

АКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА

Аннотация. Интерес к исследованию Солнца непрерывно растет, и это особенно примечательно на фоне важнейших достижений в астрофизике в целом. Солнце является ближайшей звездой. Всего около восьми минут требуется, чтобы солнечные лучи достигли Земли, тогда как от самой близкой к нам звезды Проксима Центавра свет идет 4,3 года. Такая близость Солнца к Земле приводит к тому, что она является единственной звездой, которую мы видим не как точку, а как диск. Поэтому именно эту звезду можно изучить наиболее детально. В этой статье рассмотрены процессы, протекающие в атмосфере Солнца, такие как солнечная вспышка, пятна, факелы и корональные транзиенты. Также была проанализирована вспышка класса X, зарегистрированная 12 июля 2012 г.

Ключевые слова: солнечная вспышка, солнечные пятна, солнечный факел, корональные транзиенты.

Тірек сөздер: күн жарқылы, күн дақтары, күн алауы, тәждік транзиенттер.

Keywords: solar flare, solar spots, solar facula, coronal transient.

Солнечные вспышки впервые было зарегистрировано 1 сентября 1859 г. Р. Кэррингтоном и Ходжсоном (рисунок 1). Чаще всего вспышки наблюдаются в красной водородной линии $H\alpha$, а также в рентгеновском диапазоне и в виде всплесков радиоизлучения [1].

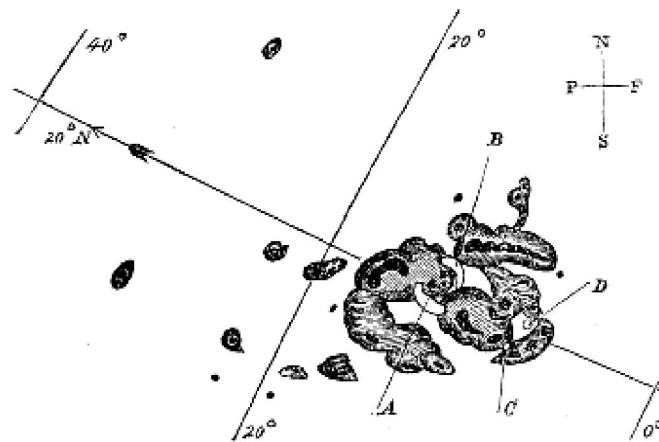


Рисунок 1 – Вспышка нарисованная Р. Кэррингтоном в 1859 г.

Наблюдения в красной водородной линии $H\alpha$ показывают, что в начале вспышки один из ярких узелков структуры хромосферы, внезапно разгорается. Часто менее чем за минуту сильное излучение распространяется вдоль длинного жгута или заливаает целую область протяженностью в десятки тысяч километров.

В видимой области спектра усиление свечения происходит главным образом в спектральных линиях водорода, ионизованного кальция и других металлов. Уровень непрерывного спектра также возрастает, иногда настолько сильно, что вспышка становится заметной на фоне фотосферы в белом свете. После достижения максимума излучение постепенно ослабевает за несколько десятков минут. Помимо увеличения яркости, во время вспышек наблюдаются мощные движения газов, а также выбросы облаков плазмы в виде отдельных конденсаций и «брызг» [1].

Вспышки на Солнце известны уже более 100 лет. Около 60 лет природу солнечных вспышек изучали путем анализа их спектров только в видимой области спектра. С середины прошлого

столетия стали возможными внеатмосферные наблюдения вспышек в широком диапазоне длин волн, начиная от ультрафиолетового и вплоть до жесткого гамма-излучения с энергией фотонов несколько ГэВ ($1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$). В наиболее крупных вспышках при их длительности $\sim 10^3 \text{ с}$ выделяется энергия $\varepsilon = 10^{32}\text{--}10^{33} \text{ эрг}$ ($10^{25}\text{--}10^{26} \text{ Дж}$). Это соответствует средней мощности энерговыделения $\langle \varepsilon \rangle \sim 10^{29} \text{ эрг/с}$ (10^{22} Дж/с). Однако эта мощность в $10^4\text{--}10^5$ раз меньше мощности полного излучения Солнца (полной светимости $L_C = 3,9 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$).

