

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

<https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.98>

Volume 6, Number 334 (2020), 61 – 67

UDC 523.985

MRNTI 41.21.05; 41.21.19

**A. Sarsembayeva^{1,*}, F. Belisarova¹, M. Odsuren^{2,†}, A. Sarsembay³,
A. Tutebayeva¹, A. Orazymbet¹, M. Abyshev¹**

¹Department of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

²School of Engineering and Applied Sciences, National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia;

³School-Lyceum №250 named after T. Komekbayev, Karmakchi area, Kyzylorda region, Kazakhstan.

E-mail: *sarsembaeva.a@kaznu.kz; †odsuren@seas.num.edu.mn; farida.belisarova@kaznu.kz;
cronus87_87@mail.ru; tutebayeva.aisulu@kaznu.kz; ayazhan.oralymbet@kaznu.kz; medeu.abishev@kaznu.kz

DEFINITION OF THE RECONNECTION RATE OF MOST POWERFUL SOLAR FLARES

Abstract. We observed top 10 X-class solar flares registered in the period November 1997 - September 2017. We measure physical parameters of 10 solar flares, such as the temporal scale, size, and magnetic flux density, and find that the sizes of flares tend to be distributed more broadly as the GOES class becomes weaker and that there is a lower limit of magnetic flux density that depends on the GOES class. We also made a brief analysis of solar flares registered in these days, also has shown the duration of time and peak of solar flares in Universal time.

We have identified several physical quantities of solar flares and estimated reconnection rate of solar flares. To determine the physical parameters we used images taken with the AIA instrument on board SDO satellite at wavelengths 131 Å, 174 Å, 193 Å, 211 Å, 335 Å, 1600 Å, 1700 Å, 4500 Å, SXT - pictures, HMI Magnetogram, SOLIS Chromospheric Magnetogram, GOES XRT-data. We estimate reconnection inflow velocity, coronal Alfvén velocity, and reconnection rate using the observed values. The inflow velocities are distributed from a few km s⁻¹ to several tens of km s⁻¹, and the Alfvén velocities in the corona are in the range from 10³ to 10⁴ km s⁻¹. Hence, the reconnection rate is 10⁻³. We find that the reconnection rate in a flare tends to decrease as the GOES class of the flare increases.

Keywords: solar flares, X-rays, reconnection rate.

Introduction. Solar flares are strong “explosions”, seen as sudden brightening atmosphere of the Sun over active regions (sunspot groups). They take position in the chromosphere and the corona, but the powerful ones can increase temperature even the photosphere (producing a flare visible even in white light).

Richard Carrington, who was drawing sunspots, when he suddenly noticed two bright spots in one of the sunspot groups, observed the first Solar flare in 1859. They brightened and faded in just ten minutes. Carrington already noticed that this phenomenon was followed by the appearance of northern lights on the following night. These white-flares are very rare, less than a hundred of them were observed in the last century. In the short wavelength range (UV and X-ray) the brightening is even more bigger. During a flare, the total ultraviolet radiation of the Sun rises with a significant factor, while the level of sum X-ray radiation from the Sun can grow with orders of magnitudes [1].

Flares produce effects across the entire electromagnetic spectrum. They produce x-rays and ultraviolet radiation, which indicates very high temperatures during a flash. Radio waves show that a small fraction of particles is accelerated to high energies. Most of the radiation is synchrotron radiation generated by electrons moving along spiral paths around magnetic field lines. The flux of high-energy particles and

cosmic rays also increases on Earth as a result of intense flash. Magnetic storms on Earth often occur with a delay of about 36 hours after a flare event was observed on the Sun. This is mainly interpreted as the amplification of the solar wind, which compresses the magnetosphere and increases the magnetic field at the surface of the Earth. Flashes appear in areas where a sharp change in the direction of the local magnetic field occurs. The preferred mechanism for explaining the sudden release of energy in flashes is magnetic reconnection.

Solar flares are giant explosions on the sun that send energy, light and high speed particles into space. These flares are often associated with solar magnetic storms known as coronal mass ejections (CMEs). The number of solar flares increases approximately every 11 years, and the sun is currently moving towards another solar maximum, likely in 2013. That means more flares will be coming, some small and some big enough to send their radiation all the way to Earth.

