

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION

POLAR GEOPHYSICAL INSTITUTE

PHYSICS OF AURORAL PHENOMENA

44rd Annual Seminar
15 – 19 March 2021

Proceedings



*Ministry of Science and Higher Education
of the Russian Federation*

Polar Geophysical Institute

PHYSICS OF AURORAL PHENOMENA

Proceedings of the 44th Annual Seminar

Apatity

15 – 19 March 2021

Apatity
2021

Published by decision of the Scientific Council of the Polar Geophysical Institute

The organizing committee:

Andrey Demekhov (chair)
Andris Lubchich
Irina Despirak
Boris Gvozdevsky
Konstantin Orlov
Tatyana Popova

Addresses:

Apatity department
Akademgorodok, 26a
Apatity, 184209
Murmansk region
Russia

Murmansk department
Khalturina str., 15
Murmansk, 183010
Russia

DOI: 10.5198/2588-0039.2021.44

Editor:

A.A. Lubchich

Научное издание
Технический редактор В. Ю. Жиганов
Подписано к печати 07.12.2021. Формат 60×84 1/8.
Усл. печ. л. 23.61. Тираж 32 экз. Заказ № 41.
Издательство ФГБУН ФИЦ КНЦ РАН.
184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14. rio.ksc.ru

<http://pgia.ru/seminar>

CONTENTS

SESSION 1. GEOMAGNETIC STORMS AND SUBSTORMS

E.E. Antonova, N.V. Sotnikov, V.G. Vorobjev, O.I. Yagodkina, I.P. Kirpichev, I.L. Ovchinnikov, M.S. Pulinets, M.V. Stepanova	Problems of the outer radiation belt formation and topological features of high latitude magnetosphere	7
I.V. Despirak, N.G. Kleimenova, A.A. Lubchich, P.V. Setsko, R. Werner	Supersubstorm on 28 May 2011 – geomagnetic effects in the global scale	12
I.V. Despirak, T.V. Kozelova, B.V. Kozelov, A.A. Lubchich	Observations of substorm activity from the data of MAIN camera system and THD satellite in the plasma sheet	16
I.V. Despirak, P.V. Setsko, Ya.A. Sakharov, V.N. Selivanov	GICs in the main transmission line “Northern Transit” in Russia and in the Mäntsälä Finland pipeline: a case study	20
I.I. Efishov, I.I. Shagimuratov, I.E. Zakharenkova, N.Yu. Tepenitsyna, M.V. Filatov, G.A. Yakimova	Day by day behavior of GNNS positioning errors and TEC fluctuations associated auroral disturbances over March 2015	24
V. Guineva, I. Despirak, R. Werner, R. Bojilova, L. Raykova	Study of mid-latitude positive bays during substorms over Scandinavia – A case study	28
Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев, Е.А. Ревунова, О.И. Ягодкина, И.С. Ундалова	Нейросетевая классификация причинно-следственной связи суббулевой активности с параметрами магнитных облаков солнечного ветра	32
А.А. Любич, И.В. Дэспирак, Н.Г. Клейменова, Р. Вернер	Суперсуббурия 20 декабря 2015 года: магнитные эффекты на разных широтах	36
Г.А. Макаров	Сезонные изменения геомагнитных индикаторов магнитосферного кольцевого тока	42
В.А. Пархомов, В.Г. Еселевич, М.В. Еселевич, Б. Цэгмэд, С.Ю. Хомутов, Р.А. Рахматулин, Т. Райта, А.А. Мочалов, С.В. Пильгаев	Глобальная изолированная суббурия, вызванная диамагнитной структурой медленного солнечного ветра 22.12.2015	46
С.Е. Ревунов, В.Г. Воробьев, О.М. Бархатова, О.И. Ягодкина, А.А. Зуборева	Нейросетевой анализ особенностей генерации высокоширотных геомагнитных возмущений, вызываемых оболочками магнитных облаков солнечного ветра	52

И.И. Шагимуратов, И.И. Ефишов, М.В. Филатов, И.Е. Захаренкова, Н.Ю. Тепенитчина, Г.А. Якимова	Флуктуации GPS-сигналов и ошибки позиционирования в полярной и авроральной ионосфере в ноябре 2012 года	55
---	---	----

SESSION 2. FIELDS, CURRENTS, PARTICLES IN THE MAGNETOSPHERE

В.Г. Воробьев, О.И. Ягодкина, Е.Е. Антонова, И.П. Кирпичев	Давление ионов в ночной авроральной зоне при экстремальных значениях динамического давления солнечного ветра	59
---	--	----

SESSION 3. WAVES, WAVE-PARTICLE INTERACTION

V.B. Belakhovsky, V.A. Pilipenko, K. Shiokawa, Y. Miyoshi	The investigation of the Pg pulsations with using data of ARASE, GOES satellites and ground-based stations	63
--	--	----

О.И. Ахметов, И.В. Мингалев, О.В. Мингалев, В.Б. Белаховский, З.В. Суворова	Моделирование процесса распространения сигналов радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа» в участках волновода Земля – ионосфера с горизонтально неоднородным распределением концентрации электронов	67
---	---	----

В.А. Любчик	Трехмерное моделирование процесса распространения электромагнитных волн КНЧ-диапазона от контролируемого источника в высокоширотных районах Западно-Арктической континентальной окраины на примере полуостровов Рыбачий и Средний	71
-------------	---	----

А.С. Никитенко, М.В. Кузнецова, Ю.В. Федоренко, Ю. Маннинен, Н.Г. Клейменова, С.В. Пильгаев, А.В. Ларченко	Ионосферная область рассеяния ОНЧ аврорального хисса по данным наземных наблюдений в высоких широтах	75
---	--	----

SESSION 4. THE SUN, SOLAR WIND, COSMIC RAYS

A.G. Elias, B.S. Zossi, A.R. Gutierrez Falcon, E.S. Comedi, B.F. de Haro Barbas	Long-term trends in cosmic rays and geomagnetic field secular variations	79
---	--	----

A.V. Moldavanov	Eigen energy exchange modes of magnetosphere at long-lasting stochastic coupling with solar wind	81
-----------------	--	----

V.N. Obridko, D.D. Sokoloff, V.V. Pipin, A.S. Shibalova	Medium-term oscillations of the solar activity	85
--	--	----

A.I. Podgorny, I.M. Podgorny, A.V. Borisenko, N.S. Meshalkina	Choice of conditions for MHD simulations above the active region, allowing the study of the solar flare mechanism	92
--	---	----

D.B. Rozhdestvensky, V.I. Rozhdestvenskaya, V.A. Telegin	Spectral analysis and forecasting of the 25th solar cycles	96
A.K. Singh, A. Bhargawa	Establishing solar activity trend for solar cycles 21 – 24	100
С.В. Громов, Ю.С. Загайнова, Л.И. Громова	Связь направления прихода фронта межпланетной ударной волны со временем <i>SC</i> по анализу отдельных <i>KBM</i> -событий	107
О.А. Данилова, Н.Г. Птицына, М.И. Тясто, В.Е. Сдобнов	Контроль жесткости обрезания космических лучей параметрами магнитосферы и солнечного ветра во время сильной магнитной бури в начале сентября 2017 г.	111
М.С. Калинин, М.Б. Крайнев, А.К. Свиржевская, Н.С. Свиржевский	Сравнительный анализ 2D и 3D подходов к уравнению модуляции ГКЛ: теория и практика	115

SESSION 5. IONOSPHERE AND UPPER ATMOSPHERE

Zh.V. Dashkevich, V.E. Ivanov, B.V. Kozelov	The features of precipitating electron spectra in the rayed auroras	118
A.S. Kirillov, R. Werner, V. Guineva	The simulation of vibrational populations of electronically excited N_2 in Titan's upper atmosphere during precipitations of high-energetic particles	122
V. Safargaleev, T. Sergienko, K. Hosokawa, Y. Ogawa, Y. Miyoshi, S.-I. Oyama, S. Kurita, R. Fujii	On the possible origin of internal (2-3 Hz) modulation of pulsating auroras	126
A.V. Timchenko, F.S. Bessarab, A.V. Radievsky	Seasonal features of the correlation of the Total Electron Content at Magnetically Conjugate Points	130
С.А. Долгачева, А.В. Николаев, Л.Н. Макарова	Автоматическая интерпретация высокоширотных ионограмм CADI: обнаружение слоев E, Es, F1 и F2	133
Э.Г. Мирмович	«Три источника – три составные части» генерации термосферно-ионосферных возмущений	137
С.В. Пильгаев, Б.В. Козелов, М.В. Филатов, Ю.В. Федоренко, А.В. Ларченко, А.В. Ролдугин, П.А. Будников	О возможности исследования связи полярных сияний и индексов синтилляций по оптическим и GNSS данным	141

Д.Д. Рогов, П.Е. Барышев, А.С. Калишин, А.В. Николаев, С.В. Новиков, Ю.В. Угрюмов	Исследование ионосферы над Баренцевым морем	146
С.А. Серебrenникова	Оценка границ локализации возмущений высокоширотной ионосферы по данным GPS/ГЛОНАСС	150
В.А. Ульев, Д.Д. Рогов, А.А. Абуниин, М.А. Абунина	Связь появления эффекта утреннего понижения поглощения в явлениях ППШ с неоднородным высыпанием потоков протонов в центральной области полярной шапки	154
О.А. Шейнер	Прогностическая оценка критической частоты слоя F2 ионосферы по наблюдениям радиоизлучения в периоды регистрации корональных выбросов массы на коронографах	158
О.И. Ягодкина, В.А. Панченко, В.Г. Воробьев, В.А. Телегин, Г.А. Жбанков	Влияние магнитной активности и давления солнечного ветра на среднеширотную ионосферу во время магнитной бури 22-23 июня 2015 года	163

SESSION 6. LOW ATMOSPHERE, OZONE

Y.Y. Kulikov, A.F. Andriyanov, V.G. Ryskin, V.M. Demkin, V.I. Demin, A.S. Kirillov, V.A. Shishaev	The microwave monitoring of the middle atmosphere ozone on Kola Peninsula during last three winters	168
О.В. Антоненко, А.С. Кириллов	Анализ излучаемых полос Чемберлена и Герцберга I в спектре свечения ночного неба Земли	172
В.И. Демин, Б.В. Козелов, А.В. Лосев	Особенности вертикального распределения температуры воздуха в пограничном слое атмосферы в прибрежных и центральных районах Мурманской области	176
В.И. Демин, Б.В. Козелов, Т.А. Муравьева	Связь вертикального распределения температуры воздуха в Хибинах с температурой над предгорной равниной	181
А.С. Кириллов, В.Б. Белаховский, Е.А. Маурчев, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздевский	Исследование кинетики основных атмосферных составляющих во время высыпания высокоэнергичных протонов в среднюю атмосферу Земли	186

SESSION 7. HELIOBIOSPHERE

P.A. Kashulin, N.V. Kalacheva	Solar-terrestrial effects revealed through long-term observation on biorhythms in plants and experimental random events occurrence	191
М.В. Рагульская	COVID-19: особенности пандемии в условиях глобального минимума солнечной активности	195
Author index		199

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.001

PROBLEMS OF THE OUTER RADIATION BELT FORMATION AND TOPOLOGICAL FEATURES OF HIGH LATITUDE MAGNETOSPHERE

E.E. Antonova^{1,2}, N.V. Sotnikov¹, V.G. Vorobjev³, O.I. Yagodkina³, I.P. Kirpichev², I.L. Ovchinnikov¹, M.S. Pulinets¹, M.V. Stepanova⁴

¹*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991, Russia;*
E-mail: elizaveta.antonova@gmail.com

²*Space Research Institute (IKI) Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

³*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

⁴*University of Santiago de Chile, Chile*

Abstract. We analyzed the problems of formation of the outer radiation belt (ORB) taking into consideration the latest changes in our understanding of the high-latitude magnetospheric topology. This includes strong evidence that the auroral oval maps to the outer part of the ring current, meanwhile the ORB polar boundary maps inside the auroral oval. Our analysis also includes the variation of the plasma pressure distribution and the time of the acceleration of relativistic electrons during geomagnetic storm. It is shown that the maximum of ORB is formed after the geomagnetic storm in the region of plasma pressure maximum. The position of this maximum agrees with the prediction of the ORB formation theory based on the analysis of ring current development during storm. We emphasize the role of adiabatic processes in the ORB dynamics and the importance of the substorm injections during storm recovery phase for the formation of enhanced fluxes of ORB electrons after the storm.