Модели возникновения и развития солнечной вспышки, которая адекватно описывает причины ее возникновения и происходящие в ней процессы, до сих пор не существует. Общие соображения сводятся к следующему.

Солнечная вспышка возникает как следствие быстрого выделения энергии в некоторой области солнечной атмосферы. В настоящее время считается, что эта энергия накапливается и хранится в форме магнитной энергии токовых систем, образующихся в солнечной атмосфере в результате конвективного переноса плазмы. Первичное энерговыделение, являющееся началом вспышки, связано с разрывом токовых систем в результате токовых неустойчивостей или воздействия соседних систем, например, при вторжении нового потока вещества, несущего магнитное поле в уже развитую плазменно-магнитную конфигурацию. Разрыв/взаимодействие токовых систем приводит к нагреву, движениям плазмы в магнитных структурах и возникновению сильных электрических полей. Часть магнитной энергии конвертируется в энергию ускоренных этими полями частиц – электронов, протонов и более тяжелых ядер (рисунок 2) [1].

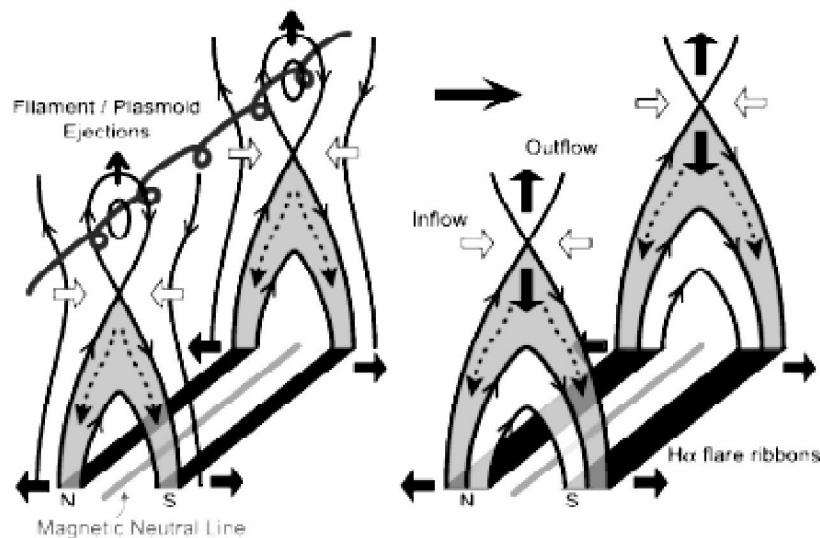


Рисунок 2 – Модель магнитного пересоединения [1]

Солнечные пятна являются наиболее известным и легче всего наблюдаемым проявлением солнечной активности. Пятна редко бывают одиночными и обычно располагаются группами, занимая протяженные активные области, простирающиеся на сотни тысяч километров. Напряженность магнитного поля в группах пятен может достигать значительных величин вплоть до нескольких тысяч эрстед [1].

Группа пятен может существовать от нескольких часов до нескольких месяцев. Ее развитие начинается с появления пор, из которых в дальнейшем возникают пятна. В течение нескольких дней заметно возрастают их площади и магнитные поля. Обычно группа вытянута параллельно экватору или под небольшим углом к нему. Ведущее пятно обычно располагается ближе к экватору. Спустя 2-3 недели группа достигает максимального развития и затем начинает разрушаться: сначала исчезает хвостовое пятно, затем и другие, более мелкие пятна. В конце развития группа становится униполярной. Само ведущее пятно сохраняется до тех пор, пока его диаметр не уменьшается до $30 \cdot 10^3 \text{ км}$, после этого оно быстро диссипирует. Классификация групп пятен, основанная на определении характерных стадий их эволюции, была разработана в Цюрихе. В ее основу был

положен тот факт, что вспышечная активность значительно выше в первые дни жизни группы, когда наблюдается появление нового магнитного потока и площадь группы быстро растет [1, 2].