The biggest flares are known as "X-class flares" based on a classification system that divides solar flares according to their strength. The smallest ones are A-class (near background levels), followed by B, C, M and X. Similar to the Richter scale for earthquakes, each letter represents a 10-fold increase in energy output. So an X is ten times an M and 100 times a C. Within each letter, class there is a finer scale from 1 to 9 [2-3].

C-class and smaller flares are too weak to noticeably affect Earth. M-class flares can cause brief radio blackouts at the poles and minor radiation storms that might endanger astronauts [4].

The most powerful flare measured with modern methods was in 2003, during the last solar maximum, and it was so powerful that it overloaded the sensors measuring it. Massive solar X-ray flare, which occurred on 4 November, was, at best estimate, an X28. This is a new number 1 X-ray flare for the record books, the most powerful in recorded observational history.

In this work, we have identified several physical quantities of X-class solar flares and estimated reconnection rate of X-class solar flares. We have analyzed top 10 strongest solar flares registered from the period November 1997 - September 2017.

Table 1 - Strongest solar flares since November 1997 [6].

№	GOES class	Date	Region	Start	Maximum	End
1	X28+	2003/11/04	10486	19:29	19:50	20:06
2	X20+	2001/04/02	9393	21:32	21:51	22:03
3	X17.2+	2003/10/28	10486	09:51	11:10	11:24
4	X17+	2005/09/07	10808	17:17	17:40	18:03
5	X14.4	2001/04/15	9415	13:19	13:50	13:55
6	X10	2003/10/29	10486	20:37	20:49	21:01
7	X9.4	1997/11/06	8100	11:49	11:55	12:01
8	X9.3	2017/09/06	2673	11:53	12:02	12:10
9	X9	2006/12/05	10930	10:18	10:35	10:45
10	X8.3	2003/11/02	10486	17:03	17:25	17:39

Data analysis. The amount of energy released during a flare [7-9], E_{flare} , can be explained by the magnetic energy stored in the solar atmosphere,

$$E_{flare} \sim E_{mag} = \frac{B_{cor}^2}{8\pi} L^3 \quad (1)$$

where L is the characteristic size of the flare and B_{cor} is the characteristic magnetic flux density in the corona. Since the released magnetic energy balances the energy flowing into the reconnection region, we can describe the energy release rate as

$$\left| \frac{dE_{mag}}{dt} \right| \sim 2 \frac{B_{cor}^2}{4\pi} V_{in} L^2 \tag{2}$$

where V_{in} is the inflow velocity of the plasma. Therefore, the time required for the energy inflow to supply the flare energy is estimated as

$$\tau_{flare} \sim E_{flare} \left(\left| \frac{dE_{mag}}{dt} \right| \right)^{-1} \sim \frac{L}{4V_{in}} \tag{3}$$

and this should be the timescale of the flare. Using this timescale, we can estimate the inflow velocity V_{in} as

$$V_{in} \sim \frac{L}{4\tau_{flare}} \tag{4}$$

To evaluate the reconnection rate in nondimensional form, $M_A \equiv \frac{V_{in}}{V_A}$, we must estimate the Alfvén

velocity in the inflow region: $V_A = \frac{B_{cor}}{(4\pi\rho)^{1/2}}$. Hence, if we measure the coronal density ρ , the spatial scale of the flare L , the magnetic flux density in the corona B_{cor} , and the timescale of flares τ_{flare} , we can calculate inflow velocity V_{in} , Alfvén velocity V_A , and reconnection rate M_A [10-11].

The Geostationary Operational Environmental Satellite or GOES [5] carry out monitoring of solar flares in a real time. Data on the electrons, protons, and X-rays were taken from satellites GOES 13, GOES 14 and GOES 15 [5-6].

