

СУББУРИ НАД АПАТИТИ ПО ВРЕМЕ НА СИЛНИ ГЕОМАГНИТНИ БУРИ ПРЕЗ СЛЪНЧЕВ ЦИКЪЛ 24

Венета Гинева¹, Ирина Деспирак², Борис Козелов², Ролф Вернер¹

¹Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките

²Полярен геофизически институт, ФАНО, Апатити, Русия
е-мейл: v_guineva@yahoo.com

Ключови думи: аврорални емисии, суббури, геомагнитни бури

Резюме: Разгледани са три периода с висока геомагнитна активност: 8-10 март 2012, 17-18 март 2013 и 17-21 март 2015 гг., през които са регистрирани геомагнитни бури със SYM/H индекс по-малък от -100 nT. Изследвани са суббури, възникнали през тези периоди. За тази цел са използвани данните от системата камери **Multiscale Aurora Imaging Network (MAIN)** в Апатити. За параметрите на слънчевия вятър и междупланетното магнитно поле е използвана базата данни OMNI. Определени са различните потоци в слънчевия вятър, свързани с възникването на геомагнитни бури. Началото на суббури и последвалото им развитие е потвърдено по данните от all-sky камерата в Апатити и мрежата магнитометри IMAGE. Сравнени са суббури по време на различните фази на геомагнитните бури.

SUBSTORMS OVER APATITY DURING STRONG GEOMAGNETIC STORMS IN SOLAR CYCLE 24

Veneta Guineva¹, Irina Despirak², Boris Kozelov², Rolf Werner¹

¹Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

²Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia
e-mail: v_guineva@yahoo.com

Keywords: aurora emissions, substorms, geomagnetic storms

Abstract: In this paper three periods of high geomagnetic activity: 8-10 March 2012, 17-18 March 2013 and 17-21 March 2015 are examined. During these periods geomagnetic storms with SYM/H index less than -100 nT were registered. The substorms generated during the storms are studied. For this purpose data from the Multiscale Aurora Imaging Network (MAIN) in Apatity were used. The OMNI data base was used for the solar wind and interplanetary magnetic field data. The different streams in the solar wind associated with the occurrence of geomagnetic storms were specified. The substorms onset and further development were verified by Apatity all-sky camera and IMAGE magnetometers network data. Substorms developed during different storm phases were compared.

Увод

Изучаването на явленията при висока геомагнитна активност е от голямо значение, понеже геомагнитните бури могат да засегнат енергийните системи на спътниците или на Земята. За да се разберат и прогнозираят възможните последици от такива явления е необходимо да се натрупат наблюдения, да се създадат модели на цялата верига от процеси от Слънцето до Земята. Така ще могат да се правят успешни прогнози за космическото време и да се предотвратят повреди в технологичната инфраструктура при силни геомагнитни бури [1]. Настоящият 24 Слънчев цикъл се отличава със сравнително ниска слънчева активност. За периода 2011-2015 г. са регистрирани 14 геомагнитни бури, при които SYM/H индексът достига стойности, по-малки от -100 nT, и само при една (денят на св. Патрик – 17.03.2015 г.) SYM/H става по-малък от -200 nT [2].

Целта на тази работа е да се изучат суббури, възникнали по време на силни геомагнитни бури, с минимален SYM/H индекс по-малък от -100 nT. Ние разполагаме с данни от системата камери MAIN (Multiscale Aurora Imaging Network) в Апатити, описана подробно в [3]. С нея са реализирани наблюдения през три периода с такава висока геомагнитна активност, през ясни зимни нощи: 8-10 март 2012 г., 17-18 март 2013 г. и 17-21 март 2015 г. За изучаване на развитието на суббурите са използвани данни от all-sky камерата (изображения и кеограми) и от Gyrro F-044C (GC) със зрително поле около 67° (кеограми). В кеограмите магнитният север е нагоре, а нулата съвпада със зенита. Параметрите на слънчевия вятър и междупланетното магнитно поле са взети от база данните OMNI (http://sdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/). Наличието на суббури е потвърдено и по данни от меридионалната верига Tartu – Ny Ålesund (Tartu (TAR), CGM Lat.= 54.47° – Ny Ålesund (NAL), CGM Lat.= 75.25°) от мрежата магнитометри IMAGE. Регистрирани са общо 12 суббури при ясни условия през тези периоди, по 2 през първия и втория и 8 през третия. Тези суббури се развиват през различни фази на геомагнитните бури. Направено е сравнение на характеристиките на суббурите в зависимост от фазата на геомагнитната буря.