Появление факелов, а затем группы солнечных пятен у важнейший признак начала развития активной области. Центральная часть пятен (тень) кажется очень темной (почти черной) на ярком фоне солнечной фотосферы. На самом деле в центре пятна яркость уменьшена только раз в десять, а яркость полутени составляет примерно $3/4$ яркости фотосферы. На основании закона Стефана-Больцмана это означает, что температура в пятне на $(2-2,5) \cdot 10^3$ K меньше, чем в фотосфере. Тень больших пятен окружена полутенью, образованной фотосферными гранулами, радиально вытянутыми вдоль силовых линий магнитного поля пятна. Солнечное пятно возникает при выходе из фотосферы «магнитной трубки» из конвективной зоны. Магнитное поле в центре пятна почти вертикально и не бывает слабее нескольких сотен эрстед. Отдельное солнечное пятно появляется в виде крошечной поры, едва отличающейся от темных промежутков между гранулами. Через день пора развивается в округлое темное пятно с резкой границей, диаметр которого постепенно увеличивается вплоть до размеров в несколько десятков тысяч километров (рисунок 3). Через три-четыре дня после появления большого пятна вокруг него возникает менее темная полутень, имеющая характерную радиальную структуру. Она окружает центральную часть пятна, называемую тенью. С течением времени площадь, занимаемая группой пятен, постепенно возрастает, достигая наибольшего значения примерно на десятый день. После этого пятна начинают постепенно уменьшаться и исчезать, сначала наиболее мелкие из них, затем хвостовое (предварительно распавшись на несколько пятен) и, наконец, ведущее. В целом весь этот процесс длится около двух месяцев, однако многие группы солнечных пятен не успевают пройти всех описанных стадий и исчезают раньше.

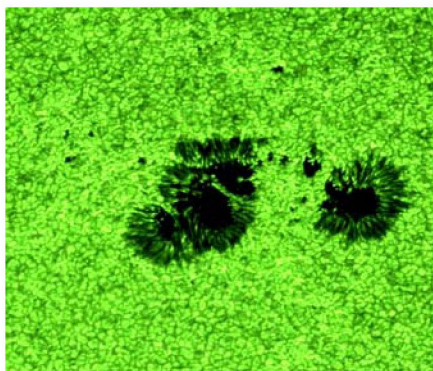


Рисунок 3 – Солнечное пятно

Факелы могут существовать и без пятен, обычно они появляются раньше пятен и пропадают после исчезновения пятен, иногда «задерживаясь» на фотосфере в течение нескольких солнечных оборотов. Верхние части факелов в хромосфере образуют флоккулы. Эти образования весьма неоднородны по своей яркости, температуре и напряженности магнитного поля. Структура флоккулов отражает структуру локального магнитного поля, большая часть их волокон ориентирована вдоль магнитных силовых линий [1].

Активными образованиями, наблюдаемыми в хромосфере и короне, являются протуберанцы, которые представляют собой как бы облака сравнительно холодного ($T = 10^4$ K) и плотного ($n = 10^{10}-10^{11}$ см⁻³) хромосферного вещества, вынесенного или выброшенного в результате взрыва в корону до высот нескольких сотен тысяч километров. На краю диска они видны в сильных спектральных линиях (H, He, Ca⁺ и др.) в виде светлых облаков или дуг причудливых форм. На диске они выглядят как темные волокна, располагающиеся в зонах пятнообразования и даже на высоких широтах. Динамические процессы в протуберанцах связаны как с локальными, так и фоновыми магнитными полями. Протуберанцы часто располагаются вдоль арок силовых линий магнитных полей. Они бывают различных форм и размеров. Чаще всего они имеют вид длинной плоской плиты, расположенной почти вдоль радиуса Солнца. Поэтому на фильтограммах, в проекции на солнечный диск, протуберанцы выглядят в виде длинных изогнутых волокон. Протуберанцы – очень крупные образования в солнечной атмосфере, их длина достигает сотен тысяч

километров, хотя ширина не превышает 6000 – 10 000 км. Нижние их части сливаются с хромосферой, а верхние простираются на десятки тысяч километров в корону. Однако встречаются протуберанцы и значительно больших размеров. Через протуберанцы постоянно происходит обмен веществом между хромосферой и короной. Об этом свидетельствуют часто наблюдаемые движения как самих протуберанцев, так и связанных с ними потоков и струй, происходящие со скоростями в десятки и сотни километров в секунду. Возникновение, развитие и движение протуберанцев тесно связаны с эволюцией групп солнечных пятен [1].