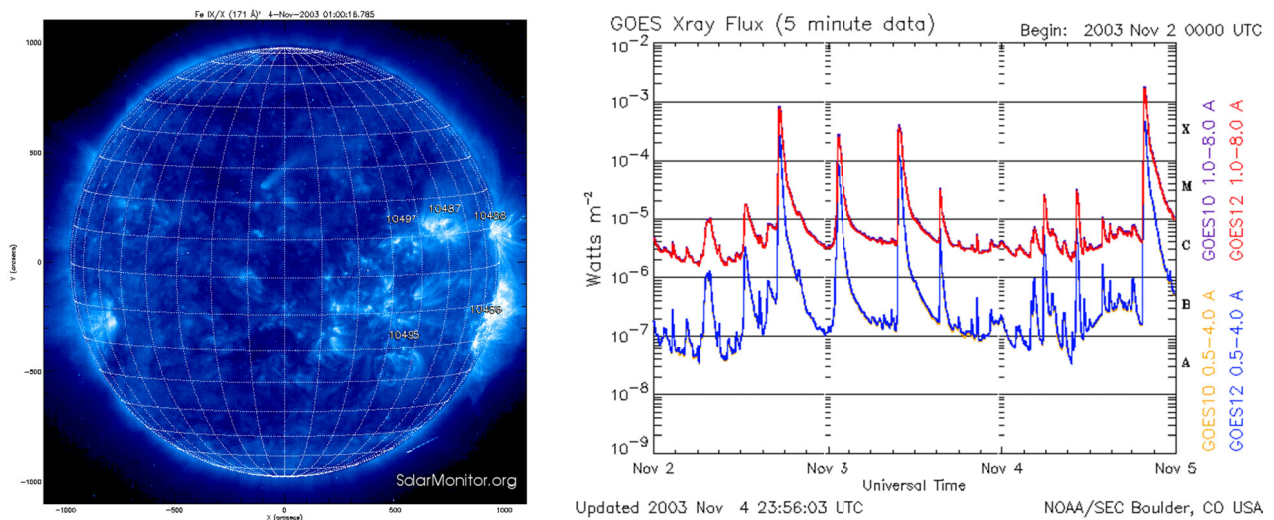


Figure 1 - Active area 10486 (XRT Hinode) and the total X-ray flux obtained in GOES 13 and GOES 15 [5]

In figure 1 shown the images obtained on the board of Hinode satellite in XRT (November 4, 2003, X28). To determine the length of the loops, we used SXT images. From the SXT data, we get values for the length of the loops.

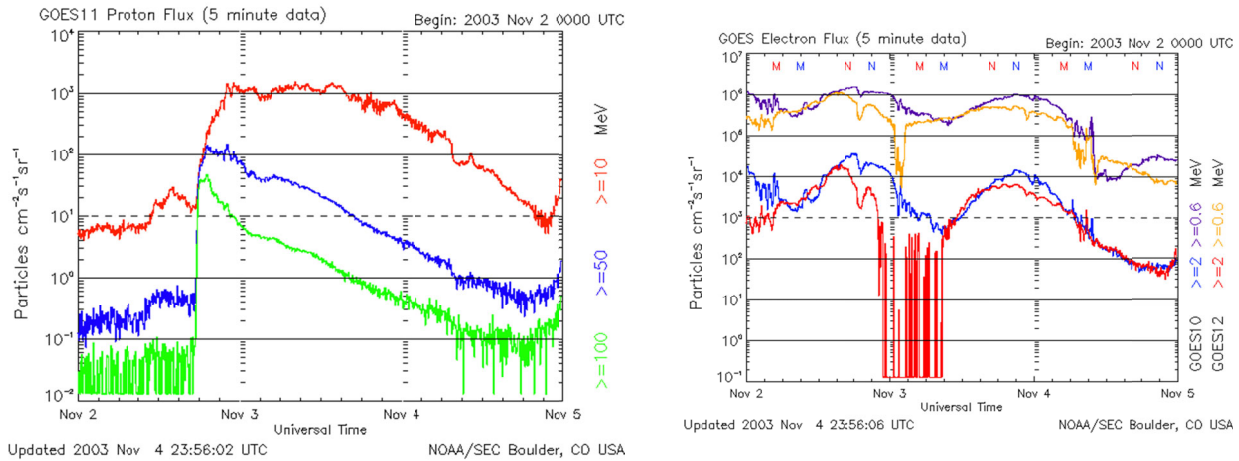


Figure 2 - Total proton and electron flux obtained in GOES 13 and GOES 15 [5]

In figure 2 shows the total flux of X-rays and an electron, which was registered on November 4, 2003.

Results. Using the above described method, we analyzed 10 X-class solar flares that have been registered 1997-2017 years. Examined the dependence of the reconnection rate from GOES class of solar flares. Table 2 summarizes the parameters of the flares obtained in this work.