Общ преглед на междупланетните условия

Известно е, че геомагнитните бури възникват при наличието на определени структури в слънчевия вятър, най-вече изхвърляния на коронална маса (CME) и коротиращи области на взаимодействие (CIR) (напр. [4, 5]). Трябва да се отбележи, че бурите, генерирани от различни структури в слънчевия вятър, се различават по интензивност, продължителност на фазата на възстановяване и т.н. (напр. [6, 7, 8]). По време на слънчев максимум преобладават спорадичните потоци, свързани с коронални изхвърляния на маса [9]. Близко до земята те се наблюдават като магнитни облаци (MC) (напр. [10]). MC се характеризират като области, в които силата на магнитното поле е по-голяма от средната, плътността на частиците е сравнително ниска и магнитното налягане силно превишава йонното топлинно налягане; посоката на магнитното поле се мени през облака, като се върти успоредно на равнина, която е силно наклонена спрямо еклиптиката [10]. Пред магнитния облак се формира област на взаимодействие с несмутения слънчев вятър (Sheath), която се характеризира с висока плътност, нарастнало налягане и силна променливост на ММП.

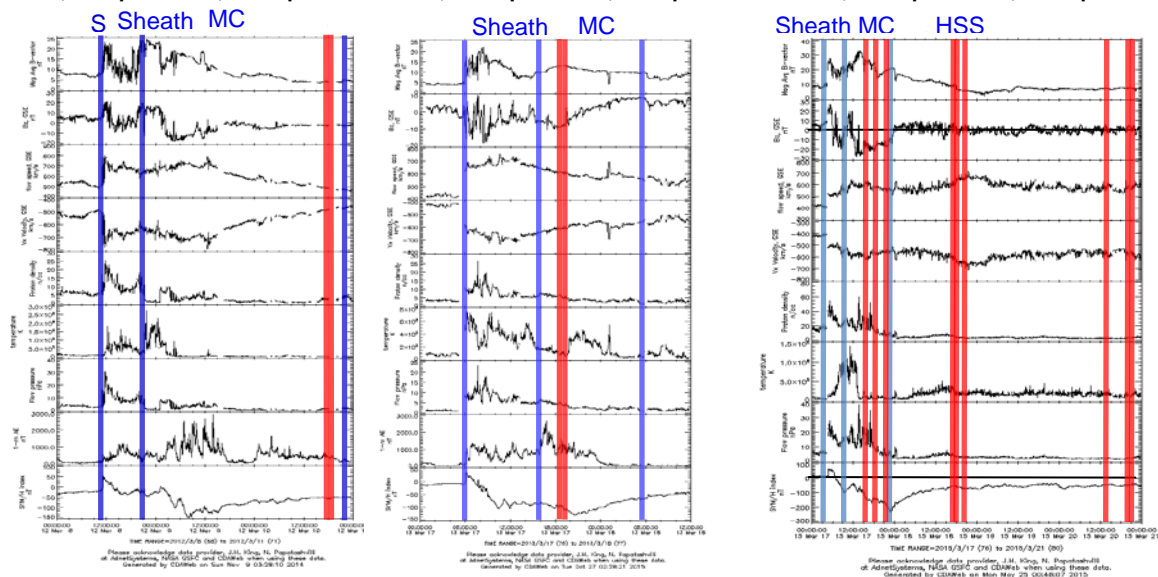
Разглежданите от нас силни геомагнитни бури възникват по време на преминаване на MC покрай земята. От една страна, времената на тези бури (8-10 март 2012 г., 17-18 март 2013 г. и 17-20 март 2015 г.) са близо до слънчевия максимум, получен през април 2014 г. [2]. От друга страна, установено е, че геомагнитните бури, генерирани от Sheath и MC, обикновено са с по-висока интензивност от тези, генерирани от CIR (напр. [11]). Всичко това потвърждава досегашните изследвания. На Фиг.1 са представени междупланетните условия и геомагнитната реакция за трите интервала: 8-10 март 2012 г. (в ляво), 17-18 март 2013 г. (в средата) и 17-20 март 2015 г. (в дясно). И в трите панела от горе надолу са показани: големината на ММП V , V_z компонентата на ММП, скоростта на слънчевия вятър v , нейната x -компонента v_x , плътността на протоните, температурата на протоните, налягането на потока, и два индекса на геомагнитната активност, AE и SYM/H. Границите на Sheath и MC са означени с вертикални сини линии. Времената на наблюдаваните суббури са отбелязани с червени вертикални линии.