Корональные транзиенты – недавно возникший термин. Он характеризует быстропротекающие изменения корональных структур (арок, корональных лучей и др.), а также возникновение новых динамических структур в виде быстро движущихся от Солнца корональных облаков и уплотнений. Все эти явления, как правило, связаны со взрывами эруптивных протуберанцев или со вспышками, но имеющими другую «историю». Одно из самых заметных таких явлений представляет собой выброс огромных масс вещества (10^{15} – 10^{16} г) на высоты, превышающие $(1-5)R_C$, со скоростями от нескольких сотен до нескольких тысяч километров в секунду. Эти спорадические выбросы получили название корональных выбросов массы.

Они представляют собой некоторые объемы замагниченной плазмы, иногда это магнитные облака, распространяющиеся затем в межпланетное пространство. Кинетическая энергия транзиентов достигает 10^{31} – 10^{33} эрг, что сравнимо с полной энергией самых больших вспышек. Эти быстрые транзиенты при своем движении в солнечном ветре генерируют ударную волну, которая, в свою очередь, взаимодействует с магнитным полем Земли, вызывая геомагнитные бури и значительные ионосферные возмущения, приводящие к нарушениям радиосвязи.

Феномен солнечной вспышки далек от полного объяснения. Началом развития теории вспышек можно считать работу «Теория хромосферных вспышек» [3].

Рассмотрим вспышку класса X зарегистрированную в июле 2012 г.

Вспышка класса X1.4 12 июля 2012 г.

12 июля на Солнце была зарегистрирована крупная вспышка класса X. Вспышка произошла в 15:37 UT, продолжалась 72 минуты и была зафиксирована в активной области 11520.