Table 2 - Parameters of the flares

Date	Active region	GOES class	$\tau(s)$	$L(cm)$	$T(10^6 K)$	$V_{in}(cm \cdot s^{-1})$	M_A	$E_{flare} / \tau(erg \cdot s^{-1})$
2003/11/04	10486	X28+	1260	$2,39 \cdot 10^9$	14	$4,75 \cdot 10^5$	$5,93 \cdot 10^{-4}$	$8,73 \cdot 10^{27}$
2001/04/02	9393	X20+	1140	$1,31 \cdot 10^9$	14	$2,86 \cdot 10^5$	$3,57 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{27}$
2003/10/28	10486	X17.2+	4740	$2,32 \cdot 10^9$	14	$1,22 \cdot 10^5$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	$2,12 \cdot 10^{27}$
2005/09/07	10808	X17+	1380	$1,96 \cdot 10^9$	14	$3,55 \cdot 10^5$	$4,43 \cdot 10^{-4}$	$4,37 \cdot 10^{27}$
2001/04/15	9415	X14.4	1860	$1,38 \cdot 10^9$	14	$1,85 \cdot 10^5$	$2,31 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{27}$
2003/10/29	10486	X10	720	$2,39 \cdot 10^9$	14	$8,31 \cdot 10^5$	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{28}$
1997/11/06	8100	X9.4	360	$1,74 \cdot 10^9$	14	$1,21 \cdot 10^5$	$1,51 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{28}$
2017/09/06	12673	X9.3	540	$7,98 \cdot 10^8$	14	$3,69 \cdot 10^5$	$4,61 \cdot 10^{-4}$	$7,55 \cdot 10^{26}$
2006/12/05	10930	X9	1020	$4,35 \cdot 10^8$	14	$1,07 \cdot 10^5$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$6,48 \cdot 10^{25}$
2003/11/02	10486	X8.3	1320	$2,32 \cdot 10^9$	14	$4,39 \cdot 10^5$	$5,49 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{27}$

There is a weak correlation between the timescale τ_{flare} and the GOES peak flux (figure 3a). The characteristic size of flares, L, shows a larger scatter when the GOES peak flux is smaller (figure 3b). Figure 4 shows the dependence of the reconnection rate M_A from GOES class.

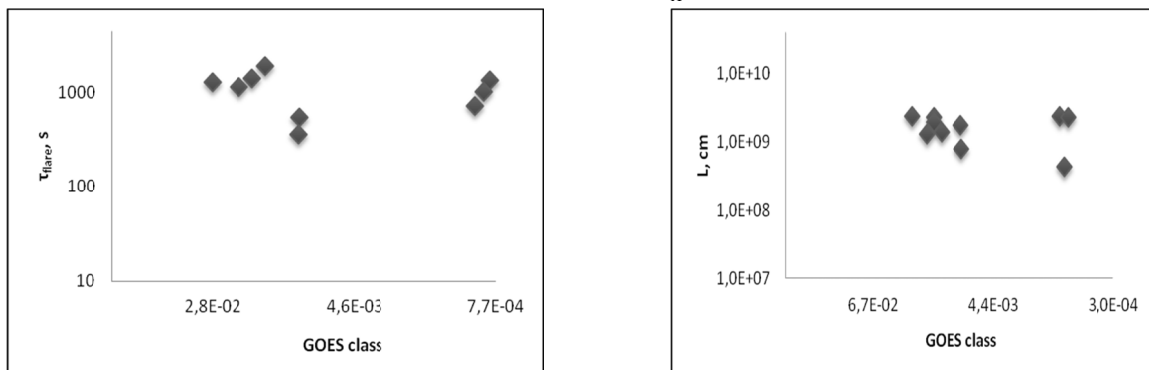


Figure 3 - Physical parameters of each flare plotted against the GOES class. (a) Timescale τ_{flare} . (b) Size L