Първата от разглежданите бури е част от един от първите силно геомагнитно активни периоди през възходящата фаза на настоящия слънчев цикъл 24, описан в редица изследвания (напр. [12, 13, 14]). Тя е втората и най-силна от поредица от 4 последователни геомагнитни бури. Генерирана е от MC. SYM/H индексът достига минимална стойност -148 nT (Фиг.1, в ляво).

Втората геомагнитна буря е генерирана от Sheath на 17 март 2013 г. (средният панел на Фиг.1). Минималната стойност на SYM/H е -140 nT.

Третата геомагнитна буря, започнала на 17 март 2015 г., т. нар. „Ден на свети Патрик“, е най-силната през 24SC. Тя също е генерирана от ударната вълна, формирана от CME на границата на Sheath областта и SYM/H достига -235 nT (Фиг.1, в дясно). След магнитния облак покрай земята преминава и високоскоростен поток (HSS), насложен частично върху MC, което допринася за продължителността на възстановителната фаза на бурята.

00UT, 8 март – 24UT, 10 март 2012 00UT, 17 март – 12UT, 18 март 2013 00UT, 17 март – 24UT, 20 март 2015



Фиг. 1. Междупланетни и геомагнитни условия в периодите 8-10 март 2012 г. (в ляво), 17-18 март 2013 г. (в средата), и 17-20 март 2015 г. (в дясно)

Наблюдения

Разгледани са измерванията при ясно небе по време трите силни геомагнитни бури. По време на първата буря са идентифицирани 3 суббури, възникнали през късната възстановителна фаза на бурята; при втората буря – 2 последователни суббури по време на главната фаза на бурята, и при третата буря – 8 суббури, 2 от които през главната фаза на бурята, една – в непосредствена близост до минимума на SYM/H (във фазата на възстановяване), на 17 март 2015 г., и 5 – във фазата на възстановяване и късната възстановителна фаза, на 18 и 20 март 2015 г. Моментите на началото на суббурите са указани с червени вертикални линии във Фиг. 1.

Като примери са представени четири типични случая на развитие на суббури над Апатити през трите геомагнитни бури.

Случай 1. Суббурята в 18:26 UT на 17 март 2013 г.