1. Introduction

The formation of outer radiation belt (ORB) continues to be one of the most intriguing problems of magnetospheric dynamics and one of the main aims of the Space Weather prediction program. It is directly connected to the solution of magnetospheric storm and substorm problems. In spite of successive realization of ORB/Van Allen project [Ripoll *et al.*, 2020] the main problems of ORB formation continue to be unsolved. Their solution requires the extraction of adiabatic effects produced by the decrease of the magnetic field inside the ring current during storm and an adequate description of the variation of the storm time magnetic field. Not so long ago it became clear that the acceleration of electrons to relativistic energies can take place on a time scale of substorm [Foster *et al.*, 2017; Sotnikov *et al.*, 2019b] which is impossible to explain suggesting the dominant role of “quasilinear” (really linear) wave- particle interactions solving Fokker-Plank equation with predefined diffusion coefficients [Baker *et al.*, 2018].

In this report we summarize the main latest results obtained after 2017 and not included in our report [Antonova *et al.*, 2017] which are important for the solution of ORB problems. We try to show that taking into account the mapping of the main part of auroral oval to the outer part of the ring current and the validity of the Tverskaya’s relation, the theory of ORB formation can explain many of observed features of the ORB formation and have predictions which are now supported by results of modelling and satellite observations.

2. Auroral oval and ORB location

The main difficulty in the understanding the ORB formation processes was the widely distributed point of view about the mapping of the auroral oval to the geomagnetic tail. Such mapping was based on the use of geomagnetic field models with predefined geometry of current systems which did not include the high latitude part of the ring current (CRC - cut ring current) region which produce the disturbance of Bz and Bx magnetic field components at the Earth [Antonova *et al.*, 2009] and in which daytime current lines are not concentrated at the equatorial plane (see, the review [Antonova *et al.*, 2018a]). Comparison of plasma pressure at the ionospheric altitudes and at the equatorial plane showed (see [Antonova *et al.*, 2015, 2018a; Kirpichev *et al.*, 2016] and references therein) that the equatorial boundary of the auroral oval during quiet time is located at $\sim 7 R_E$ and the polar boundary is located at $\sim 10-13 R_E$. Such auroral oval mapping is in agreement with many observations including the position of substorm injection boundary at $\sim 6-7 R_E$ and high level of observed turbulence in the Earth’s plasma sheet (see the latest review [Antonova and Stepanova, 2021]).

The picture of the ORB formation contains the acceleration of the injected during the storm time energetic electrons to relativistic energies [Baker *et al.*, 2013]. This required to determine the position of the ORB with respect to the auroral oval. The ORB electrons have the drift trajectories which surround the Earth and the ORB outer boundary represents at the same time the trapping boundary of these electrons. A direct comparison between

the locations of the trapping boundary of the electrons with energies >100 keV and of the auroral particle precipitations made simultaneously during the quiet time, showed that trapping boundary is located in most cases inside the auroral oval [Riazanseva *et al.*, 2018]. Such location of the trapping boundary is possible to observe during all studied geomagnetic storms [Sotnikov *et al.*, 2019a, 2021]. It is interesting to mention that in this case the polar boundaries of the auroral oval and the ORB can be observed at the same latitude [Sotnikov *et al.*, 2019a, 2021]. Figure 1 shows an example of the crossing of the auroral oval by METEOR-M2 satellite during the magnetic storm 19-22 December 2015 [Sotnikov *et al.*, 2019a]. The upper panel in the left part of the figure is the spectrogram of electrons in the energy range from 0.13 to 16.64 keV. The bottom panel is the energy flux of auroral electrons (blue line) and the flux of electrons with energies >100 keV (orange line). The vertical dashed lines indicate the trapping boundary of electrons with energies >100 keV (orange) and the equatorial boundary of the oval (blue). The right part of the figure shows Dst, AE and AL variations during storm. Red vertical line shows the time interval of the auroral oval crossing.

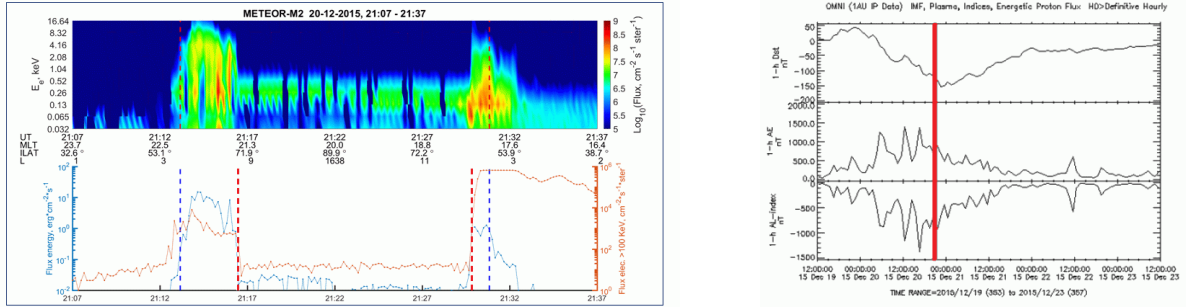


Figure 1. Oval crossing during the great magnetic storm 19-22 December 2015.

The theory developed for description of the ORB formation [Tverskoy, 1997; Antonova, 2006] was initially aimed to explain the Tverskaya's relation which connect the minimal value of the Dst index during storm with the position of the ORB maximum L_{\max} obtained for all energies of relativistic electrons after storm ($|Dst|_{\max} = 2.75 \times 10^4 / L_{\max}^4$). Such dependence for the SYM-H index has the same form but with the coefficient 3.00 [Tverskaya, 2011]. In addition to early findings, recent studies significantly increased the number of events confirming the validity of this relation [Antonova and Stepanova, 2015; Moya *et al.*, 2017; Boyd *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2019].

2. ORB and plasma pressure peak during magnetic storms

The existence of Tverskaya's relation is very difficult to explain by the relativistic electron acceleration due to wave-particle interactions. However, it can be explained [Tverskoy, 1997; Antonova, 2006] if a very sharp plasma pressure peak and magnetic field depression are formed and substorm injections to the region of the depressed magnetic field take place. The formation of the plasma pressure peak is ordinarily observed during storms (see [Stepanova *et al.*, 2008] and references therein). A sharp plasma pressure peak can be formed due to the adiabatic radial plasma transport by large-scale electric fields [Tverskoy, 1997] or due to the injections of ionospheric ions accelerated by the field-aligned electric fields [Antonova, 2006]. But such mechanism can create large fluxes of relativistic electrons only after beginning of storm recovery phase in the conditions of the symmetric ring current formation. The support of such scenario requires complex multi satellite observations. As a first step it is necessary to select sharp increases in the plasma pressure and analyze the value and position of the ring current pressure peak near the end of the storm main phase. It is difficult to do using data of a high apogee satellite as sharp pressure peaks could be destroyed by the processes of radial diffusion taking into consideration than the ring current crossing takes several hours. That is why the formation of sharp pressure peak was first observed using low orbiting DMSP observations [Antonova and Stepanova, 2015]. Its position corresponds to predictions of Tverskaya's relation. However, value of pressure maxima of the peak was much smaller than it was predicted due to limited range of ion energy observations. Larger pressure peaks localized at geocentric distances in accordance with Tverskaya's relation were observed by Kirpichev *et al.* [2018], Stepanova *et al.* [2019, 2020].

New generation of magnetic field models using data mining technique (DM) creates a possibility to select much larger ring current maxima [Sitnov *et al.*, 2020]. Distribution of ring current pressure at the equatorial plane was obtained by integrating the quasi-static force balance equation with the isotropic plasma approximation ($\nabla p = [\mathbf{j} \times \mathbf{B}]$, where p is the pressure, \mathbf{j} is the current density, \mathbf{B} is the magnetic field). Figure 2a adapted from [Sitnov *et al.*, 2020] shows plasma pressure distribution at the end of the main phase of 15–16 July 2000 superstorm (Bastille Day with Sym-H < -300 nT shown on Figure 2b). The vertical red line shows the moment of DM reconstruction. It is possible to see the formation of sharp pressure maximum equal to 177 nPa in the premidnight sector when SYM-H index had the minimal value. This value is much larger than earlier observed storm time pressure peaks. Figure 2c show the radial profile of pressure distribution adapted form [Tverskaya *et al.*, 2005] calculated for different values of

minimal Dst in accordance with *Tverskoy* [1997] predictions. The thin lines show a plasma distribution for the storms of $|Dst|_{\max} = 50, 100, 150, 200$ and 300 nT. It is possible to see that the values of pressure maxima in Figure 2a in spite of a number of DM technique errors practically corresponds to theory predictions. The position of maximum taking into account the accuracy of DM reconstruction was near the predicted.

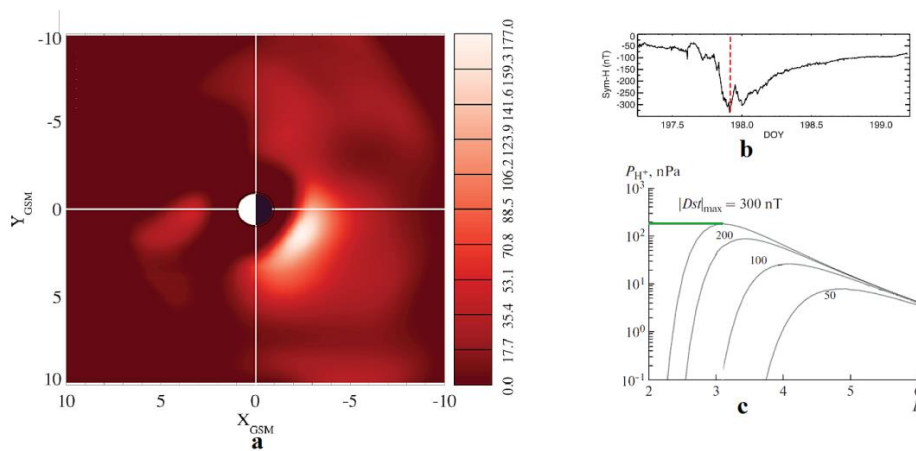


Figure 2. Comparison of DM mining picture of pressure distribution for Bastille Day superstorm 15–16 July 2000 with theoretic prediction of pressure peak value.

The position of pressure maximum corresponds to the equatorial boundary of storm time auroral oval and solar cosmic ray's penetration boundary [*Tverskaya*, 2011] which means the great modification of magnetic field at geocentric distances larger than pressure maximum. Coincidence of the westward electrojet equatorial boundary with the position of pressure maximum [*Tverskaya*, 2011; *Antonova and Stepanova*, 2015] support such modification. Appearance of relativistic electrons after storm take place only in the case of substorm development during storm recovery phase (see [*Antonova et al.*, 2018b] and references therein), which also support the theory predictions. These show that additional steps in the restore of pressure distribution during magnetic storms and verifications of [*Tverskoy*, 1997; *Antonova*, 2006] predictions are very interesting as they can lead to considerable changes in the understanding of the ORB formation processes and storm time magnetic field dynamics.

4. Conclusions and discussion

Short analysis summarizing the latest finding in the ORB formation shows the great importance of auroral processes in the relativistic electron dynamics. It was proved that the trapping boundary of energetic electrons is located inside the auroral oval. The coincidence of the trapping boundary with the polar boundary of the auroral oval is observed in a number of storms during auroral oval crossing by METEOR-M No 2 satellite. Such findings support the early made conclusion about overlapping of ORB and the region mapped to the auroral oval. Theoretically predicted appearance of sharp pressure maximum in the ring current during storm obtained new supports including latest results of DM modelling of *Sitnov et al.* [2020]. Position of the nearest to the Earth during storm equatorial boundary of the auroral oval coincides with this sharp pressure peak position. Such position coincides with formed after storm ORB maximum in a rather good agreement with *Tverskay's* relation and theoretical predictions of *Tverskay* [1997], *Antonova* [2006]. Results of the study permit to predict the location of formed after storm ORB maximum and decrease or increase of relativistic electron fluxes in ORB after storm.

