймыз. Бірінші жағдайда, 10.09.2017 жылғы оқиға үшін тек бір диагональды сызықтың болуы – бұл процесс уақыт өте келе дамып, сигналдың траекториясы өзін қайталамайтынын көрсетеді. Сигналдардың стохастық компоненті және ішкі құрылымы жоқ, сигналдың әрбір келесі компоненті алдыңғы күйдің қандай болғанына байланысты.

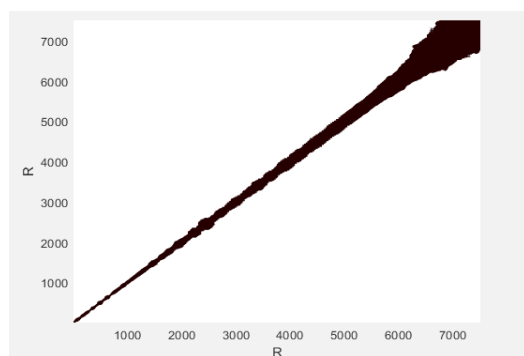


а)  $\lambda=0.1 \div 0.8$  нм

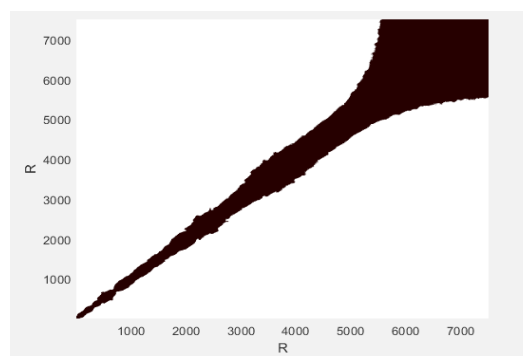


ә)  $\lambda=0.05 \div 0.4$  нм

**8-сурет** – 10 қыркүйек 2017 жыл.  
X8, 2 класстағы жарқ ету кезіндегі рентген сәулеленуі



а)  $\lambda=0.1 \div 0.8$  нм



ә)  $\lambda=0.05 \div 0.4$  нм

**9-сурет** – 10 қыркүйек 2017 жыл.  
X8,2 класстағы жарқ ету сигналдарының рекурренттік диаграммалар

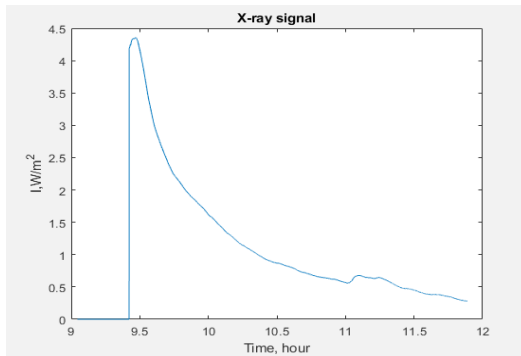
Жұмсақ және қатаң рентген сәулеленуіне арналған сигналдарды (9 сурет) салыстыра отырып,  $\lambda = 0,1 \div 0,8$  нм толқын ұзындығында тіркелген жарқ ету ұзақтығы  $\lambda = 0,05 \div 0,4$  нм толқын ұзындығымен салыстырғанда ұзағырақ болатынын көреміз. Тиісінше, біз рекурренттік диаграммаларда әртүрлі қалыңдықтағы негізгі диагональды көреміз. Сигналды қарастыру уақыты мен сигналдағы нүктелер саны бірдей таңдалғандықтан, қатаң сәулелену жағдайында

қоюлану жарқ ету аяқталғаннан кейін сигналдың құрамдас бөліктері есебінен пайда болды. Сигналды уақыттық қатарларын қарастырғанда, тыныш Күн жағдайында рентген сәулеленуінің фондық компонентінің шамалы ауытқуын байқауға болады. Рекурренттік диаграммаларда, бұл негізгі диагональ бойымен тік және көлденең сызықтардың шоғырларына қара аймақтар сәйкес келеді. Қара аймақтар жүйе біршама уақытқа қатып қалатындай жүйенің күйі азап

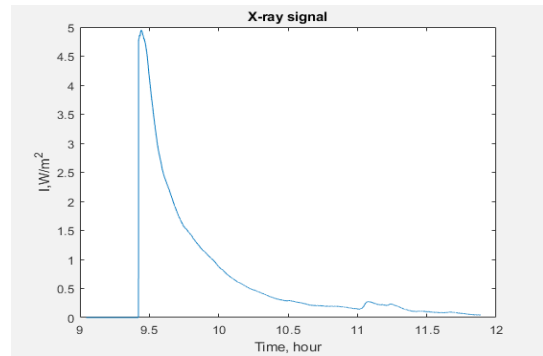
өзгеретін уақыт интервалдарына сәйкес келеді.