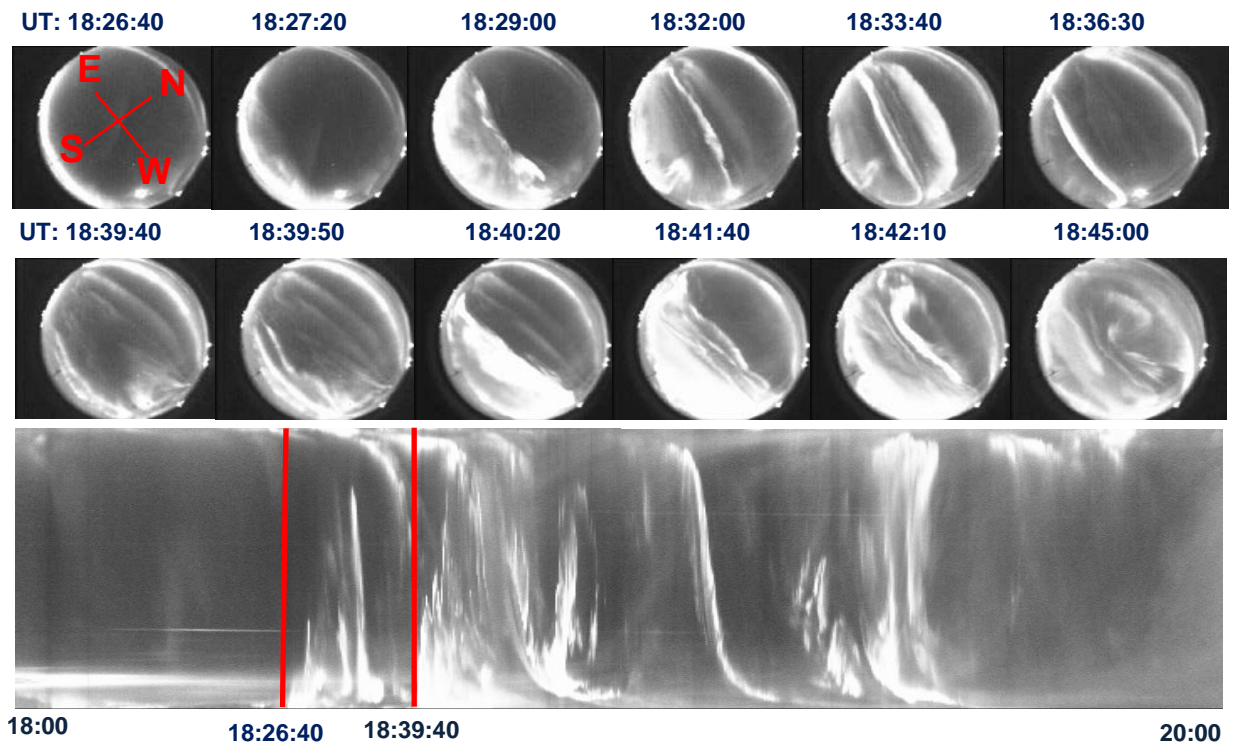
Суббурята на 17 март 2013 г. започва в 18:26 UT (универсално време), по време на главната фаза на геомагнитната буря (Фиг. 1, в средата). В началото на суббурята SYM/H индексът е около -98 nT. Нейното развитие по данни от системата камери MAIN в Апатити е дадено на Фиг. 2. Горните 2 реда представляват избрани изображения от all-sky камерата. Над всяко изображение е времето на регистрирането му. Върху първото изображение са показани посоките (в зависимост от ориентацията на all-sky камерата по време на измерванията). В долната част на Фиг.2 е показана all-sky кеограмата. Силните магнитни смущения започват от най-южната станция от IMAGE – Tartu (TAR) на 54.47°N CGM Lat. (коригирана геомагнитна ширина) и се простират до Sørøya (SOR) на 67.34°N CGM Lat. По изображенията на all-sky камерата суббурята започва в 18:26:40 UT на юг от станцията Апатити. Наблюдава се разширение на сиянията на север и те преминават над зенита в 18:32 UT. В 18:39:40 UT се наблюдава втора интензификация от юг, която също се разширява на север и сиянията обхващат цялото зрително поле. Началото на суббурята и втората интензификация са отбелязани с червени вертикални линии върху кеограмата (долната част на Фиг. 2).

Случай 2. Суббурята в 19:59 UT на 17 март 2015 г.

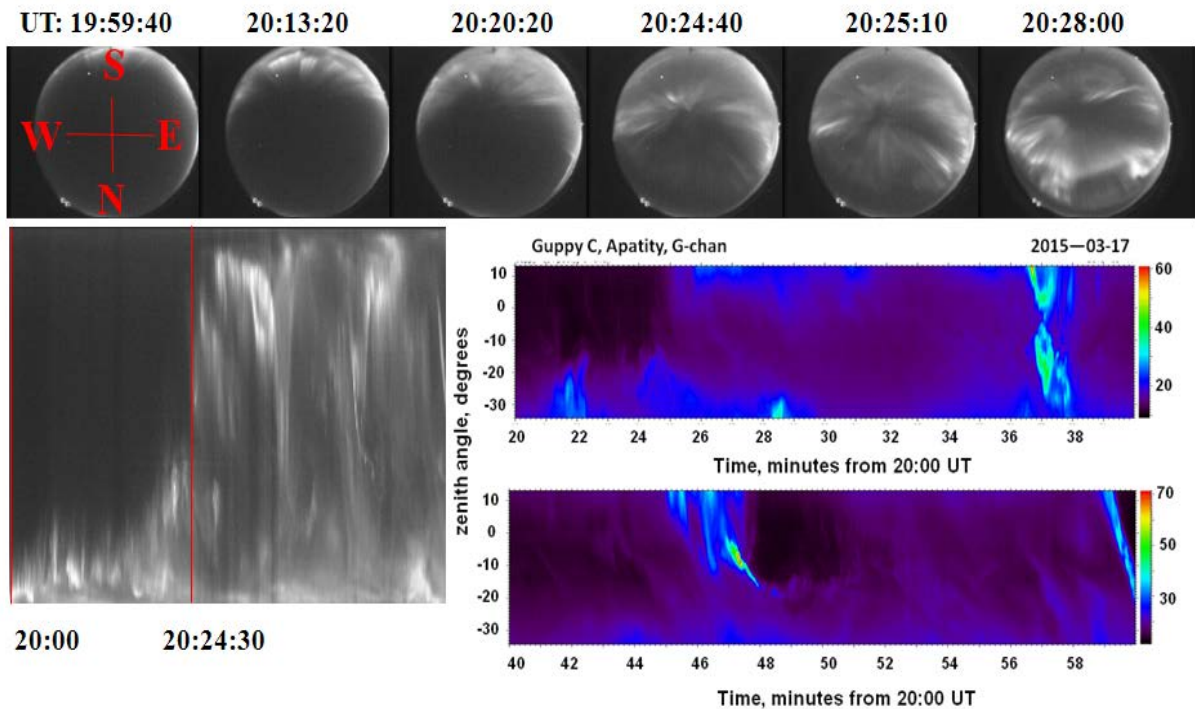
Развитието на суббурята в 19:59 UT на 17 март 2015 г. е показано на Фиг.3. Горният панел представя избрани изображения от all-sky камерата. Универсалното време (UT) е указано над всяко изображение, а посоките са показани върху първото изображение. В долната част на фигурата са кеограмите на all-sky камерата (в ляво) и на GC камерата (в дясно).