However, only small number of events were analyzed till now and the theory needs additional supports and development especially using analysis of auroral observations and magnetosphere-ionosphere interactions at auroral latitudes. Additional possibilities of such studies appeared with the particle observations at large altitudes. Such observations at the altitudes ~ 30000 km at Arase satellite [*Shiokawa et al.*, 2020] demonstrate the existence of bidirectional field-aligned electrons in the source region of the expanding auroral arcs which is important as such beams can be the source of high frequency electrostatic fluctuations relevant to the problem of relativistic electron acceleration.

References

- Antonova E.E. (2006). Stability of the magnetospheric plasma pressure distribution and magnetospheric storms. *Adv. Space Res.*, 38, 1626–1630. doi:10.1016/j.asr.2005.05.005
- Antonova E.E., Stepanova M.V. (2021). The impact of turbulence on physics of the geomagnetic tail. *Front. Astron. Space Sci.*, 8:622570. doi:10.3389/fspas.2021.622570
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Stepanova M.V., Orlova K.G., Ovchinnikov I.L. (2009). Topology of the high latitude magnetosphere during large magnetic storms and the main mechanisms of relativistic electron acceleration. *Adv. Space Res.*, 43, 628–633. doi:10.1016/j.asr.2008.09.011

- Antonova E.E., Stepanova M.V. (2015). The problem of the acceleration of electrons of the outer radiation belt and magnetospheric substorms. *Earth, Planets, and Space*, 67, 148. doi:10.1186/s40623-015-0319-7
- Antonova E.E., Vorobjev V.G., Kirpichev I.P., Yagodkina O.I., Stepanova M.V. (2015). Problems with mapping the auroral oval and magnetospheric substorms. *Earth, Planets, and Space*, 67, 166. doi:10.1186/s40623-015-0336-6
- Antonova E.E., Vorobjev V.G., Riazantseva M.O., Kirpichev I.P., Yagodkina O.I., Ovchinnikov I.L., Vovchenko V.V., Pulinets M.S., Znatkova S.S., Demianov A.I., Sotnikov N.A., Stepanova M.V., Moya P.S., Pinto V.A. (2017). Auroral oval and outer electron radiation belt. *Physics of Auroral Phenomena*, 40(1), 6-11.
- Antonova E.E., Stepanova M., Kirpichev I.P., Ovchinnikov I.L., Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., et al. (2018a). Structure of magnetospheric current systems and mapping of high latitude magnetospheric regions to the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 177, 103–114. doi:10.1016/j.jastp.2017.10.013
- Antonova E.E., Stepanova M.V., Moya P.S., Pinto V.A., Vovchenko V.V., Ovchinnikov I.L., Sotnikov N.V. (2018b). Processes in auroral oval and outer electron radiation belt. *Earth, Plan. Space*, 70:127. doi:10.1186/s40623-018-0898-1
- Baker D., Elkington S., Li X., Wiltberger M. (2013). Particle acceleration in the inner magnetosphere. *American Geophysical Union*, pp. 73–85. doi:10.1029/155GM09
- Baker D.N., Erickson P.J., Fennell J.F., Foster J.C., Jaynes A.N., Verronen P.T. (2018). Space weather effects in the earth's radiation belts. *Space Sci. Rev.*, 214 (1), 17. doi:10.1007/s11214-017-0452-7
- Boyd A.J., Turner D.L., Reeves G.D., Spence H.E., Baker D.N., Blake J.B. (2018). What causes radiation belt enhancements: A survey of the van allen probes era. *Geophys. Res. Lett.*, 45 (11), 5253–5259. doi:10.1029/2018GL077699
- Foster J.C., Erickson P.J., Omura Y., Baker D.N., Kletzing C.A., Claudepierre S.G., (2017). Van allen probes observations of prompt MeV radiation belt electron acceleration in nonlinear interactions with VLF chorus. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 122 (1), 324–339. doi:10.1002/2016JA023429
- Kirpichev I.P., Yagodkina O.I., Vorobjev V.G., Antonova E.E. (2016). Position of projections of the nightside auroral oval equatorward and poleward edges in the magnetosphere equatorial plane. *Geomagnetism and Aeronomy*, 56, 407–414. doi:10.1134/S001679321604006X
- Kirpichev I.P., Antonova E.E. (2018). Plasma pressure profiles in the dark sector of the Earth's magnetosphere during the magnetic storm of May 29, 2010. *Geomagnetism and Aeronomy*, 58(6), 710-717. doi:10.1134/S0016793218060075
- Moya P.S., Pinto V.A., Sibeck D.G., Kanekal S.G., Baker D.N. (2017). On the effect of geomagnetic storms on relativistic electrons in the outer radiation belt: Van allen probes observations. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 122(11), 11,100–11,108. doi:10.1002/2017JA024735
- Riazantseva M.O., Antonova E.E., Stepanova M.V., Marjin B.V., Rubinshtein I.A., Barinova V.O., Sotnikov N.V. (2018). Relative positions of the polar boundary of the outer electron radiation belt and the equatorial boundary of the auroral oval. *Ann. Geophys.*, 36, 1131–1140. doi:0.5194/angeo-36-1131-2018
- Ripoll J.-F., Claudepierre S.G., Ukhorskiy A.Y., Colpitts C., Li X., Fennell J., Crabtree C. (2020). Particle dynamics in the Earth's radiation belts: Review of current research and open questions. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 125, e2019JA026735. doi:10.1029/2019JA026735
- Shiokawa K., Nosé M., Imajo S., Tanaka Y.-M., Miyoshi Y., Hosokawa K., et al. (2020). Arase observation of the source region of auroral arcs and diffuse auroras in the inner magnetosphere. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 125, e2019JA027310. doi:10.1029/2019JA027310
- Sitnov M.I., Stephens G.K., Tsyganenko N.A., Korth H., Roelof E.C., Brandt P.C., et al. (2020). Reconstruction of extreme geomagnetic storms: Breaking the data paucity curse. *Space Weather*, 18, e2020SW002561. doi:10.1029/2020SW002561
- Sotnikov N.V., Antonova E.E., Ryazantseva M.O., Barinova V.O., Rubinshtein I.A., Mit' S.K. (2019a). Position of the energetic electron trapping boundary relative to auroral oval boundaries during the magnetic storm on December 19–22, 2015, based on data from the Meteor-M2 Satellite. *Geomagnetism and Aeronomy*, 59(2), 136–146. doi:10.1134/S0016793219020142
- Sotnikov N.V., Antonova E.E., Ryazantseva M.O., Ovchinnikov I.L., Rubinshtein I.A., Barinova V.O., Mit' S.K. (2019b). Spectra and pitch-angular distributions of relativistic electrons near the outer radiation belt during the magnetic storm of December 19–22, 2015. *Geomagnetism and Aeronomy*, 59(6), 651–659. doi:10.1134/S0016793219060124
- Sotnikov N.V., Antonova E.E., Ovchinnikov I.L., Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Pulinets M.S. (2021). Formation of the outer radiation belt during geomagnetic storms and the adiabatic mechanism of the rise and fall of relativistic electron fluxes. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 85(3), 309–313. doi:10.3103/S1062873821030278
- Stepanova M., Antonova E.E., Bosqued J.M. (2008). Radial distribution of the inner magnetosphere plasma pressure using low-altitude satellite data during geomagnetic storm: The March 1–8, 1982 event. *Adv. Space Res.*, 41, 1658–1665. doi:10.1016/j.asr.2007.06.002

- Stepanova M., Antonova E.E., Moya P.S., Pinto V.A., Valdivia J.A. (2019). Multisatellite analysis of plasma pressure in the inner magnetosphere during the 1 June 2013 geomagnetic storm. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 124, 1187-1202. doi:10.1029/2018JA025965
- Stepanova M., Pinto V.A., Antonova E.E. (2021). Adiabatic and non-adiabatic evolution of relativistic electrons in the heart of the outer radiation belt during the 1 June 2013 geomagnetic storm, *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 212. doi:0.1016/j.jastp.2020.105479
- Tverskaya L.V., Ivanova T.A., Pavlov N.N., Reizman S.Ya., Rubinstein I.A., Sosnovets E.N., Vedenkin N.N. (2005). Storm-time formation of a relativistic electron belt and some relevant phenomena in other magnetospheric plasma domains. *Adv. Space Res.*, 36, 2392–2400. doi:10.1016/j.asr.2003.09.071
- Tverskaya L.V. (2011). Diagnostics of the magnetosphere based on the outer belt relativistic electrons and penetration of solar protons: A review. *Geomagnetism and Aeronomy*, 51, 6–22. doi10.1134/S0016793211010142
- Tverskoy B.A. (1997). Formation mechanism for the structure of the magnetic storm ring current. *Geomagnetism and Aeronomy (In Russian)*, 37, 555–559.
- Zhao H., Baker D.N., Li X., Jaynes A.N., Kanekal S.G. (2019). The effects of geomagnetic storms and solar wind conditions on the ultrarelativistic electron flux enhancements. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 124 (3), 1948–1965. doi:10.1029/2018JA026257

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.002

SUPERSUBSTORM ON 28 MAY 2011 – GEOMAGNETIC EFFECTS IN THE GLOBAL SCALE

I.V. Despirak¹, N.G. Kleimenova², A.A. Lubchich¹, P.V. Setsko¹, R. Werner³

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia; e-mail: despirak@gmail.com*

²*Schmidt Institute of the Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

³*Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria*

Abstract. For this analysis, we selected the supersubstorm (SSS) occurred during the strong magnetic storm on 28 May 2011 (SYM/H~100 nT). The ground-based magnetic effects of SSS have been studied basing on the data from the global SuperMAG, INTERMAGNET and IMAGE magnetometer networks, as well as on the magnetic measurements by the ionospheric satellite AMPERE system. According to the SML- index behavior, the SSS event maximum was identified at ~09:00 UT on 28 May 2011 (SML= ~-2600 nT). The SSS occurred during the passage of the magnetic cloud in the solar wind. Before the SSS, the B_z component of the Interplanetary Magnetic Field (IMF) was negative, the IMF B_y component was positive, and the local jump in the solar wind dynamic pressure was registered. We found that the SSS developed in the magnetosphere in the global scale. A strong westward electrojet was observed at auroral latitudes from the evening side to the dayside. In contrast to the typical scenario of a classical substorm, a very intense eastward electrojet was detected in the afternoon-evening sector. That may be a result of the formation of an additional partial ring current during the supersubstorm.

Introduction

For the first time the term “supersubstorm” was introduced in the study of very intense magnetic substorms from the data of the SuperMag magnetometers network, the events with high negative values of the SML index (< -2500 nT) were called “supersubstorms” [1]. The SML index is calculated across the network of the SuperMAG stations globally located from 40° to 80° MLat, and therefore contains not only the standard stations of the auroral zone but also many other stations [2]. First studies of supersubstorms were devoted to the investigations of conditions of their appearance. So, the seasonal variations and dependence on the solar activity were considered and was shown that the SSS events can be observed during any phase of the solar cycle, but their highest frequency of the occurrence observed in the declining phase of the solar activity cycle [3]. The following investigations showed that the SSS events are not always associated with very intense storms and can be observed also during less intense (-100 nT \geq Dst > -250 nT) and moderate magnetic storms (-50 nT \geq Dst > -100 nT), and even during non-storm (Dst > -50 nT) intervals [3], [4]. It was shown also that the supersubstorms are observed during the definite solar wind types - magnetic clouds (MC) and SHEATH plasma compression regions ahead of MCs - and practically not observed during another streams and structures of the solar wind [4]. The initial studies of auroral disturbances showed that the development of auroras differs significantly from the classical pattern of substorm development. It is not seen the standard brightening of the equatorial arc in the midnight sector and breakup of auroras. However, there were intense auroras in the pre-midnight and morning sectors of the magnetic local time (MLT) [5]. Note that it will be confirmed later by the analysis of the SSS development on 5 April 2010 [6]. The electrojets development during the supersubstorms has been considered in some works [7], [8], [9]. It was shown that the westward electrojet during two supersubstorms on 8 September 2017 developed on a global scale by the longitude from the prenoon to the afternoon sector surrounding the Earth. The highest intensity of the electrojet was observed at the auroral latitudes in the post-midnight time [7]. Similar spatial features of electrojets were presented in [8] and [9], where we analyzed two supersubstorms during the magnetic storm of March 9, 2012 and one supersubstorm during the magnetic storm of 5 April 2010. It is shown also that the strong eastward current observed from after-noon to evening sector, the occurrence of the intense eastward electrojet supports the hypothesis of the formation of the additional ring current in the evening sector during SSS [10].