06.09.2017 ж. және 07.09.2017 ж. оқиғалары үшін сигналдар мен рекурренттік диаграммаларды қарастыра отырып, біз негізгі құрылымдарда кейбір ұқсастықтарды көреміз. Барлық рекурренттік диаграммаларда негізгі диагональға қатысты қосымша, симметриялы құрылымдар бар. Мұндай құрылымдардың пайда болуы қарастырылып отырған траектория

әр түрлі уақыт бөліктерінде фазалық кеңістіктің сол бір аймағын қайта жүріп, өзін-өзі қайталағандағы жағдай туралы айтады. Уақыт диаграммаларын талдағаннан кейін, жарқ ету процесінің барлық жағдайларында сәулелену қарқындылығының төмендеуі және белгілі бір уақытта қарқындылықтың аздап жоғарылауы, содан кейін одан әрі төмендеуі болатыны анықталды.



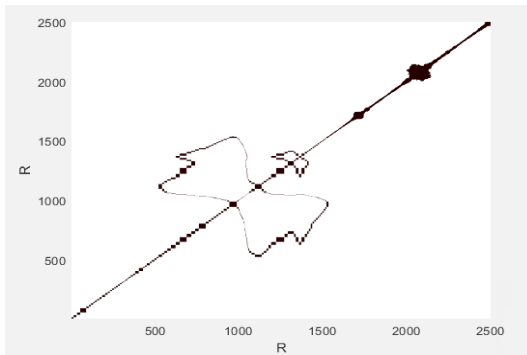
а)  $\lambda=0.1 \div 0.8$  нм



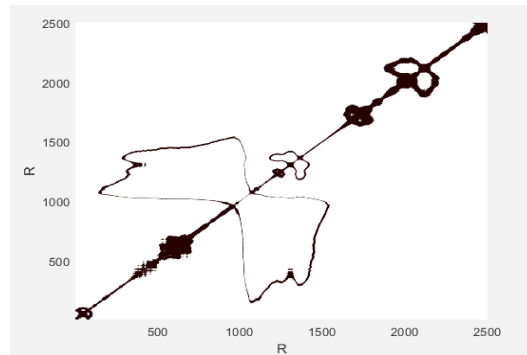
ә)  $\lambda=0.05 \div 0.4$  нм

**10-сурет** – 6 қыркүйек 2017 жыл.

X2,2 класстағы жарқ ету кезіндегі рентген сәулеленуі



а)  $\lambda=0.1 \div 0.8$  нм



ә)  $\lambda=0.05 \div 0.4$  нм

**11-сурет** – 6 қыркүйек 2017 жыл.

X2,2 класстағы жарқ ету сигналдарының рекурренттік диаграммалар

Рекурренттік графиктердегі құрылымдардағы сызықтардың ұзындығы траектория аудандарының жергілікті жақындығының уақытша масштабына, ал уақыт аралығының көлбеуі, осы уақыт қатарларының күйлерінің реттілік бағытына сәйкес келеді және осы процестердің ішкі уақытын сипаттайды. 06.09.2017 ж. және 07.09.2017 ж. оқиғалары үшін деректердің өзгеруінде белгілі бір заңдылық болатын барлық жағдайларда, кішігірім құрылымдардағы диаго-

нальды сызықтардың тұрақты емес көрінісі – хаустық процесті сипаттайды.