Тази суббурия е наблюдавана по време на главната фаза на геомагнитната буря на деня на св. Патрик (Фиг.1 в дясно). SYM/H индексът в началото на суббурята е около -160 nT. По магнитни данни магнитното смущение започва от станцията Tartu (TAR) на 54.47°N CGM Lat. и се придвижва до Ny Ålesund (NAL) на 75.25°N CGM Lat. По данни от all-sky камерата суббурята започва в 19:59:40 UT. Първоначално сиянията остават на юг от зенита на станцията. В

20:24:30 UT се наблюдава бързо разширение на сиянията на север и те заемат цялото зрително поле. Това време е отбелязано на all-sky кеограмата с червена вертикална линия. По данни от GC камерата сиянията в 19:59:40 UT са на около 25° южно от зенита. Бликът в 20:24:30 UT е ясно изразен (горната GC кеограма във Фиг. 2). Максималната относителна интензивност на сиянията в зрителното поле на GC камерата е 70 отн. единици.



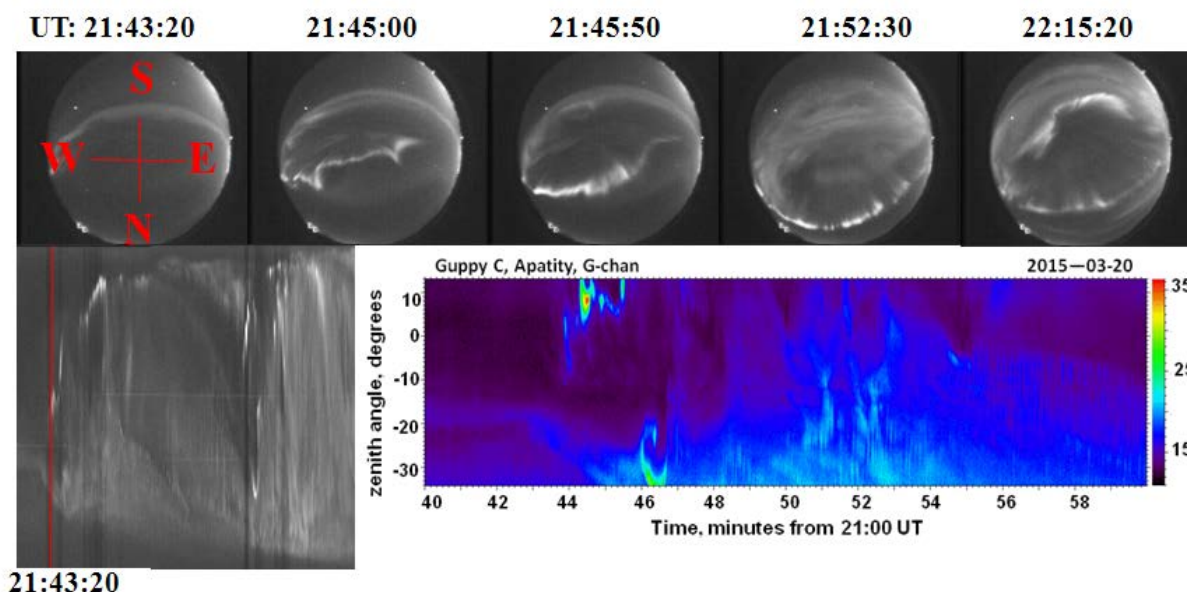
Фиг. 2. Избрани изображения от развитието на суббурята на 17 март 2013 г. в 18:26:40 UT (горе) и all-sky кеограма (долу). Началото на суббурята е по време на главната фаза на на геомагнитната буря, на юг от зенита на станцията