Here we analyzed the appearance of one more SSS event observed during the magnetic storms on 28 May 2011. It is one of the few isolated SSS event, which have been observed since 2010. The purpose of this work is to investigate the features of the global spatial distribution of electrojets during this supersubstorm and to verify the assumption about the development of a strong partial ring current during SSS.

Data

For this purpose, the ground-based magnetic data from the SuperMAG, INTERMAGNET and IMAGE networks were combined with the magnetic registrations data of AMPERE satellites and CDAWeb database. The solar wind

and IMF parameters were taken from the CDAWeb database and catalog of large-scale solar wind types <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog>. The IMAGE magnetometer data were taken from <http://space.fmi.fi/image/>. Supersubstorm onset and its development were determined by using the geomagnetic indexes SML, SMR and SMR_LT from <http://supermag.jhuapl.edu/>. The SMR index calculation (as SymH index) is based on the data of the N component with the baseline removed at available (~100 stations) ground magnetometer stations at geomagnetic latitudes between -50 and +50 degrees. Four local time sectors are defined with centers at 00, 06, 12, 18 MLT; the SMR value is $(SMR-00 + SMR-06 + SMR-12 + SMR-18)/4$ [11]. The global spatial distribution of electrojets was determined from the maps of magnetic field vectors obtained on the SuperMAG network, maps of spherical harmonic analysis of the distribution of magnetic vectors in the ionosphere and field-aligned currents obtained from the data of the 66 low-apogee communication satellites Iridium of the AMPERE system (Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment <http://ampere.jhuapl.edu>).

Results

1. Interplanetary and geomagnetic conditions

Solar wind and interplanetary magnetic field (IMF) conditions for period 02-17 UT on 28 May 2011 are shown in the Fig. 1a, from the top to bottom: IMF magnitude (B_T), the IMF Y- and Z- components (B_Y , B_Z), the flow velocity (V), the dynamic pressure (P) and some geomagnetic indexes as the PC, SYM_N/H and SML. It is seen that the features of a coronal mass ejection (CME) are observed in this time period – the SHEATH and magnetic cloud (MC), whose boundaries are marked by the horizontal arrows. The MC contains a long-lasting interval of negative values of the IMF B_Z , which could have caused the development of a strong magnetic storm ($Dst \sim 100$ nT). Against the background of this magnetic storm, at ~08 UT one supersubstorm (SSS) began to develop. The moment of the SSS onset is shown by the vertical redhead line. It can be seen that the SSS was developed at the main phase of the storm, during the magnetic cloud (MC). Ahead of the SSS, a local pressure jump was observed; the IMF B_Z was negative, the IMF B_Y was positive, the PC- index has grown very strongly, which indicated a very large supply of energy from the solar wind.

To describe the global development of the magnetic supersubstorm, we applied the geomagnetic ring current index (SMR), separated by the MLT sectors (SMR_LT), which is shown in Fig. 1b. The SML and MPB indices are shown for comparison. Besides, the MPB index representing the power of midlatitude positive magnetic bays was calculated only for the midlatitude station Panagyurishte (PAG). It is seen that during the supersubstorm, there was a strong enhancement of the ring current in the evening sector (violet curve), i.e., the strong current asymmetry appeared. We suppose that it was due to the additional partial ring current development. It can also be seen that a strong increase in the horizontal power was observed at Panagyurishte station; the power value was comparable in magnitude to those observed during substorms [12].

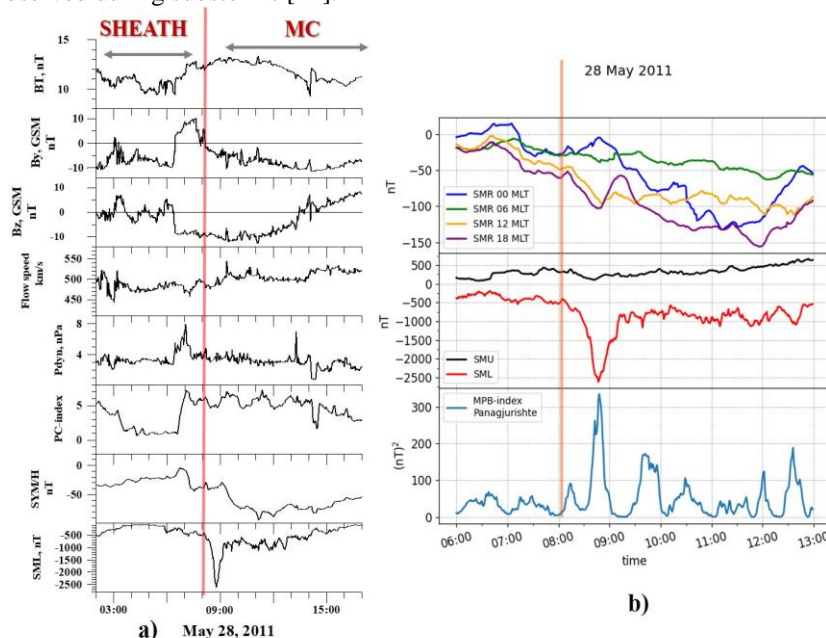


Figure 1. Variations of the solar wind and IMF parameters (B_T , B_Y , B_Z , V , P_{dyn}) and some geomagnetic indexes (PC, SYM/H, SML) from 02 to 17 UT on 28 May 2011 (a) and additional geomagnetic indexes (SMR_LT, SMU, SML) and horizontal power of midlatitude positive bays (MPB) on the Panagyurishte station from 06 to 13 UT on 28 May 2011 (b). The boundaries of the solar wind types are marked by the horizontal arrows and inscriptions: SHEATH and MC. The moment of the SSS onset is shown by the vertical redhead line.

2. Geomagnetic observations

Ground-based magnetic disturbances during SSS are shown in Fig. 2. At the top panel, the global maps of magnetic field vectors by SuperMag data there are shown for 3-time moments, from the onset to the maximal SSS development (Fig.2a). It is seen that strong disturbances were observed over Alaska, very intense negative magnetic bays started at ~ 08:30 UT; the intensity of the negative bays was ~ -1300-2500 nT (Fig.2b). The positive magnetic bays with the intensity of ~ 70-250 nT were registered at East Siberian and Kamchatka stations (YAK, MGD, PET). So, the westward electrojet during the SSS developed in the global scale (from before midnight, through the night and morning, and into the day sector). Besides, the strong eastward electrojet was observed in the evening sector.

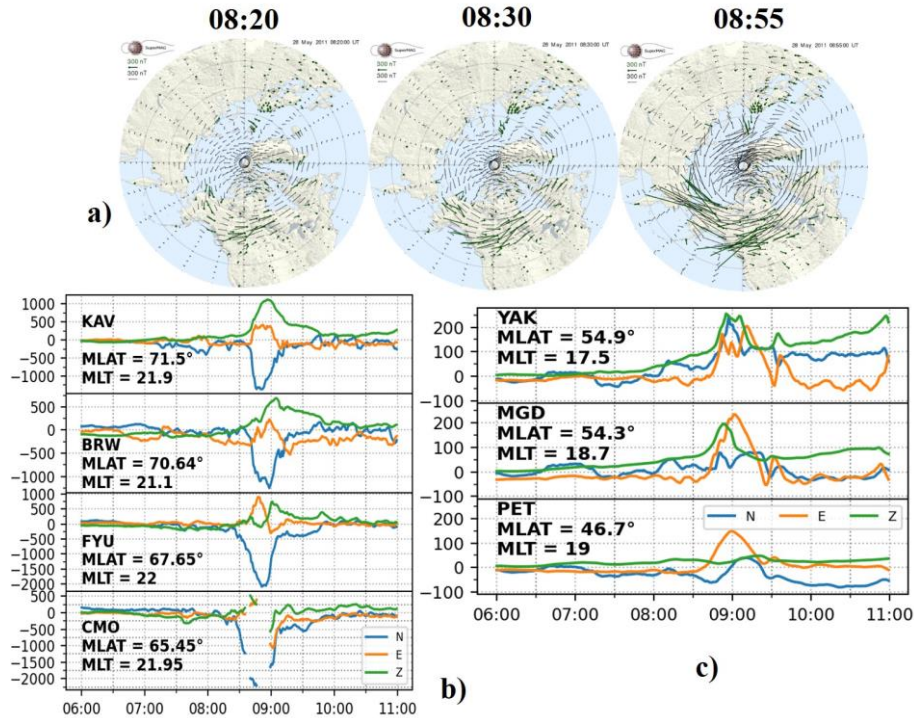


Figure 2. Global maps of the spatial distribution of magnetic field vectors from the SuperMAG network at 08:20, 08:30 and 08:55 UT (a); magnetograms of some stations on Alaska (b) and on Siberian (c) from 06 to 11 UT on 28 May 2011.

3. Field-aligned currents from AMPERE observations and models of SCW

Two panels of the AMPERE maps on 28 May 2011 for different time (at ~ 08:30 UT and ~ 08:55 UT) are shown in Figure 3a. The AMPERE project represents the results of the magnetic registrations by the 66 satellites at 700 km altitude, its spherical harmonic analysis (the middle map) and calculated Field Aligned Currents (FAC) distribution. The upward currents mark by red, the downward ones – by blue. Note, that the westward current was located between the upward (red) and downward (blue) FAC; the eastward electrojet was located between downward (blue) and upward (red) currents. It is seen the global longitude expansion of the westward electrojet - from the evening side at auroral latitudes to the day side of the polar area. The AMPERE maps demonstrate also very strong enhancement of the eastward electrojet in the afternoon-evening sector and its shift to the lower latitudes.

It should be noted that the occurrence of the strong eastward electrojet in the evening sector supports the hypothesis of the formation of the additional ring current in the evening sector during SSS [11]. Zong *et al.* [2021] proposed, that substorm current wedge (SCW) for supersubstorms differs significantly from the classical pattern of SCW development. Two SCW models are presented in Figure 3b (taken from [11]), left panel shows the SCW model for “classical” substorm, the right panel - for a supersubstorm. It is seen, that during SSS on 28 May 2011, the very intense eastward electrojet in the evening sector was detected. In contrast to the typical scenario of the classical substorm, it may be the result of the formation of an additional partial ring current during the supersubstorm.

Conclusions

1) We found that during the SSS of May 28, 2011, a strong westward electrojet was observed in the evening and night sectors globally - from the evening side at auroral latitudes to the dayside of the Earth.

2) During this SSS, an intense eastward electrojet in the evening sector was detected as well. We support that it could be a result of the formation of an additional partial ring current occurred during a supersubstorm.