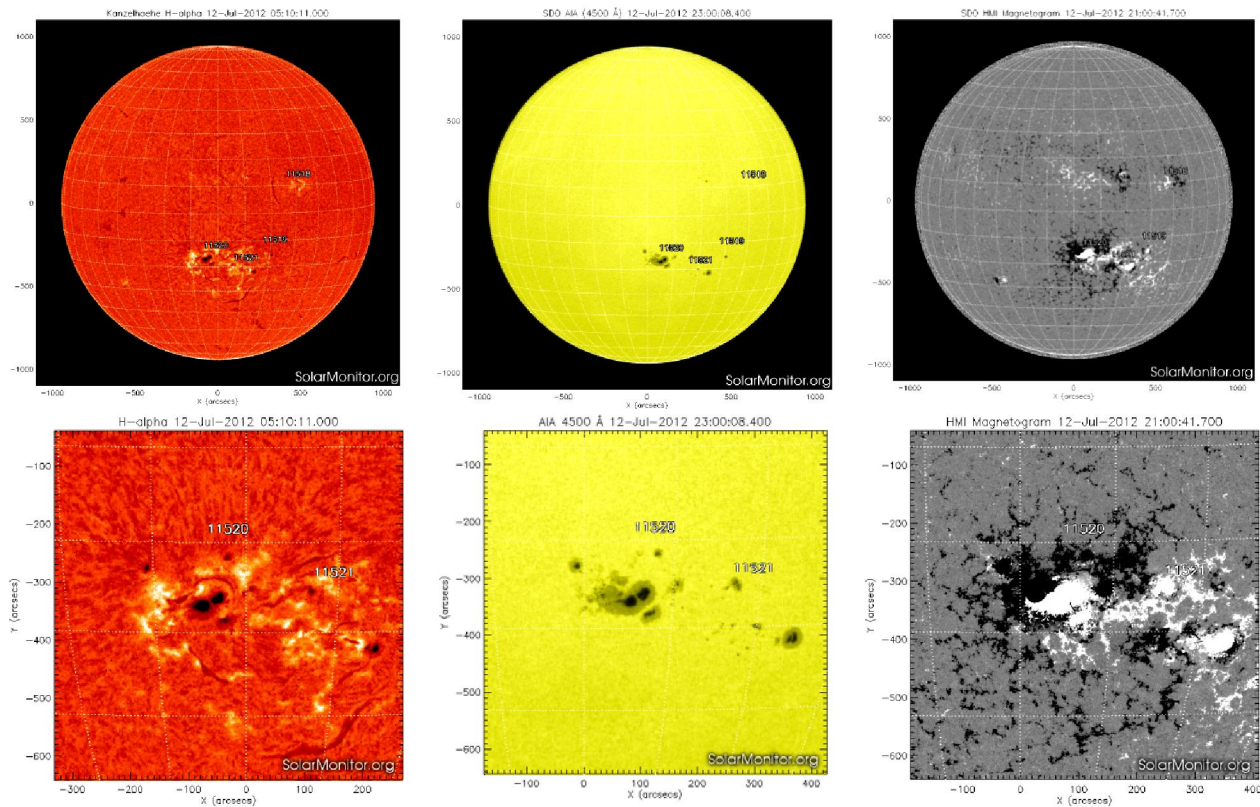


Рисунок 4 – Наблюдения в диапазонах H_α , AIA 4500 Å и HMI Magnetogram [4, 5]

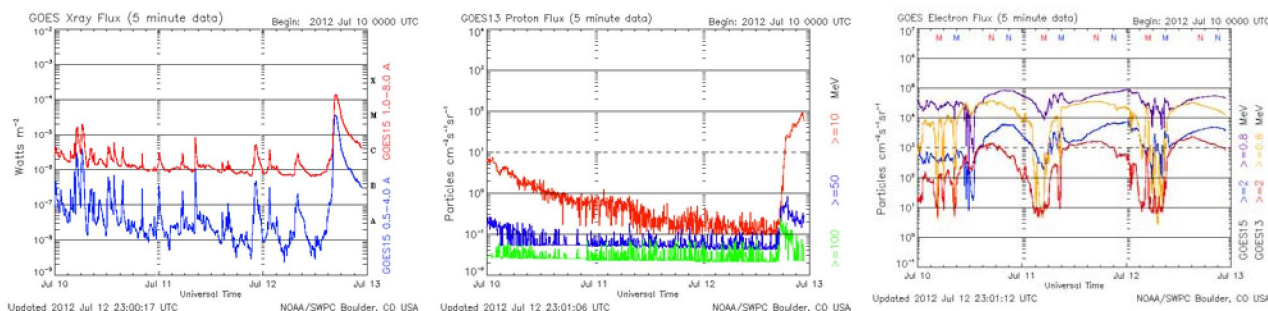


Рисунок 5 – Общий поток протона, электрона и рентгеновского излучения Солнца, полученный в GOES 13 и GOES 15 [6]

Всего в этот день было зарегистрировано 5 вспышек класса С и одна вспышка класса Х.

На рисунке 4 приведены снимки полученные на борту спутника SDO HMI Magnetogram и GHN в диапазонах H_{α} , AIA 4500 Å.

Пространственный масштаб вспышки составил $7,9 \cdot 10^9$ см. В области 11520 величина измерения EM составила 10^{53} см⁻³. Общий коэффициент освободившейся энергии составил $2,8 \cdot 10^{29}$ эрг·с⁻¹, скорость притока – $4,57 \cdot 10^5$ см·с⁻¹.

Во время этой вспышки спутник GOES 15 зафиксировал рентгеновскую вспышку класса X1.4. Мощность солнечной вспышки в диапазоне мягкого рентгеновского излучения от 0,5–4,0 Å составила $5,8 \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻², в диапазоне 1,0–8,0 Å мощность потока рентгеновского излучения составила $1,4 \cdot 10^{-4}$ Вт·м⁻², т. е. данная вспышка относится к классу Х.

На рисунке 5 представлен общий поток протона, электрона и рентгеновского излучения, зарегистрированный 12 июля 2012 г.