Фиг. 3. Развитие на суббурята в 19:59:40 UT на 17 март 2015 г. по избрани изображения от all-sky камерата (горе), all-sky кеограма (долу в ляво) и GC кеограми (долу в дясно)

Случай 3. Суббурята в 21:43 UT на 20 март 2015 г.

Развитието на суббурята в 21:43 UT на 20 март 2015 г. по измервания на системата MAIN е представено на Фиг.4. Форматът на Фиг.4 е като на Фиг.3. Тази суббуря е наблюдавана по време на късната фаза на възстановяване на геомагнитната буря в деня на св. Патрик 17 март 2015 г. (Фиг.1 в дясно). SYM/H индексът в началото на суббурята е ~ 45 nT. По данните от магнетометрите магнитното смущение започва от Oulugärvi (OUJ) на 60.99° CGM Lat. и се придвижва до Ny Ålesund (NAL) at 75.25° N CGM Lat. Началото на суббурята по изображенията на all-sky камерата е в 21:43:20 UT близо до зенита на станцията. То е отбелязано в кеограмата с червена вертикална линия. Сиянията се разрастват много бързо, обхващат цялото зрително поле около 22:16 UT и станцията остава в авроралната изпъкналост. В GC кеограмата началото на суббурята се наблюдава в зенита на станцията в 21:43:50 UT. Максималната относителна интензивност е 36 отн. единици.



Фиг. 4. Развитие на суббурята в 21:43:20 UT по данни от системата камери MAIN: избрани изображения на all-sky камерата (горе), all-sky кеограма (долу в ляво) и GC кеограма (долу в дясно)

Случай 4. Суббурята в 18:35 UT на 10 март 2012 г.

Суббурята в 18:35 UT на 10 март 2012 г. възниква през късната фаза на възстановяване на силната геомагнитна буря, започнала на 8 март. SYM/H индексът в началото на суббурята е ~ 50 nT (Фиг.1 в ляво). Магнитното смущение започва от Pello (PEL) на 63.55° N CGM lat. и се разпростира до Longyearbyen (LYR) на 75.12° N CGM lat. Развитието на суббурята е показано на Фиг.5 (форматът ѝ е като на Фиг.3). Началото на суббурята по данни на all-sky камерата е в 18:35:50 UT на север от Апатити. Сиянията се разширяват на юг, достигат зенита в 18:39 UT и продължават да се движат на юг. В по-детайлните GC кеограми сиянията се наблюдават от 18:38:30 UT на около 15° на север от зенита (горната кеограма). Вижда се бързото движение на юг. Максималната интензивност в границите на зрителното поле е 34 отн. единици.

Дискусия

Изследвано е развитието на суббурите, възникнали по време на 3 силни геомагнитни бури със SYM/H индекс по-малък от -100 nT по данни от системата камери MAIN в Апатити: 8-10 март 2012 г., 17-18 март 2012 г. и 17-20 март 2015 г. Нашите изследвания потвърждават появата на сиянията съгласно динамиката на авроралния овал (напр. [15]). При смутени условия, по време на главната фаза на геомагнитна буря или във фазата на възстановяване близо до максималното развитие на бурята (минималната стойност на SYM/H индекса) авроралният овал е разширен, и началото на суббурите в приекваториалния му край е на юг от Апатити. В този случай наблюдаваме разширяването на сиянията на север. В по-късната фаза на възстановяване на бурята, когато авроралният овал е „нормален“ или „компресиран“, началото на суббурите е на север от Апатити. Тогава виждаме движението на сиянията от север на юг.