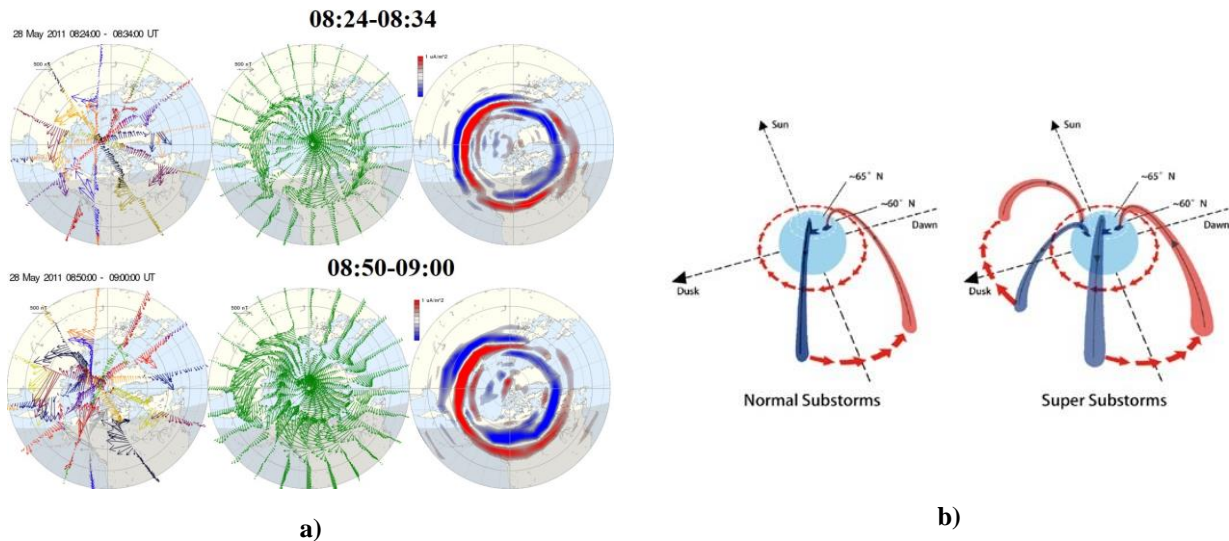


Figure 3. Distribution of magnetic disturbance vectors, their spherical harmonic analysis and field-aligned current distribution for two moments (at ~ 08:30 UT and ~ 08:55 UT) on May 28, 2011 according to AMPERE data (a); models of substorm current wedge (SCW) for normal substorm and for supersubstorm (b).

Acknowledgements

The authors are grateful to the creators of the OMNI databases (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>), SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>) and AMPERE (<http://ampere.jhuapl.edu>) for the ability to use them in our work. The work of I.V. Despirak, N.G. Kleimenova, A.A. Lubchich, P.V. Setsko. was carried out within the framework of the RFBR grant No. 20-55-18003_Bulg_a; R. Werner's work was carried out within the framework of the project of the National Science Foundation of Bulgaria (project No. KP-06Rusia / 15).

References

1. Tsurutani B.T., Hajra R., Echer E., Gjerloev J.W. (2015). Extremely intense ($SML \leq -2500$ nT) substorms: isolated events that are externally triggered? *Ann. Geophys.*, 33, 519–524.
2. Gjerloev J.W. (2012). The SuperMAG data processing technique. *J. Geophys. Res.*, 117(A9), A09213. <https://doi.org/10.1029/2012JA017683>
3. Hajra R., Tsurutani B.T., Echer E., Gonzalez W.D., Gjerloev J.W. (2016). Supersubstorms ($SML < -2500$ nT): Magnetic storm and solar cycle dependences. *J. Geophys. Res. Space Physics.*, 121, 7805–7816. doi:10.1002/2015JA021835
4. Despirak I.V., Lyubchich A.A., Kleimenova N.G. (2019). Supersubstorms and conditions in the solar wind. *Geomag. Aeron.*, 59, no. 2, 170-176.
5. Hajra R., Tsurutani B.T. (2018). Interplanetary shocks inducing magnetospheric supersubstorms ($SML < -2500$ nT): Unusual auroral morphologies and energy flow. *Astrophys. J.*, 858, no. 2, id 123. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabaed>
6. Nishimura Y., Lyons L.R., Gabrielse C., Sivadas N., Donovan E.F., Varney R.H., Angelopoulos V., Weygand J.M., Conde M.G., Zhang S.R. (2020). Extreme magnetosphere-ionosphere-thermosphere responses to the 5 April 2010 supersubstorm. *J. Geophys. Res.*, 125, no. 4. <https://doi.org/10.1029/2019JA027654>
7. Despirak I.V., Kleimenova N.G., Gromova L.I., Gromov S.V., Malysheva L.M. (2020). Supersubstorms during storms of September 7–8, 2017. *Geomag. Aeron.*, 60, no. 3, 308-317.
8. Despirak I.V., Lubchich A.A., Kleimenova N.G., Gromova L.I., Gromov S.V., Malysheva L.M. (2021). Longitude geomagnetic effects of the supersubstorms during the magnetic storm of March 9, 2012. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.*, 85, no. 3, 246–251.
9. Despirak I.V., Kleimenova N.G., Gromova L.I., Lubchich A.A., Guineva V., Setsko P.V. Spatial features of supersubstorm in the main phase of the magnetic storm on 5 April 2010. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2022 (in press)
10. Zong Q.-G., Yue C., Fu S.-Y. (2021). Shock induced strong substorms and super substorms: Preconditions and associated oxygen ion dynamics. *Space Science Review*, 217. <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00806-x>
11. Newell P.T., Gjerloev J.W. (2011). Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 116, no. A12, A12211.
12. Werner R., Guineva V., Atanassov A., Bojilova R., Raykova L., Valev D., Lubchich A., Despirak I. Calculation of the horizontal power perturbations of the Earth surface magnetic field. *Proceedings of the Thirteenth Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere"*, Primorsko, Bulgaria, 13-17 September, 2021 (in press).

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.003

OBSERVATIONS OF SUBSTORM ACTIVITY FROM THE DATA OF MAIN CAMERA SYSTEM AND THD SATELLITE IN THE PLASMA SHEET

I.V. Despirak, T.V. Kozelova, B.V. Kozelov, A.A. Lubchich

Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia; e-mail: despirak@gmail.com

Abstract. We investigated an interesting case of the space-time dynamics of substorm activations ($AL \sim 800$ nT) on December 24, 2014, when there were simultaneous observations on the THEMIS D satellite in the plasma sheet ($|X| \sim 6.2 R_E$) and ground-based observations on the Kola Peninsula. The development of the substorm activity in the interval of $\sim 19:00$ to $\sim 20:00$ UT was considered. In this interval, at Lovozero station (LOZ), three peaks in the Pi1B pulsations were recorded, associated with the brightening of arcs near LOZ. The first peak was observed in connection with the appearance of beads structures in the auroras along the growth phase arc to the south from LOZ latitude. The second and third peaks in Pi1B pulsations were associated with the expansion phase, when three dipolarization fronts (DFs) were registered according THD data. DFs and injection of energetic electrons into the magnetosphere were observed near the moments of sudden intensification of auroras: brightening of arcs, breakup in aurora. Besides, it was shown that the development of substorm occurs near the Harang discontinuity (HD) according to the IMAGE magnetometers data. In this case, we can follow the development of aurora around the HD according to the data of the all sky camera in Apatity. It was shown that the pre-onset auroral forms were moved accordingly the two-cell ionospheric convection developed during the growth phase of the substorm.

Introduction

Despite a large number of studies, there is significant uncertainty regarding the space-time relations between the magnetosphere and the ionosphere during substorm expansions. Therefore, further research is needed using combined satellite and terrestrial data. For this purpose, one interesting event were chosen, on 24 December 2014, when simultaneous observations of the THEMIS satellites (THE and THD), the ground-based observations of aurora in Apatity and magnetic disturbances on the IMAGE magnetometers network and Russian Siberian stations (Dixon, Tiksi and Amderma) were available. Note, that the initial case of substorm activity in this day, during interval from $\sim 16:00$ to $\sim 17:00$ UT, was considered in our previous work [1]. During time interval from 14:30 to 20:50 UT on 24 December 2014, THE and THD satellites were located in the midnight sector of the magnetosphere and crossed over Siberia and Kola Peninsula. Figure 1 shown the geographic map with projections of the THD (red line) and THE (blue line) and the locations of magnetic stations. The first case of substorm activity ($\sim 16 \sim 17$ UT) marked by a blue oval and inscription "1)"; the second case (19- 20 UT), marked as "2)".

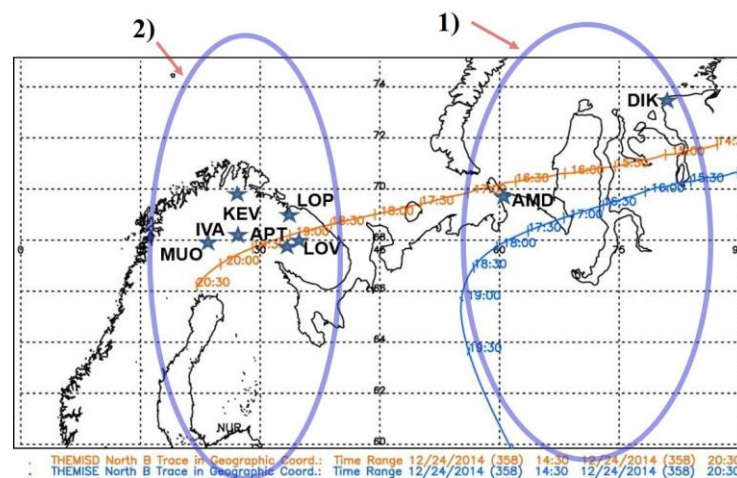


Figure 1. Projections of the THD (red line) and THE (blue line) from 14:30 to 20:50 UT on 24 December 2014. The locations of magnetic stations are marked by stars, the time intervals under study - by blue ovals.

It was shown, that the onset of disturbances was in the ionosphere near Amderma (~ 16:35 UT) and several substorm precursors were observed in aurora development over Apatity - small localized auroral arc, which propagated westward, so-called beads structure in the auroras and the auroral horns [2], [3].

In this work, we considered substorm activity from ~ 19: 00 to 20:00 UT, when THD was at a distance $|X| \sim 6.2 R_E$ in the plasma sheet, and its projection crossed the Kola Peninsula. Aurora activity was observed by the MAIN camera system in Apatity, magnetic disturbances were recorded by magnetometers of the IMAGE network, Pi1B pulsations were registered by Lovozero observatory (LOZ). It is interesting event, when the development of substorm injection occurs near the Harang discontinuity (HD).

Data

For our analysis we used complex ground-based data: the auroras observations on MAIN cameras in Apatity (APT), the magnetic disturbances at IMAGE magnetometers network and the geomagnetic pulsations in Lovozero and also the variations of the fields and particle fluxes from THEMIS satellites (THD). To study the substorm development, we used the keograms and the selected full-frame images from the Apatity all-sky camera (APT, 67°34N; 33°24E). The camera specifications, their mutual location and the measurement process are described in detail in [4]. Geomagnetic disturbances were observed by analyzing the data of the IMAGE magnetometers network (<http://space.fmi.fi/image/>). Geomagnetic pulsations were observed by data from the induction magnetometer located in Lovozero. The data used here are the spectrograms in frequency range from 0.01 to 16 Hz, where the whole spectrum of natural pulsations Pi1B is well seen, if their existed. The variations of fields and particles in the magnetosphere were studied by THD data. During the time period from 19:00-20:00 UT the THD was located at $r \sim 8.9-6.1 R_E$, in the midnight sector: in 19:30 UT GSM coordinates were (-6.2; 4.1; -1.05) R_E .

Results

1. Development of disturbances from satellite data

The data of FGM, EFI, SST, MOM instruments of the THD satellite are shown in the Figure 2a. It is seen that four dipolarization fronts (DF) were registered by THD data ($DF_1 = 19:18$; $DF_2 = 19:37$; $DF_3 = 19:45$, $DF_4 = 19:54$ UT). DFs were determined by sudden jumps of the magnitude and B_z component of the magnetic field, the strong variations in the electric field, the growth of the plasma velocity and the increasing of ion and electron fluxes (e.g. [5]). Four vertical black lines marked the DFs moments. As will be shown below, DF_1 was observed during the growth phase of the substorm, the last three dipolization fronts were associated with the development of the expansion phase of the substorm and connected with brightening of arcs near the THD projection.