Вспышка максимальной интенсивности достигла в 16:49 UT. Регистрация потоков солнечных протонов проводилась спутником GOES 13. В момент вспышки поток солнечных протонов с энергиями 10 МэВ достигает интенсивности $9 \cdot 10^1$ протон/см²·с·ср, потоки протонов с энергиями 50 МэВ достигли интенсивности $9,5 \cdot 10^{-1}$ протон/см²·с·ср, потоки с энергиями 100 МэВ достигли интенсивности $4,5 \cdot 10^{-1}$ протон/см²·с·ср.

Если рассматривать потоки зарегистрированных электронов, то в момент вспышки поток электронов с энергиями 0,8 МэВ, зарегистрированный спутником GOES 15, достигает интенсивности $7,5 \cdot 10^4$ электрон/см²·с·ср, потоки электронов с энергиями 2 МэВ, зарегистрированные спутником GOES 15, достигли интенсивности $6,5 \cdot 10^3$ электрон/см²·с·ср.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Мурзин В.С. и др. Модель космоса: Физические условия в космическом пространстве / Под. ред. Панасюк М.И., Новиков Л.С. – М.: Книжный дом Университет, 2007. – Т. 1. – С. 872.
- 2 Waldmeier M. Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung. – Leipzig, Geest u. Portig, 1955. – P. 123.
- 3 Giovanelli R.G. A Theory of Chromospheric flares // Nature. – 1946. – Vol. 158. – P. 81-82.
- 4 // http://swrl.njit.edu/ghn_web/
- 5 // <http://sdo.gsfc.nasa.gov/>
- 6 // <http://goes.gsfc.nasa.gov/>

REFERENCES

- 1 Murzin V.S. i dr. Model kosmosa: Fizicheskie uslovija v kosmicheskom prostranstve. Pod. red. Panasjuk M.I., Novikov L.S. M.: Knizhnyj dom Universitet, 2007. T. 1. S. 872. (in Russ.).
- 2 Waldmeier M. Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung. Leipzig, Geest u. Portig, 1955. P. 123.
- 3 Giovanelli R.G. A Theory of Chromospheric flares. Nature. 1946. Vol. 158. P. 81-82.
- 4 http://swrl.njit.edu/ghn_web/
- 5 http://sdo.gsfc.nasa.gov
- 6 http://goes.gsfc.nasa.gov

Резюме

А. Т. Сәрсембаева, А. Т. Сәрсембай

(Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан)

КҮН АТМОСФЕРАСЫНДАҒЫ БЕЛСЕНДІ ПРОЦЕСТЕР

Күн зерттеуіне деген қызығушылық артып келеді және бұл астрофизикадағы маңызды жетістіктер айналасында есте қаларлықтай. Күн ең жақын жұлдыз болып табылады. Күн сәулелері Жерге жету үшін небәрі 8 минутты қажет етеді. Ал бізге ең жақын жұлдыз Проксима Центаврдің нұры 4,3 жылда жетеді. Күннің Жерге деген мұндай жақындығы оны нүкте ретінде емес диск ретінде көретін жалғыз жұлдыз екендігін көрсетеді. Сол себептен осы жұлдызды толық зерттей аламыз. Бұл мақалада күн атмосферасында өтіп жатқан процестер, яғни күн жарқылы, күн дақтары, күн алауы және тәждік транзиенттер қарастырылған. Сонымен қатар 2012 жылдың 12 шілдесінде тіркелген X класындағы күн жарқылына талдау жасалды.

Тірек сөздер: күн жарқылы, күн дақтары, күн алауы, тәждік транзиенттер.

Summary

A. T. Sarsembayeva, A. T. Sarsembay

(Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan)

ACTIVE PROCESSES ON THE SUN'S ATMOSPHERE

Interest in the study of the Sun is continuously growing, and this is particularly noticeable on the background of the major achievements in astrophysics in general. The sun is the nearest star. The sun's rays takes about eight minutes to reach the earth, while from the nearest star Proxima Centauri it takes 4.3 years. This proximity of the Sun to the Earth leads to the fact that she is the only star that we see not as a point but as a disk. Therefore, this star can be studied in more details. In this paper was considered active processes occurring in the solar atmosphere, such as a solar flare, solar spots, facula and coronal transients. Also analyzed X - class flare, registered in July 12, 2012.

Keywords: solar flare, solar spots, solar facula, coronal transient.