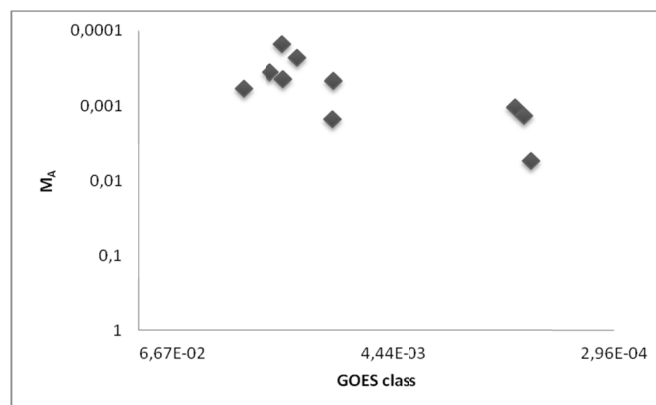


Figure 4 - Reconnection rate M_A plotted against GOES class

Conclusion. The values of reconnection rate are distributed in the range from 10^{-4} – 10^{-3} . Here, the value of the reconnection rate decreases as the GOES class increases. The value of the reconnection rate obtained in this study is within 1 order of magnitude from the predicted maximum value of the Petschek model [12].

**А.Т. Сарсембаева^{1,*}, Ф.Б. Белисарова¹, М. Одсурен^{2,†}, А.Т. Сарсембай³,
А.С. Түтебаева¹, А.Т. Оразымбет¹, М.Е. Абишев¹**

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Инженерлік және қолданбалы ғылымдар институты,

Моңғолия ұлттық университеті, Улан-Батор, Моңғолия;

³Т. Көмекбаев атындағы №250 мектеп-лицейі, Қызылорда, Қазақстан

ЕҢ ҚУАТТЫ КҮН ЖАРҚЫЛЫНЫҢ ҚАЙТА ҰШТАСУ ЖЫЛДАМДЫҒЫН АНЫҚТАУ

Аннотация. Күн жарқылы барлық электромагниттік спектрге әсер етеді. Күн жарқылы кезінде рентген және ультрaviolet сәулесі шығады әрі бұл күн жарқылында өте жоғары температураның бар екенін көрсетеді. Радиотолқын бөлшектердің кішкене бөлігінің жоғары энергияға дейін үдейтіндігін көрсетеді. Сәулеленудің көп бөлігі – спираль траекториясымен, магнит өрісі айналасындағы күш сызығы бойымен қозғалатын электрон тудыратын синхротронды сәулелену. Қарқынды жарқыл нәтижесінде жерде жоғары энергетикалық бөлшектер мен ғарыштық сәуле ағыны да артады. Жердегі магниттік дауыл көбінесе күнде қарқынды жарқыл оқиғасы байқалғаннан кейін шамамен 36 сағатқа кешігеді. Бұл негізінен магнитосфераны қысып, Жер бетіндегі магнит өрісін арттыратын күн желінің күшеюі деп түсіндіріледі. Күн жарқылы жергілікті магнит өрісінің бағыты күрт өзгертін жерде пайда болады. Күн жарқылы кезінде энергияның кенеттен босатылуын түсіндіретін қолайлы механизм – магнитті қайта ұштасу.

Күндегі қарқынды жарқыл – күн атмосферасындағы ең әсерлі энергетикалық оқиғалардың бірі. Күн жарқылының күн тәжінің энергетикалық тепе-теңдіктегі орнын және ғарыштық ауа-райындағы маңызды рөлін ескере отырып, күн белсенділігіне бақылау жұмыстары жүргізілді, энергия шығымы мен күн жарқылы индукциясының пайда болу жағдайы зерттелді. Ұлттық күн обсерваториялары көп уақытты қамтитын түрлі мәлімет (мысалы, Solar and Heliospheric Observatory, SOHO), көрініс (Solar Terrestrial Relations Observatory, STEREO) және көптеген ақпараттармен қамтамасыз етеді (Solar Dynamics Observatory, SDO). Нақтырақ айтсақ, SDO деректеріне тек бірнеше деректер қоймасы арқылы қол жеткізуге болады, мысалы, ғылыми құндылығы бар толық қаденттік мәлімет немесе толық дискідегі ірі өлшемді мәліметтерді жүктеу қиынырақ.

1997 жылғы қараша мен 2017 жылғы қыркүйек аралығында тіркелген X-классына жататын 10 ең мықты күн жарқылының зерттедік. Мақалада 10 күн жарқылының физикалық параметрлерін өлшедік, ол негізінен уақыт шкаласы, күн жарқылының өзіндік өлшемін және магнит ағынының тығыздығын, GOES классы әлсірей бастаған сайын күн жарқылының өзіндік өлшемдері кеңірек таралуға бейім болатындығын анықтадық. GOES классына тәуелді магнит ағыны тығыздығының төменгі шегі анықталды. Сондай-ақ, 20-25 наурыз аралығында тіркелген күн жарқылына қысқаша талдау жүргіздік, күн жарқылы уақыт шкаласының ұзақтығы және бүкіл әлемдік уақытта көрсетілген максимумы анықталды.