In the Figure 2b shown the Pi1B pulsations (the period $\tau = 0.2-15$ sec) observed in Lovozero. Note, that these pulsations are associated with substorm expansion phase and correlated with precipitations of auroral electrons [6]. Three peaks of Pi1B pulsations were recorded in Lovozero: 19:22 - 19:25, 19:34 - 19:37 and 19:46 - 19:49 UT. The first peak was observed in connection with the appearance of beads at the growth phase arc located south of LOZ latitude. The second and third peaks were associated with the expansion phase of the substorm.

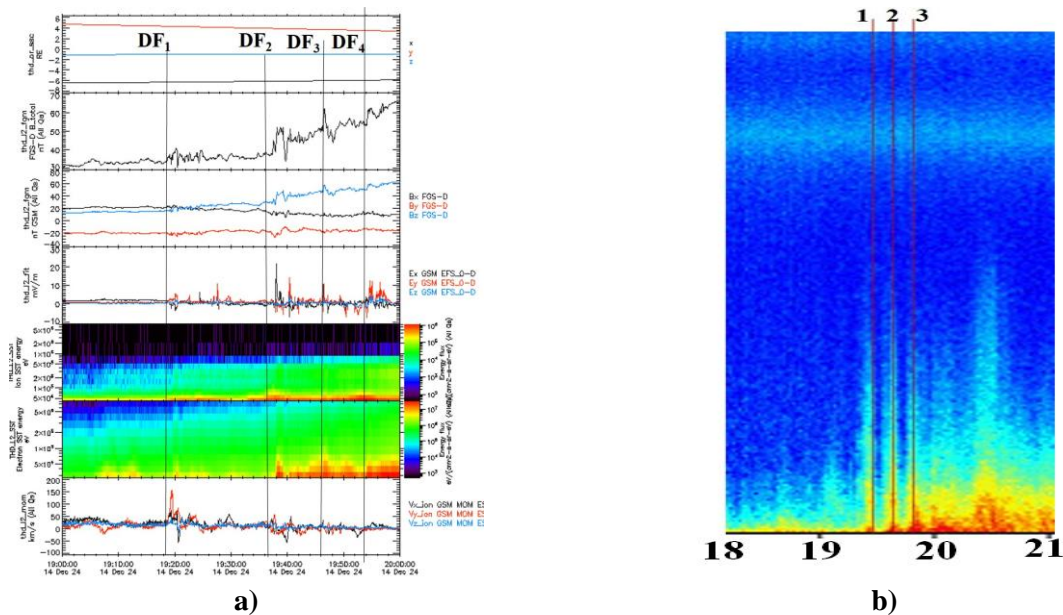


Figure 2. Data of FGM, EFI, SST, MOM instruments of THD from 19:00 to 20:00 UT (a) and geomagnetic pulsations at Lovozero from 18 to 21 UT on 24 December 2014 (b). Moments of four dipolarization fronts (DF) marked by vertical black lines (a), moments of three peaks in Pi1B pulsations – by red vertical lines (b).

2. Aurora observations

Auroral activity captured by all-sky camera at the station Apatity (APT) is presented in Figure 3. Left three panels of Figure 3 illustrate the temporal dynamics of the camera field of view as keogram: top panels - the keograms filtered by the horizontal-time difference and by the vertical-spatial difference; bottom panel - non-filtered keogram for interval 19:30 - 20:00 UT. Some selected images of all-sky camera are shown in Figure 3b. During growth phase of substorm were registered "beads" in aurora ~ from 19:18 UT, which are visible both on the arc near the zenith and on the southern arc (picture not presented here). At this time, THD registered the first dipolarization front (DF_1) and there were some weak disturbances in the ground-based magnetograms (Figure 4a). Note, that the first peak in Pi1B pulsations at Lovozero was recorded a little later (~ 19:22 UT), when the auroras approached to LOZ latitude. At the end of the growth phase (~ 19:31:50 UT) a brightening of the most equatorial from all arcs was observed. Then on the arc, azimuthally spaced auroral folds are formed, moving from East to the West. This corresponds to the first phase of the breakup (or pseudo-breakup). At ~ 19:33:50 UT, the equatorial arc again became brighter, ~ 19:34 UT rapidly expand to the pole. This moment concerns to the onset of the second peak in Pi1B pulsations in LOZ. At ~ 19:37 UT (the maximum of second peak of Pi1B pulsations) an N-S arc occurred, then this arc moves equatorward and reaches E-W aligned arcs.

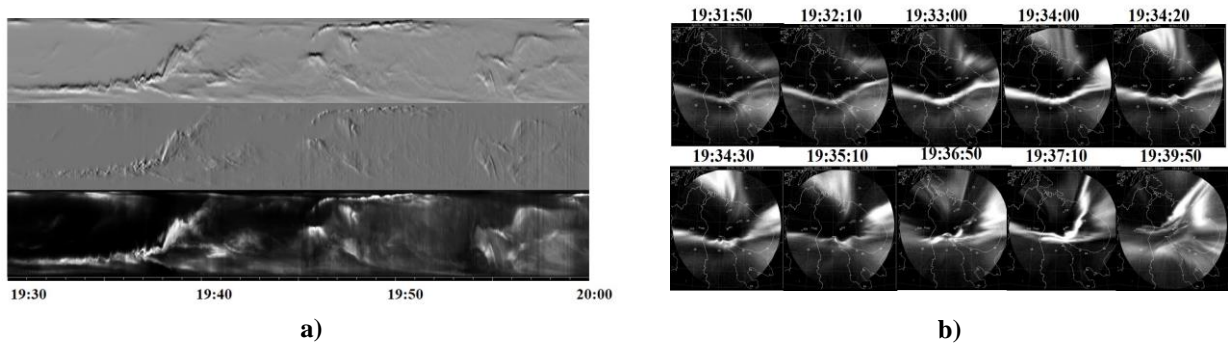


Figure 3. Data of all-sky camera at the Apatity: a) keograms for time period from 19:30 to 20:00 UT: filtered (top panels) and non-filtered (bottom panel) keograms for 19:30-20:00 UT (a) and some images of all-sky camera for period 19:31:50-19:39:50 UT (b).

3. Ground-based magnetic observations

Figure 4 shown variations of X-component of geomagnetic field by IMAGE network data. Vertical red lines corresponded to 3 moments of dipolarization fronts (DF_1 , DF_2 , DF_3) registered by THD satellite, solid line DF_2 marked also the onset of expansion phase. It is seen that near DF_2 moment were observed two different regions containing positive magnetic bays and negative magnetic bays, which marked also as red and blue ovals in the Figure 4b. So, accordingly IMAGE magnetometers observations, the development of substorm occurs near the Harang flow shear.

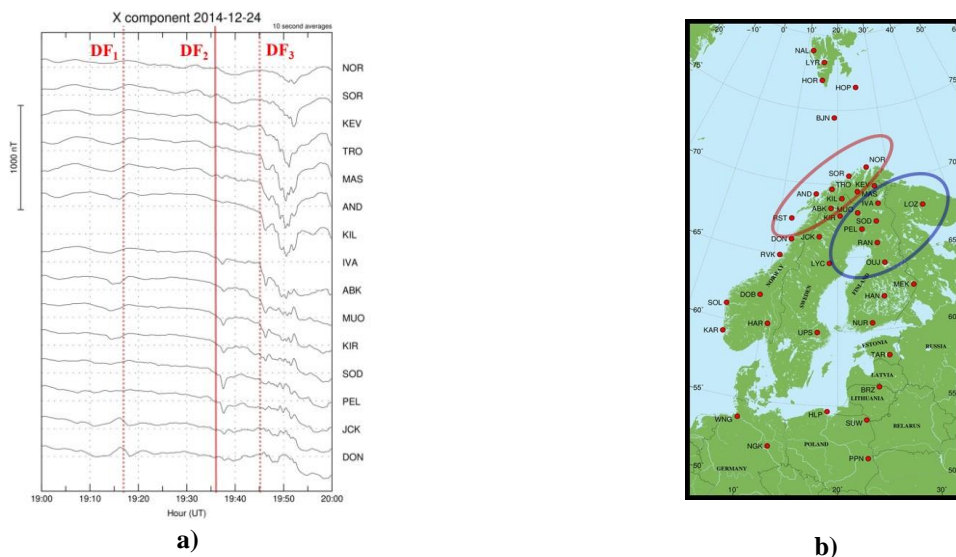


Figure 4. X- component of geomagnetic field from IMAGE magnetometers, the DF s moments are marked by red vertical line (a); the map of locations of IMAGE magnetometers, red and blue ovals marked the region of positive and negative bays accordingly (b).

Discussion

Crossing the Harang discontinuity (HD) by the earth's rotation, magnetometer observations detect a change in magnetic perturbations from that dominated by the eastward electrojet to that dominated by the westward electrojet [7]. In terms of convection flows, flow vectors rotate clockwise from higher to lower latitudes. This configuration is referred to the Harang reversal (HR) in reference to the plasma convection pattern from eastward flow reversing to westward flow with decreasing magnetic latitude [8]. Schematic illustration of motion of pre-onset auroral forms and their relation to nightside ionospheric convection presented in Figure 5 (the picture taken from [9]). The pink star, NS-oriented pink line, and azimuthally extended wavy lines indicate a PBI, NS-oriented arc and onset arcs, respectively. Blue arrows illustrate the plasma flow pattern inferred from pre-onset auroral motion. Numbers 1–5 show time evolution of pre-onset aurora.

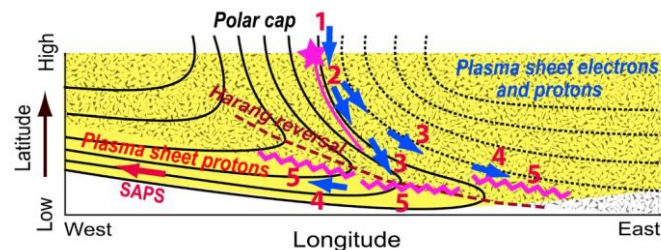


Figure 5. Schematic illustration of motion of pre-onset auroral forms near the Harang discontinuity and their relation to nightside ionospheric convection. The Figure was taken from [9].

Conclusions

Analysis of substorm activity using THD satellite data on $|X| \sim 6.2 R_E$ and ground-based data led to the following results:

- 1) The fronts of dipolarization and injection of energetic electrons into the magnetosphere were observed near the moments of sudden intensification of auroras: brightening of arcs, breakup in aurora;
- 2) According to the magnetometers data, the development of substorm occurs near the Harang discontinuity;
- 3) The development of aurora was organized according to the preceding two-vortex pattern of ionospheric convection observed in the growth phase around the Harang discontinuity.

Acknowledgments

Ground-based magnetometers data were taken from IMAGE network: <https://space.fmi.fi/image/>. We are grateful to staff of Lovozero observatory of Polar Geophysical Institute for data of ground-based observations. THEMIS satellites data were taken from NASA CDAWeb <https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval1.cgi>. We are grateful the heads of the experiments conducted with these instruments. The work was carried out within the framework of the State assignment for Polar Geophysical Institute (PGI).