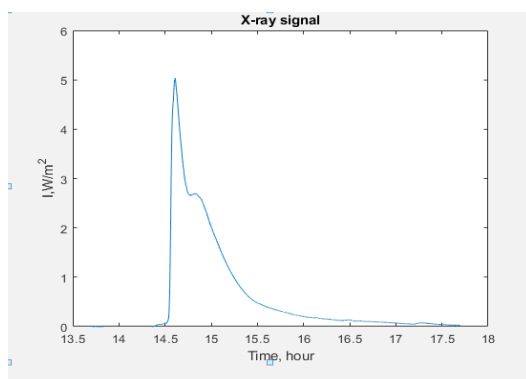
$\lambda=0,1 \div 0,8$  нм және  $\lambda=0,05 \div 0,4$  нм толқын ұзындықтарындағы рекурренттік диаграммаларын салыстыра отырып, жарқ ету кезіндегі жұмсақ рентгендік сәулелену ұзақтығы қатаң сәулеленуге қарағанда ұзағырақ болатынын көреміз. Алайда, қатаң сәулеленуге арналған рекурренттік диаграммалар масштабты құрылымдармен қаныққан, бұл, ең алдымен, берілген

толқын ұзындығындағы қарқындылықтың салыстырмалы өзгерісі жұмсақ рентген сәулелеріне қарағанда үлкен және жарқыл процесі толығымен қарастырылатындығына байланысты. Мұны уақыттық диаграммаларда байқауға болады, онда уақыт өте келе сәулелену қарқындылығының орташа квадраттық ауытқуға нормаланған өзгерісі көрсетілген (6, 9, 11-суреттер). Қара аймақтардың пайда болуы сонымен қатар жүйенің күйі аз өзгертін уақыт аралықтарының болуын көрсетеді.

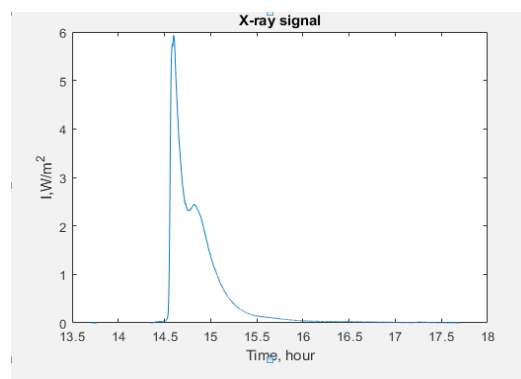
Сондай-ақ, зерттеу барысында біз X, M және C класстарындағы Күннің жарқ етуінің соңғы 5 жылдағы ең үлкен оқиғаларын тандадық. Оларға сәйкес рекурренттік диаграм-

малар салынды (13, 14, 15-суреттер). Мұнда біз рекурренттік графиктерде әртүрлі ірі және шағын масштабтық құрылымдарды байқаймыз. Күннің жарқ етуі неғұрлым күрделі және жоғары болса, диаграмма ішкі күрделі құрылымдармен қаныққан болады.

M классының жарқ етуі үшін диаграммада қара аймақтардың болмауы қызықты факт, бұл жарқ етудің хаостық емес екенін, оның эволюциясы қарапайым және табиғи екенін көрсетуі мүмкін. C класының жарқ етуі жағдайында, біз, рекурренттік диаграммада сигналдың тұрақсыз құраушыларының бар екенін көреміз, бұл көлденең және тік сызықтардың шоғырлануымен көрінеді.



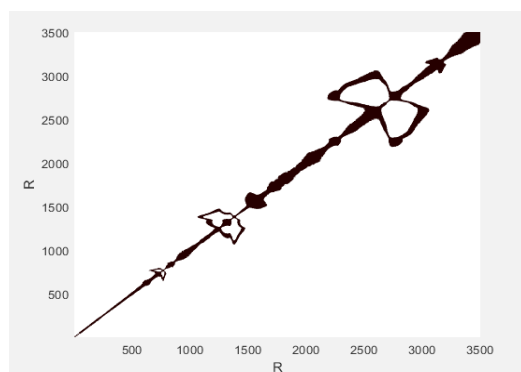
а)  $\lambda=0.1 \div 0.8$  нм



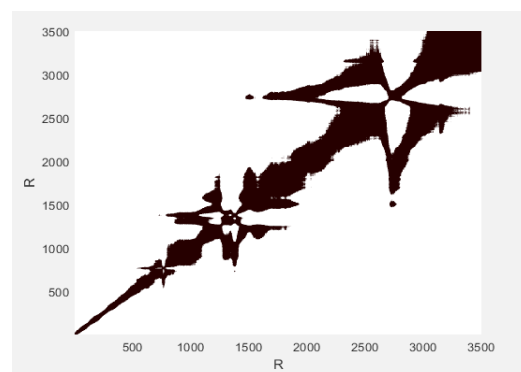
ә)  $\lambda=0.05 \div 0.4$  нм

12-сурет – 7 қыркүйек 2017 жыл.