UT: 18:35:50

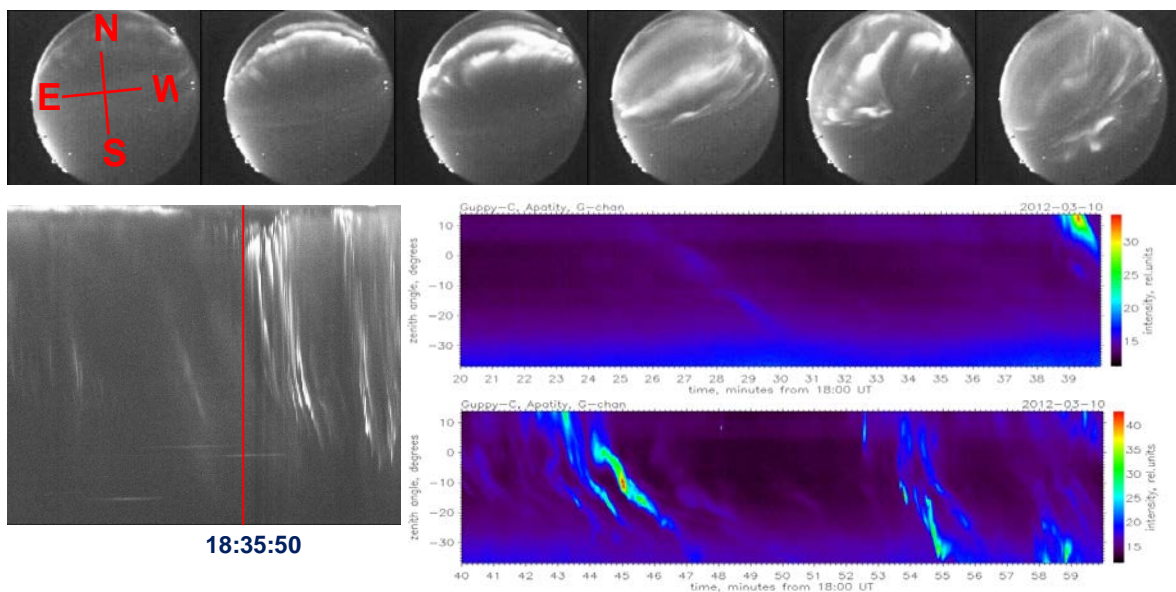
18:37:00

18:38:20

18:43:10

18:52:50

18:58:30



Фиг. 5. Развитие на една суббурия на 10 март 2012 г. по избрани изображения на all-sky камерата (горе), и кеограми на all-sky камерата (долу в ляво) и GC камерата (долу в дясно)

Границата между суббуриите, започнали на юг и на север от ширината на Апатити (63.86°N CGM Lat.) по стойността на SYM/H индекса в началото на суббурията, е между -40 и -50 nT. Както изглежда, тя зависи най-вече от степента на геомагнитното смущение (което може да се изрази чрез минималната стойност, достигната от индекса SYM/H) и от отдалечеността по време на началото на суббурията от него. Вероятно влияние оказва и продължителността на фазата на възстановяване.

Максималната относителна интензивност в зрителното поле на GC камерата е по-голяма за суббури, възникнали на юг от Апатити, и значително по-малка за суббури, започнали около зенита или на север от станцията.

Заклучения

На основата на тези резултати и разсъждения достигаме до следните заключения:

- Суббуриите, възникващи през главната фаза на геомагнитната буря или близо до максималното ѝ развитие във фазата на възстановяване, започват на юг от Апатити (63.86°N CGM lat.) и се наблюдава движението на полярния край на суббуриевата изпъкналост на север.
- При суббури през фазата на възстановяване на геомагнитната буря или през късната фаза на възстановяване, началото е около зенита на станцията или на север от нея, и се вижда движението на сиянията от север на юг.
- Границата между двата типа суббури по стойността на SYM/H индекса е в областта 40 - 50 nT, и зависи от силата на геомагнитната буря и разликата между времето на началото на суббурията и времето на максималното развитие на бурята.
- Максималната относителна интензивност на суббуриевите дъги в зрителното поле на камерата е значително по-висока при суббуриите, възникнали на юг от Апатити.