References

1. Despirak I.V., Kozelova T.V., Kozelov B.V., Lubchich A.A. (2020). Westward propagation of substorm by THEMIS and ground-based observations, *JASTP*, 206, № 105325. doi:10.1016/j.jastp.2020.105325
2. Koskinen H.E.J., Lopez R.E., Pellinen R.J., Pulkkinen T.I., Baker D.N., Bösinger T. (1993). Pseudobreakup and substorm growth-phase in the ionosphere and magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 98, 5801–5813.
3. Kornilov I.A., Kornilova T.A., Golovchanskaya I.V. (2015). On the physical nature of auroral breakup precursors as observed in an event on 5 March 2008, *Geomagn. Aeron.*, 55(2), 210–218. doi:10.1134/S0016793215020103
4. Kozelov B.V., Pilgaev S.V., Borovkov L.P., Yurov V.E. (2012). Multi-scale auroral observations in Apatity: winter 2010–2011, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 1, 1–6, doi:10.5194/gi-1-1-2012
5. Kozelova T.V., Kozelov B.V. (2013). Substorm-associated explosive magnetic field stretching near the earthward edge of the plasma sheet, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 118(6), 3323–3335. doi:10.1002/jgra.50344
6. Olson J.V. (1999). Pi2 pulsations and substorm onsets: A review, *J. Geophys. Res.*, 104(8), 17499–17520.
7. Harang L. (1946). The mean field of disturbance of polar geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 51(3), 353. doi:10.1029/te051i003p00353
8. Zou S., Lyons L.R., Nicolls M.J., Heinselman C.J., Mende S.B. (2009). Nightside ionospheric electrodynamics associated with substorms: PFISR and THEMIS ASI observations, *J. Geophys. Res.*, 114, A12301. <https://doi.org/10.1029/2009JA014259>
9. Nishimura Y., Lyons L., Zou S., Angelopoulos V., Mende S. (2010). Substorm triggering by new plasma intrusion: THEMIS all-sky imager observations, *J. Geophys. Res.*, 115, A07222. doi:10.1029/2009JA015166

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.004

GICS IN THE MAIN TRANSMISSION LINE "NORTHERN TRANSIT" IN RUSSIA AND IN THE MÄNTSÄLÄ FINLAND PIPELINE: A CASE STUDY

I.V. Despirak¹, P.V. Setsko¹, Ya.A. Sakharov¹, V.N. Selivanov²

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia; e-mail: despirak@gmail.com*

²*Northern Energetic Research Center, Kola Scientific Centre RAS, Apatity, Russia*

Abstract. Geomagnetically induced currents (GICs), arising both on power lines and on pipelines, may have strong negative impact on the technological networks up to accidents ("blackouts"). Magnetospheric disturbances are one of the factors in the appearance of GICs, however there is no unambiguous relationship between substorm and presence of currents. In this paper, we consider two intense cases of GIC (15 March 2012 and 17 March 2013), registered on two different technological networks: 1) on the "Northern Transit" power line (Vykhodnoy, Revda and Kondopoga stations) located in the auroral zone, 2) on the Finnish natural gas pipeline near Mäntsälä located in the subauroral zone. Both GIC cases are compared with substorm development in the auroral zone, using data from IMAGE magnetometers network and MAIN camera system in Apatity. We found a good correlation between the GIC appearance and variations of geomagnetic indexes: IL – index, which characterized of westward electrojet intensity on the IMAGE meridian and Wp - index, which describes the wave activity of the substorm. Besides, it was shown also a good correlation between GICs and the thin spatio-temporal structure of the substorm development (the appearance and the propagation to the pole of substorm activations), which is appeared both in the magnetic data and in the all sky camera images.

Introduction

Space weather generally refers to the physical conditions in the Sun-Earth system that can affect the performance of ground-based technological systems. During geomagnetic disturbances (storms, substorms, supersubstorms, magnetic pulsations) very strong ionospheric currents can develop, which may lead to substantial interruptions in terrestrial electrical networks ([1], [2], [3], [4]). Rapid changes of the geomagnetic fields cause geoelectric fields which can produce intense, low-frequency, quasi-direct currents, co-called geomagnetically induced current (GIC) in the ground and electrical power systems [5]. The GIC intensity depends both on the intensity of magnetic disturbances during geomagnetic storms or substorms, and on the configuration of the system, ground conductivity, coastal effects, etc. [6].

It was shown that geomagnetic field disturbances associated with magnetic storms and substorms are known as the key factor for the generation of GICs. Recently by study of intense GICs (> 30 A) during 21 years (1999 through 2019) at the Mäntsälä, Finland (57.9° magnetic latitude) gas pipeline was shown that the most frequent (76%) cause of all of these GIC events are auroral electrojet intensifications during supersubstorm (SSS: $SML < -2500$ nT) and intense substorm (-2500 nT $< SML < -2000$ nT) [4]. Therefore, probably, strongest GIC events are recorded in the high geomagnetic latitude zone, where usually registered the large amplitudes of magnetic disturbances associated with the increasing and the motion of auroral electrojets.

On the other hand, an important part of the task of protecting against the negative effects of space weather is the monitoring of disturbances in the geomagnetic field and registration of the development of GICs in real power systems. So, within the framework of the EURISGIC scientific program, the system of continuous registration of the GIT was created at a number of transformer substations of the power line located on the Kola Peninsula [7]. It should be noted that system "Northern Transit" is located precisely in the auroral latitudes, where substorms are usually observed.

The purpose of our work is the study of the connection between the development of a supersubstorms [8] and intense substorms and the appearance of geomagnetically induced currents (GICs). For observations of GICs appearance on the different latitudes used data from the system "Northern Transit" and from the Mäntsälä, Finland gas pipeline. Using these systems, we could trace the GIC appearance from st. Mäntsälä, Finland to st. Vykhodnoy, Russia, from 57.9 to 64.9 degrees of geomagnetic latitude and could compare their appearance with the space-time development of the substorms, with substorm expansion to the pole.

We selected cases where the GICs on the st. Mäntsälä exceeded 30 A, and there were observations along the "Northern Transit" chain. In this article, we consider two events of intense GICs (March 15, 2012 and March 17, 2013) recorded in two different technological networks during the observation of the substorm on the Scandinavian meridian.

Data

Geomagnetically induced currents (GICs) were registered by two different technological networks:

- 1) on the "Northern Transit" power line located in the auroral zone, on Vykhodnoy (68.8°N and 33.1°E geographic), Revda (67.9°N and 34.1°E geographic) and Kondopoga (62.2°N and 34.3°E geographic) stations.
- 2) on the Finnish natural gas pipeline near Mäntsälä, located in the subauroral zone (57.9°N geomagnetic).

Fig. 1 shows location of the points of registration of the GIC and the location of magnetometers.



Figure 1. The layout of the measuring devices: red circles - the registration of the GIC, blue circles - the location of magnetometers.

Substorm development was determined both by magnetograms from global networks: IMAGE magnetometers network <http://space.fmi.fi/image/> and the SuperMAG network <http://supermag.jhuapl.edu/> [8] and by geomagnetic IL- and Wp-indexes. The Wp (wave and planetary) index is related to the power of the Pi2 pulsation wave at low latitudes [9], and the IL index shows the variation of the magnetic field at the selected IMAGE stations, that is, in essence, it is similar to the AL index, which is associated with the auroral electrojet [10]. The global spatial distribution of electrojets was determined from the maps of magnetic field vectors obtained on the SuperMAG network. The active auroras were observed by Multiscale Aurora Imaging Network (MAIN), by all-sky camera located in Apatity (<http://aurora.pgia.ru>). The solar wind and IMF parameters are taken from 1-minute OMNI data (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/>) and the catalog of large-scale solar wind phenomena (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>).

Results

1. First event on 15 March 2012

In the period on 7-17 March 2012, solar wind and interplanetary magnetic field (IMF) conditions were very complicated, it is one of the most disturbed periods during the ascending phase of Solar Cycle 24. Four consecutive magnetic storms were developed, occurred on 7, 9, 12, and 15 March, respectively [11]. Very intense GIC (~30 A) was recorded on Mäntsälä station at ~ 17 UT during the fourth storm (S4) (SYM/H = -80 nT) and may be associated with a solar wind spike of density [4]. In Figure 2a shown the GIC registrations on st. Mäntsälä and on Northern Transit station (Vykhidnoy, Revda, Kondopoga) from 14 to 18 UT on 15 March 2012. It is seen, that small GICs were registered at ~15 UT on both networks, then at ~17 UT were observed very intense GIC on st. Mäntsälä (~39 A) and intense GIC at st. Vykhidnoy (~18A), at that moment GIC were also registered at st. Revda (~2A) and st. Kondopoga (~7A). According to IMAGE magnetometers data, the substorm occurred at ~17 UT on Nurmijarvi (NUR) and propagated to the NyAlesund (NAL) (Fig. 2b). At the same time substorm development from subauroral to high latitudes has a good agreement with appearance of GICs both on Northern Transit stations and on st. Mäntsälä station. It is seen also that these GICs also have a good correlation with two geomagnetic indexes: Wp and IL (top panels of Fig. 2a). Three maps of SuperMAG magnetometer vectors (Fig. 2c) demonstrated that it was isolated substorm and disturbances occurred precisely over Kola Peninsula, where all our GICs detectors are located. Note, at the Fig.2b are schematically marked the two time moments of solar wind shock wave and spike of density. At the moment of the shock wave arrival, the disturbances were observed only at high latitudes stations and the GICs were not intense (>10 A). While the intense substorm and GICs developed after the density jump in the solar wind.

2. Second event on 17 March 2013

On 17.03.2013 a CME passed by the Earth, which included two intervals of the negative Bz IMF observed during SHEATH and during the magnetic cloud (MC), and a two-stage magnetic storm with Dst ~ -140 nT was developed. GICs registrations on st. Mäntsälä and on Northern Transit stations from 15 to 21 UT on 15 March 2012 are presented in Fig.3a. The shock wave coming led to the development of a small substorm at high latitudes ~ 15:50 UT (Fig 3b), which manifested itself in the appearance of intense GIT on Vykhodnoy (~27 A) and small GITs on Revda (~3 A), Kondopoga (~4 A), on Mäntsälä (~12 A) stations.

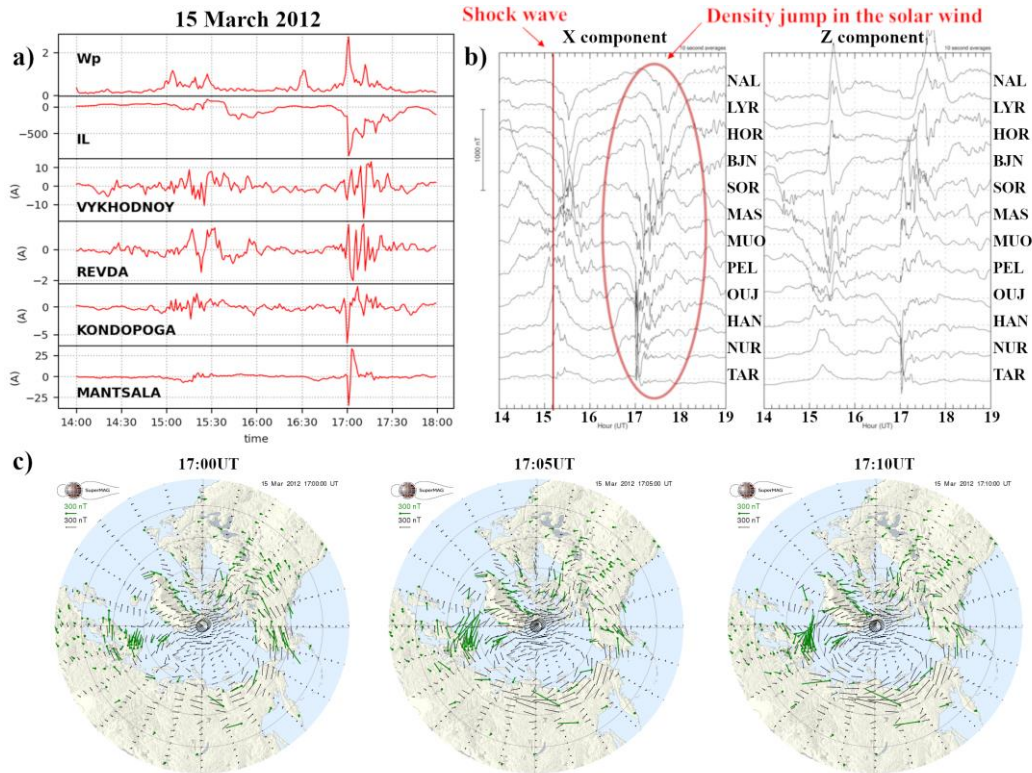


Figure 2. First event on March 15, 2012: GIC registration on Mäntsälä station and on Northern Transit stations (a); X- and Z- components of geomagnetic field from IMAGE magnetometers (chain TAR-NAL), red oval shows the substorm for the study (b); three maps of magnetic vectors from SuperMAG network (c).