Күн жарқылының бірнеше физикалық мәні мен қайта ұштасу жылдамдығын есептеп талқыладық. Физикалық параметрлерді анықтау үшін SDO спутнигі бортында AIA инструментінің 131 Å, 174 Å, 193 Å, 211 Å, 335 Å, 1600 Å, 1700 Å, 4500 Å толқын ұзындығында алынған және SXT суреті, HMI Magnetogram, SOLIS Chromospheric Magnetogram, GOES XRT деректері пайдаланылды. Байқау нәтижесінде алынған мәнді қолдана отырып, магниттік қайта ұштасудың түсу жылдамдығын, короналық Альфвен жылдамдығын және магниттік қайта ұштасуды есептедік. Ағынның түсу жылдамдығы бірнеше км с⁻¹-ден бірнеше ондаған км-ге с⁻¹-ге дейін таралған, ал коронадағы Альфвен жылдамдығы 10³-тен 10⁴ км с⁻¹ диапазон аралығын құрайды. Сонымен, магниттік қайта ұштасу жылдамдығы 10³ мәнін құрайды. Күн жарқылындағы магниттік қайта ұштасу жылдамдығы төмендеген сайын GOES класының жоғарылайтыны анықталды.

Түйін сөздер: күн жарқылы, рентген сәулесі, қайта ұштасу жылдамдығы.

**А.Т. Сарсембаева^{1,*}, Ф.Б. Белисарова¹, М. Одсурен^{2,†}, А.Т. Сарсембай³,
А.С. Түтебаева¹, А.Т. Оразымбет¹, М.Е. Абишев¹**

¹Физико-технический факультет, КазНУ им.аль-Фараби, Казакстан;

²Школа инженерных и прикладных наук,

Национальный университет Монголии, Улан-Батор, Монголия;

³Школа-лицей №250 им. Т. Комекбаева, Кармакчинский район, Кызылординская область, Казакстан

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ НАИБОЛЕЕ МОЩНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Аннотация. Солнечные вспышки производят эффекты во всем электромагнитном спектре. Они производят рентгеновское и ультрафиолетовое излучение, что указывает на очень высокие температуры во время вспышки. Радиоволны показывают, что небольшая часть частиц ускоряется до высоких энергий. Большая часть излучения – это синхротронное излучение, генерируемое электронами, движущимися по спиральным траекториям вокруг силовых линий магнитного поля. Поток частиц высоких энергий и космических лучей также увеличивается на Земле в результате интенсивной вспышки. Магнитные бури на Земле часто возникают с задержкой примерно на 36 часов после того, как на Солнце наблюдалась вспышка. Это в основном интерпретируется как усиление солнечного ветра, который сжимает магнитосферу и увеличивает магнитное поле у поверхности Земли. Вспышки появляются в местах, где происходит резкое изменение направления местного магнитного поля. Предпочтительный механизм для объяснения внезапного высвобождения энергии при вспышках – это магнитное пересоединение.

Вспышки на Солнце – одно из самых впечатляющих энергетических событий в солнечной атмосфере. Учитывая их роль в энергетическом балансе солнечной короны и их функцию, играющую важную роль в космической погоде, многочисленные наблюдения исследовали выделение энергии и индукцию солнечных вспышек, уделяя особое внимание солнечной активности. Национальные солнечные обсерватории предоставляют всей сети множество данных, охватывающих обширные временные диапазоны (например, Солнечная и гелиосферная обсерватория, SOHO), многочисленные перспективы (обсерватория солнечно-земных отношений, STEREO) и возвращают много информации (обсерватория солнечной динамики, SDO). В частности, огромный объем SDO-данных доступен только из нескольких хранилищ, такой тип данных, как данные полной каденции или полный диск, представляющий научную ценность, трудно загрузить из-за их размера.