X1,3 класстағы жарқ ету кезіндегі рентген сәулелену қарқындылығының өзгеруі



а)  $\lambda=0.1 \div 0.8$  нм



ә)  $\lambda=0.05 \div 0.4$  нм

13-сурет – 7 қыркүйек 2017 жыл.

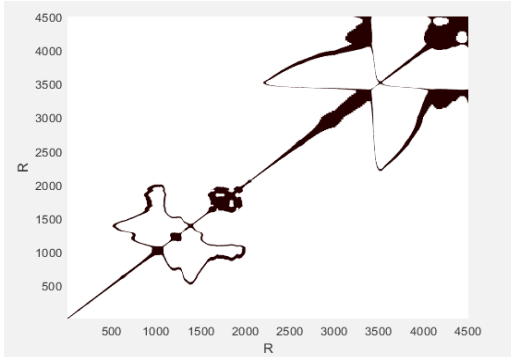
X1,3 класстағы жарқ ету сигналдарының рекурренттік диаграммалар

Күннің жарқ етуінің рекурренттік диаграммаларын ұзақтығы бойынша талдау, диагональ сызықта бірінші құрылымның пайда болуы екі жағдайда да уақыт айырмашылығымен байқалатынын көрсетті. Қысқа сигнал болған

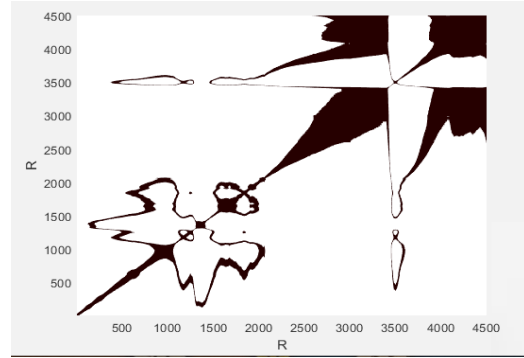
жағдайда ішкі құрылым диагональды сызықтың ортасында орналасады, ал ұзақ сигнал болған жағдайда ол сызықтың бірінші үштен бірінде болады. Бұл процестің динамикасындағы өзгерістер Күннің жарқ етуі дамуының әртүрлі

кезендерінде қысқа мерзімді және ұзаққа созылатын жарқ ету процестері үшін болатындығын көрсетеді. Ұзақ жарқ ету жағдайында процестің динамикасында тағы бір өзгеріс байқалады, бұл диагональды сызықта тағы бір құрылымның болуын көрсетеді. Жарқ етудің

басталу процесінің соңғы кезеңі әр жағдайға ұқсас, бірақ ұзақ уақыт болған жағдайда, біз, ақ аймақтардың жарықтары бар қара аймақтарды байқаймыз. Бұл Күн жарқ етуінің соңғы сатысында процестің кейбір заңсыздықтарының бар екенін көрсетеді.