Благодарности

Тази работа беше осъществена с подкрепата на Програма №9 на Президиума на РАН. Тя е част от работата по съвместен проект 1.2.10 между ПГИ-РАН и ИКИТ-БАН по програмата за фундаментални космически изследвания.

Благодарни сме на J. N. King и N. Papitashvili при AdnetSystems, NASA GSFC и CDAweb за предоставянето на данните от OMNI.

Литература:

1. Schrijver, C. J. et al. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015-2025 commissioned by COSPAR and ILWS, *Adv. Space Res.*, v. 55, 2015, pp. 2745-2807.
2. Watari, S., M. Den, Y. Kubo. Booklet of SCOSTEP-WDS Workshop on Global Data Activities for the study of Solar-Terrestrial Variability, 28-30 September 2015, [2-4], p. 22.
3. Kozelov, B.V., S.V. Pilgaev, L.P. Borovkov, V.E. Yurov. Multi-scale auroral observations in Apatity: winter 2010-2011, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, v.1, 2012, pp.1-6.
4. Gonzalez, W. D., A. L. C. Gonzalez, B. T. Tsurutani. Dual-peek solar cycle distribution of intense geomagnetic storms, *Planet. Space Sci.*, v. 38, 1990, pp. 181-187.
5. Tsurutani, B. T., W. D. Gonzalez, A. L. C. Gonzalez, F. L. Guarnieri, N. Gopalswamy, M. Grande, Y. Kamide, Y. Kasahara, G. Lu, I. Mann, R. Mc Pherron, F. Soraas, V. Vasyliunas, Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review. *J. Geophys. Res.*, v. 111, 2006, A07S01, doi:10.1029/2005JA011273.
6. Huttunen, K. E. J., H. E. J. Koskinen, A. Karinen, K. Mursula, Asymmetric development of magnetospheric storms during magnetic clouds and sheath regions, *Geophys. Res. Lett.*, v. 33, 2006, L06107, doi: 10.1029/2005GL024894.
7. Pulkkinen, T. I., N. Y. Ganushkina, E. I. Tanskanen, M. Kubyshkina, G. D. Reeves, M. F. Thomsen, C. T. Russel, H. J. Singer, J. A. Slavin, J. Gjerloev, Magnetospheric current systems during stormtime sawtooth events, *J. Geophys. Res.*, v. 111, 2006, A11S17, doi: 10.1029/2006JA011627,.
8. Yermolaev, Yu. I., M. Yu. Yermolaev, Statistic study on the geomagnetic storm effectiveness of solar and interplanetary events, *Adv. Space Res.*, v.37, 2006, pp. 1175-1181.
9. Webb, D. F., R. A. Howard, The solar cycle variation of coronal mass ejections and the solar wind mass flux, *J. Geophys. Res.*, v. 99, 1994, pp. 4201-4220.
10. Burlaga, L. F., L. F. Klein, L. Sheeley, N. R. Michels, D. J. Howard, R. A. Koomen, M. J. Schwenn, H. Rosenbauer, A magnetic cloud and a coronal mass ejection, *Geophys. Res. Lett.*, v. 9, 1982, pp. 1317-1320.
11. Despirak, I. V., A. A. Lubchich, A. G. Yahnin, B. V. Kozelov, H. K. Biernat. Development of substorm bulges during different solar wind structures. *Ann. Geophys.*, v.27, 2009, pp.1951-1960.
12. Tsurutani, B. T., E. Echer, K. Shibata, O. P. Verkhoglyadova, A. J. Mannucci, W. D. Gonzalez, J. U. Kozyra, M. Pätzold. The interplanetary causes of geomagnetic activity during the 7-17 March 2012 interval: a CAWSES II overview, *J. Space Weather Space Clim.*, 4, 2014, A02, doi: 10.1051/swsc/2013056.
13. Valchuk, T. E. Solar wind and magnetic storms in the 24th Solar Activity Cycle, *Astron. Tsirkulyar*, N1585, 2013, ISSN 0236-2457.
14. Guineva, V., I. Despirak, B. Kozelov, R. Werner. Substorms over Apatity during the period of enhanced geomagnetic activity 7-17 March 2012, *Aerospace research in Bulgaria*, v. 27, 2015, pp. 43-52.
15. Starkov, G. V., Feldshtein, Ya.I. Substorms in aurorae, *Geomag. and Aeron.*, v. 11, 1971, pp. 560-562.