Мы наблюдали 10 мощных солнечных вспышек класса X, зарегистрированных в период с ноября 1997 г. по сентябрь 2017 г. Мы измерили физические параметры 10 солнечных вспышек, в основном шкалу времени, характерный размер вспышек и плотность магнитного потока, и обнаружили, что характерные размеры вспышек имеют тенденцию распределяться более широко, поскольку класс GOES становится слабее и здесь существует нижний предел плотности магнитного потока, которая зависит от класса GOES. Мы также сделали краткий анализ солнечных вспышек, зарегистрированных в эти дни, а также показана продолжительность времени вспышки и ее максимум по Всемирному времени.

Мы определили несколько физических величин вспышек и оценили скорость пересоединения солнечных вспышек. Для определения физических параметров мы использовали снимки, полученные с инструмента AIA на борту спутника SDO на длинах волн 131 Å, 174 Å, 193 Å, 211 Å, 335 Å, 1600 Å, 1700 Å, 4500 Å, SXT - снимки, HMI Magnetogram, SOLIS Chromospheric Magnetogram, GOES XRT-данные. Используя наблюдаемые значения, мы оценили скорость притока магнитного пересоединения, корональную альфвеновскую скорость и магнитное пересоединение. Скорости притока распределяются от нескольких км с⁻¹ до нескольких десятков км с⁻¹, а альфвеновские скорости в короне находятся в диапазоне от 10³ до 10⁴ км с⁻¹. Следовательно, магнитное пересоединение составляет 10⁻³. Мы находим, что скорость магнитного пересоединения в вспышке имеет тенденцию уменьшаться с увеличением класса GOES.

Ключевые слова: солнечная вспышка, рентгеновское излучение, скорость пересоединения.

Information about authors:

Sarsembayeva Aiganym, PhD, Senior lecturer, Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University, sarsembaeva.a@kaznu.kz; <https://orcid.org/0000-0002-3003-0038>;

Odsuren Myagmarjav, Associate professor, School of Engineering and Applied Sciences and Nuclear Research Center, National University of Mongolia, odsuren@seas.num.edu.mn; <https://orcid.org/0000-0003-2756-4909>;

Belisarova Farida, Associate professor, Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Email: farida.belisarova@kaznu.kz; <https://orcid.org/0000-0003-0531-3818>;

Sarsembay Akmaral, B.Sc., High school teacher, School-Lyceum No250 named after T.Komekbayev, cronus87_87@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1066-8755>;

Tutebayeva Aisulu, B. Sc., Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University, tutebayeva.aisulu@kaznu.kz; <https://orcid.org/0000-0002-0345-0395>;

Orazymbet Ayazhan, B. Sc., Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University, ayazhan.orazymbet@kaznu.kz; <https://orcid.org/0000-0002-7833-4858>;

Abyshv Medeu, Associate professor, Head of the Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University, medeu.abishev@kaznu.kz; <http://orcid.org/0000-0003-3602-6934>

REFERENCES

- [1] Sweet P.A. Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1958. P.123.
- [2] Parker E.N. Sweet's mechanism for merging magnetic fields in conducting fluids // J. Geophys. Res. 1957. V. 62. P.509-520.
- [3] Parker E.N. The solar flare phenomenon and theory of reconnection and annihilation of magnetic fields // Astrophys. J. Supp. 1963. V. 8. P.177-211.
- [4] Garcia, H. A.: 2004, Space Weather 2, S06003.
- [5] <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/>
- [6] <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/>
- [7] Isobe H., Takasaki H., Shibata K. Measurement of the Energy Release Rate and the Reconnection Rate in Solar Flares // ApJ. 2005. Vol.632. P.1184.
- [8] A.T. Sarsembayeva. Definition of reconnection rate of solar flares registered in 2011-2012 years. Adv. Studies Theor. Phys., Vol.6, 2012, no.28, 1405-1408.
- [9] Sarsembayeva A.T., et al. 26 January, 2019 solar flares diagnostics based on the soft x-ray emission measures. NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Physical and Mathematical. №2, 2019. P.41-46. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-1726.10>
- [10] K. Nagashima, Statistical study of the reconnection rate in solar flares observed with Yohkoh SXT, ApJ, 647, 654, 2006.
- [11] Sarsembayeva A.T., et al. Solar activity monitoring for the PERIOD March 20-25, 2019. NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Physical and Mathematical. №4, 2020. P.35-41. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.63>
- [12] Petschek H.E. Magnetic field annihilation // Physics of Solar Flares / ed. by W.N. Hess. NASA SP-50. Washington: DC, 1964. P. 425-439.