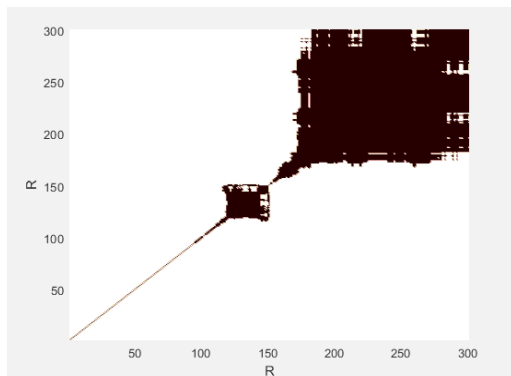
а)  $\lambda=0.1 \div 0.8$  нм



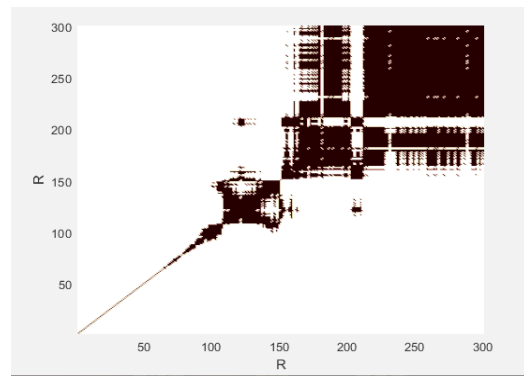
ә)  $\lambda=0.05 \div 0.4$  нм

**14-сурет** – 6 қыркүйек 2017 жыл.

X классының ең үздік жарқ етуінің рекурренттік диаграммасы



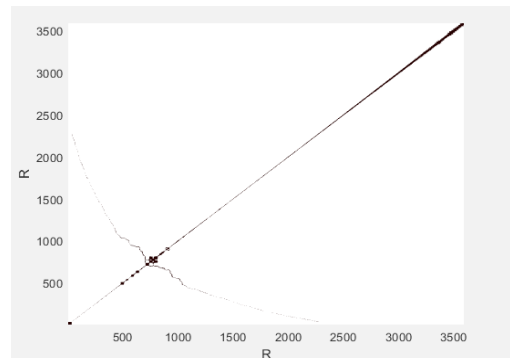
а)  $\lambda=0.1 \div 0.8$  нм



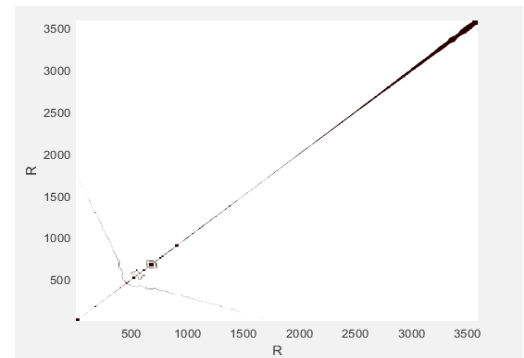
ә)  $\lambda=0.05 \div 0.4$  нм

**15-сурет** – 6 мамыр 2019 жыл.

C классының ең үздік жарқ етуінің рекурренттік диаграммасы



а)  $\lambda=0.1 \div 0.8$  нм



ә)  $\lambda=0.05 \div 0.4$  нм

**16-сурет** – 7 наурыз 2015 жыл.

M классының ең үздік жарқ етуінің рекурренттік диаграммасы

## Қорытынды

Күннің жарқ ету сигналдарының уақыттық және рекурренттік диаграммаларына жүргізілген талдау жұмсақ рентген сәулеленуі қатаң рентген сәулеленуіне қарағанда Күндегі процестер туралы көбірек ақпарат беретіні анықталды. Күннің жарқ ету оқиғаларына арналған рекурренттік диаграммаларды талдау Күннің жарқ ету классы неғұрлым күрделі және жоғары болса, диаграмма ішкі күрделі құрылымдармен қанық болатындығы анықталды. Х класты сигналдар, негізінен, стохастық компонентке ие емес,

олардың кейбіреулері үшін уақыт аралықтары анықталды, олардың барысында жүйенің күйі аздап өзгереді. М классының жарқ етуі үшін жарқ ету процесінің эволюциясы қарапайым және табиғи. С классының жарқ ету жағдайында, біз, Күннің жарқ етуінің соңғы сатысында процестің кейбір тұрақсыздығын бар екенін көреміз.

Осылайша, қарастырып отырған Күннің жарқ ету кезіндегі жоғары энергиялы бейстационарлы біркелкі емес сигналдардың ерекшеліктерін және солардың уақыт қатарындағы өзгерістерді (кезеңділікті) рекурренттік диаграмма әдісі арқылы анықтау тиімді екені көрсетілді.

## Әдебиеттер

- 1 Marov M.Y., Kuznetsov V.D. Solar Flares and Impact on Earth. In: F. Allahdadi, J. Pelton (eds). Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense. – Springer, Cham, 2014. – P.1-26.
- 2 Cliver E.W. Solar flare gamma-ray emission and energetic particles in space //AIP Conference Proceedings. – 1996. – Vol. 374. – P.45.
- 3 Eckmann J.P., Kamphorst S.O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems //Europhysics Letters 5. – 1987. – P. 973-977.
- 4 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.
- 5 Kasinsky V.V., Sotnikova R.T. Solar and Stellar Flares //I.A.U. Colloq. No 104. Poster Papers. Stanford, USA. – 1989. – P. 255-258.
- 6 Сотникова Р.Т. Солнце в рентгеновских лучах. – Иркутск: ИГУ, 2000, №1. – С. 96-101.
- 7 Сотников Р.Т., Москаленко А.В. Солнце в рентгеновских лучах // Труды VII симпози. по солнечно-земной физике России и стран СНГ. Троицк. – 1999. – С. 156-161.
- 8 Мирзоева И.К. Микровспышки в рентгеновском диапазоне излучения Солнца: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.03.03. – М., 2006 112 с. РГБ ОД, 61:06-1/820
- 9 <https://www.noaa.gov> – National Oceanic and Atmospheric Administration.
- 10 Алимгазинова Н.Ш., Наурызбаева А.Ж., Манапбаева А.Б., Икрамова С.Б., Кумаргазина М.Б., Кенжеғараева А.Д., Адилжан К. Применение метода рекуррентных диаграмм к анализу сигналов рентгеновского излучения Солнца // Вестник. Серия физическая. – 2017 – №4 (63). – С. 30-36.
- 11 Алимгазинова Н.Ш., Наурызбаева А.Ж., Манапбаева А.Б., Тлеубаева И.С., Рекуррентный анализ всплесков радиоизлучения Солнца // Вестник. Серия физическая. – 2016. – №3 (58). – С.112-119.
- 12 <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/> – GOES Space Environment Monitor Data describing the environment at geosynchronous orbit.
- 13 <https://www.spaceweatherlive.com/ru/arhiv/2017/09/06/dayobs.html> – Группы солнечных пятен. – 2017.
- 14 <https://www.spaceweatherlive.com/ru/arhiv/2017/09/06/xray.html> – Солнечная активность. – 2017.
- 15 <https://www.spaceweatherlive.com/en/news/view/301/20170906-major-x933-solar-flare.html> – Major X9.33 solar flare. – 2017.

## References

- 1 M.Y. Marov, V.D. Kuznetsov, Solar Flares and Impact on Earth. In: F. Allahdadi, J. Pelton (eds), (Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense. Springer, Cham., 2014), 26 p.
- 2 EW Cliver, Solar flare gamma-ray emission and energetic particles in space, AIP Conference Proceedings, 374, 45 (1996).
- 3 J.P. Eckmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle, Europhysics Letters 5, 973-977 (1987).
- 4 N. Marwan, M.C. Romano, M. Thiel, J. Kurths, Physics Reports, 438(5-6), 237-329 (2007).
- 5 V.V. Kasinsky, R.T. Sotnikova, Solar and Stellar Flares. I.A.U. Colloq. No 104. Poster Papers. Stanford, USA, 255-258 (1989).
- 6 R.T. Sotnikova Solntse v rentgenovskikh luchakh, (Irkutsk: IGU, №1, 2000), 96-101. (in Russ).



- 7 R.T. Sotnikova, A.V. Moskalenko, Solntse v rentgenovskikh luchakh, Trudy VII simpoz. po solnechno-zemnoy fizike, (Rossii i stran SNG. Troitsk, 1999), 156-161 (in Russ).
- 8 I.K. Mirzoyeva, Mikrovspyshki v rentgenovskom diapazone izlucheniya Solntsa: Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk : 01.03.03 Moskva, 2006 112 s. RGB OD, 61:06-1/820 (in Russ).
- 9 <https://www.noaa.gov>
- 10 N.SH. Alimgazinova, A.ZH. Naurzbayeva, A.B. Manapbayeva, S.B. Ikramova, M.B. Kumargazina, A.D. Kenzhegarayeva, K. Adilzhan, Rec.Contr.Phys., 4(63), 30-36 (2017) (in Russ).
- 11 N.SH. Alimgazinova, A.ZH. Naurzbayeva, A.B. Manapbayeva, I.S. Tleubayeva, Rec.Contr.Phys., 3 (48), 112-119 (2016) (in Russ).
- 12 <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/>
- 13 <https://www.spaceweatherlive.com/ru/arhiv/2017/09/06/dayobs.html>
- 14 <https://www.spaceweatherlive.com/ru/arhiv/2017/09/06/xray.html>
- 15 <https://www.spaceweatherlive.com/en/news/view/301/20170906-major-x933-solar-flare.html>