As seen from Fig.3b, at ~18 UT, the second more intense substorm began, which consisted from three intensifications (18:00 UT, 18:20 UT, 18:40 UT) - three negative bays at the low-latitudinal IMAGE stations and, as a result, the GICs appeared at the on Mäntsälä (~32 A), Kondopoga (~11 A) and Revda (~2 A) stations. The second and third intensifications are detected on keogram from all-sky-camera in Apatity (red vertical lines) (Fig. 3.c) as well as on magnetic vector maps SuperMAG (Fig. 3.d).

On Vykhodnoy GIC data, we see the spike (~27 A) at ~19.30 UT that a little bit later than second substorm happen, this spike occurs due to the third substorm. Third substorm are marked by third red oval on magnetometers data from IMAGE stations (Fig 3b). This substorm disturbance propagated from OUL to SOR stations, where station Vykhodnoy located.

It is seen a good correlation between GICs appearance and behavior of IL- and W_P- indexes (Fig 3a). But it should be noted, that in the W_P index profile seen only two substorms, it's related to the nature of this index – it's calculated on low latitudinal and equatorial magnetometer stations, when IL index calculated on high latitudinal magnetometer stations so all three substorm seen in its profile.

Conclusions

- 1) It is shown a good correlation between the GIC appearance and increasing of geomagnetic indexes: IL – index (westward electrojet intensity on the IMAGE meridian) and W_P – index (the wave activity of the substorm).
- 2) It was possible to trace the development of GICs on the meridional profile (from Mäntsälä to Vykhodnoy) in accordance with the thin spatial - temporal structure of the substorm (the appearance and the propagation to the pole of three substorm activations).

Aknowlegments

The authors are grateful to the creators of the OMNI databases (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>), SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>), AMPERE (<http://ampere.jhuapl.edu>) and Northern Transit GICs system (<https://eurisgic.org/>) for the ability to use them in our work. Mäntsälä GIC data as well as Il-index are taken from (<https://space.fmi.fi/image/>), Wp-index are taken from (<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/>). The work of I.V. Despirak and P.V. Setsko carried out within the framework of the RFBR grant No. 20-55-18003_Bulg_a.

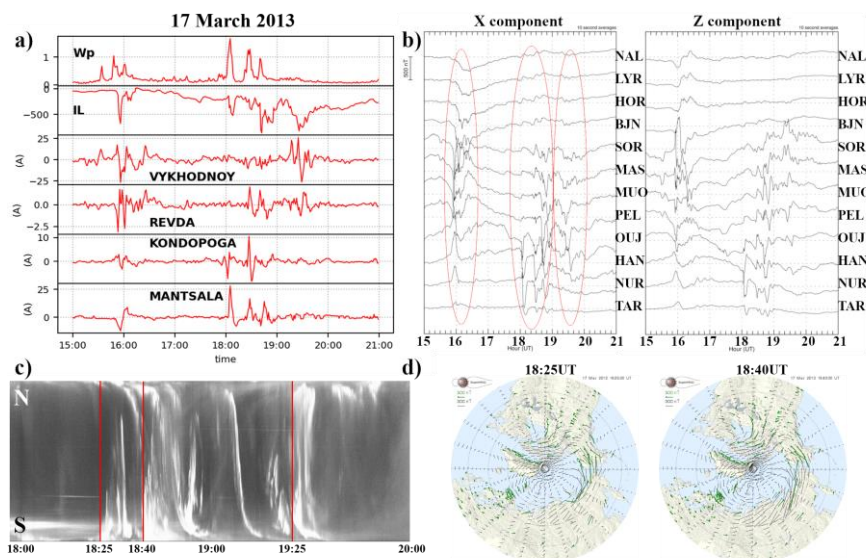


Figure 3. Second event on March 17, 2013: GIC registration on Mäntsälä station and on Northern Transit stations (a); X- and Z- components of geomagnetic field from IMAGE magnetometers (chain TAR-NAL), red oval shows the substorms for the study (b); the keogram of all-sky camera in Apatity from 18 to 20 UT (c); maps of magnetic vectors from SuperMag network (d).

References

- Pulkkinen A., Lindahl S., Viljanen A., Pirjola R. (2005). Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system. *Space Weather* 3: S08C03. <https://doi.org/10.1029/2004SW000123>
- Viljanen A., Tanskanen E.I., Pulkkinen A. (2006). Relation between substorm characteristics and rapid temporal variations of the ground magnetic field. *Ann. Geophys.* 24:725–733.
- Ngwira C.M., Pulkkinen A., Kuznetsova M.M., Gloer A. (2014). Modeling extreme “Carrington-type” space weather events using three-dimensional MHD code simulations. *J. Geophys. Res.* 119:4456–4474. <https://doi.org/10.1002/2013JA019661>
- Tsurutani B.T., Lakhina G.S., Hajra R. (2020). The physics of space weather/solar-terrestrial physics (STP): what we know now and what the current and future challenges are. *Nonlinear Processes Geophys.* 27:75–119. <https://doi.org/10.5194/npg-27-75-2020>
- Lakhina G.S., Hajra R., Tsurutani B.T., Geomagnetically induced current (2020). *Springer Nature Switzerland AG 2020* H. K. Gupta (ed.), *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, Encyclopedia of Earth Sciences Series*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_245-1
- Clilverd M.A., Rodger C.J., Brundell J.B., Dalzell M., Martin I., MacManus D.H. et al. (2018). Long-lasting geomagnetically induced currents and harmonic distortion observed in New Zealand during the 7–8 September 2017 disturbed period. *Space Weather* 16:704–717. <https://doi.org/10.1029/2018SW001822>
- Sakharov Ya.A., Selivanov V.N., Bilin V.A., Nikolaev V.G. (2019). Extremal values of geomagnetically induced currents in the regional power system. “*Physics of Auroral Phenomena*”, Proc. XLII Annual Seminar, Apatity, pp. 53–56. DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.53-56 (in Russian).
- Gjerloev J.W. (2012). The SuperMAG data processing technique. *J. Geophys. Res.* 117(A9), A09213. <https://doi.org/10.1029/2012JA017683>
- Nosé M., Iyemori T., Wang L., Hitchman A., Matzka J., Feller M., Egdorf S., Gilder S., Kumasaka N., Koga K., Matsumoto H., Koshiishi H., Cifuentes-Nava G., Curto J.J., Segarra A., Çelik C. (2012). Wp index: A new substorm index derived from high-resolution geomagnetic field data at low latitude. *Space Weather* 10, S08002. DOI:10.1029/2012SW000785
- Viljanen A., Häkkinen L. (1997). IMAGE magnetometer network, Satellite-ground based coordination sourcebook // ed. Lockwood M., Wild M.N., Opgenoorth H.J. *ESA publications* SP-1198. 111–117.
- Tsurutani B.T., Echer E., Shibata K., Verkhoglyadova O.P., Mannucci A.J., Gonzalez W.D., Kozyra J.U., Pätzold M. (2014). The interplanetary causes of geomagnetic activity during the 7-17 March 2012 interval: a CAUSES II overview. *J. Space Weather Space Clim.* 4, A02. DOI: 10.1051/swsc/2013056

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.005

DAY BY DAY BEHAVIOR OF GNSS POSITIONING ERRORS AND TEC FLUCTUATIONS ASSOCIATED AURORAL DISTURBANCES OVER MARCH 2015

I.I. Efishov¹, I.I. Shagimuratov¹, I.E. Zakharenkova¹, N.Yu. Tepenitsyna¹, M.V. Filatov², G.A. Yakimova¹

¹WD IZMIRAN, Kaliningrad, Russia

²Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

E-mail: efishov@hotmail.com

Abstract. We analyzed the occurrence of TEC fluctuations and an impact of auroral disturbances on the Precise Point Positioning (PPP) errors in European sector using GPS measurements of EPN network. Index AE was used as indicator of auroral activity. The fluctuation activity was evaluated by indexes ROT and ROTI. The positioning errors were determined using the GIPSY-OASIS software (<http://apps.gdgps.net>). The Precise Point Positioning is the processing strategy of the single receiver for GNSS observations that enables the efficient computation of the high-quality coordinates. For quiet conditions the algorithm provided for TRO1 stations daily average PPP errors less than 4-5 sm. The analysis indicated regular increasing positioning errors around MLT (22 UT) during March 2015. While raising the auroral activity it was observed increasing TEC fluctuation as well as positioning errors. In the report we discuss also behavior PPP errors during super storm 17 March 2015. During storm at TRO1 the PPP errors reached more than 20 m. The increasing errors were observed on latitudes low than 52-54°N.

Introduction

The electron density irregularities occurred in the high latitude ionosphere may be experience the rapid of phase and amplitude fluctuations (scintillations) of the GPS signals. The intensity of the fluctuations increases during geomagnetic storms and substorms. Many publications are devoted to the study of the occurrences of GPS signals fluctuations in the different regions of high latitude ionosphere [Cherniak *et al.*, 2015; Prikryl *et al.*, 2015; Jin *et al.*, 2018]. The strong ionospheric fluctuations of the GPS signals registered in the auroral oval and associated with the auroral disturbances [Chernouss *et al.*, 2015]. The fluctuations are frequently observed near the magnetic midnight.

Low frequency fluctuations of the GPS phase may be directly due to the electron density changes along the radio ray path or to the fluctuations of the total electron content (TEC). Strong TEC fluctuations can complicate the phase ambiguity resolution, can increase the number of the undetected and uncorrected cycle slips. Therewith, scintillations of the GPS signals can lead to the loss of the lock on the receiver tracking, and thereby to the disrupting of the performance of the satellite navigation system [Juan *et al.*, 2018]. Much attention has been paid on the impact of the geomagnetic disturbances on the PPP in the recent years [Jacobsen and Andalsvik, 2016; Marques *et al.*, 2018; Shagimuratov *et al.*, 2018]. The direct comparison the fluctuations intensity and the positioning errors at the auroral stations make it clear that the accuracy of the point positioning at the high latitudes is worse during geomagnetic storms.

In this work the analysis of TEC fluctuations and positioning errors over auroral region during March 2015 were presented. We particular attention give to the super storm of March 17, 2015. It was evaluated maximal PPP errors which we can be expected during geomagnetic storms.

Data

In this paper we used data from following GPS stations:

station	latitude	longitude	CGL	MLT, midnight
NYAL	78.9°	11.9°	76.6°	21.12 UT
TRO1	69.7°	18.9°	66.9°	21.54 UT
MAR6	59.0°	17.3°	57.4°	21.96 UT
KLGI	54.7°	54.7°	50.9°	21.88 UT

Geomagnetic conditions

Figure 1 shows the variability of Dst during March 2015. Most days of March were quiet, super strong storm took place on March 17. During storm AE index exceeded 2000 nT.

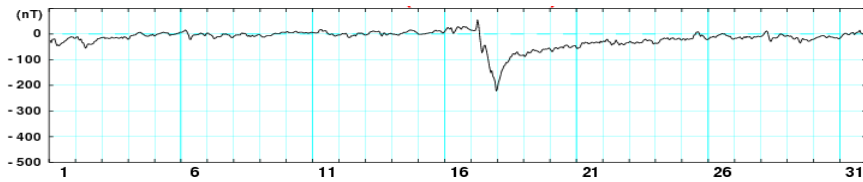


Figure 1. Dst over a period of March 2015.

Auroral activity and TEC fluctuations

The fluctuation activity was evaluated by the ROT (Rate of TEC) at 1-minutes interval. On their base was formed the pictures which demonstrates the behavior of the ROT over the single station for all satellite passes on 24-hour interval. In figure 2 the response of the ionosphere to auroral activity, as example, for single events is presented. The picture demonstrates occurrence TEC fluctuations (ROT) depend on intensity and time developed of auroral activity at different latitudes. The intensity of fluctuations decrease towards low latitudes. The analysis shown that remarkable fluctuations occurred at auroral stations when auroral intensity exceeded 500 nT. During storm day of March 17 the fluctuations were observed even at midlatitude stations of Kaliningrad. We associate it with behavior of the irregularity oval which represent dynamic auroral oval [Chernouss et al., 2018] During the storm the irregularity oval expanded equatorward and poleward in response to disturbed geomagnetic activity [Shagimuratov et al., 2012].

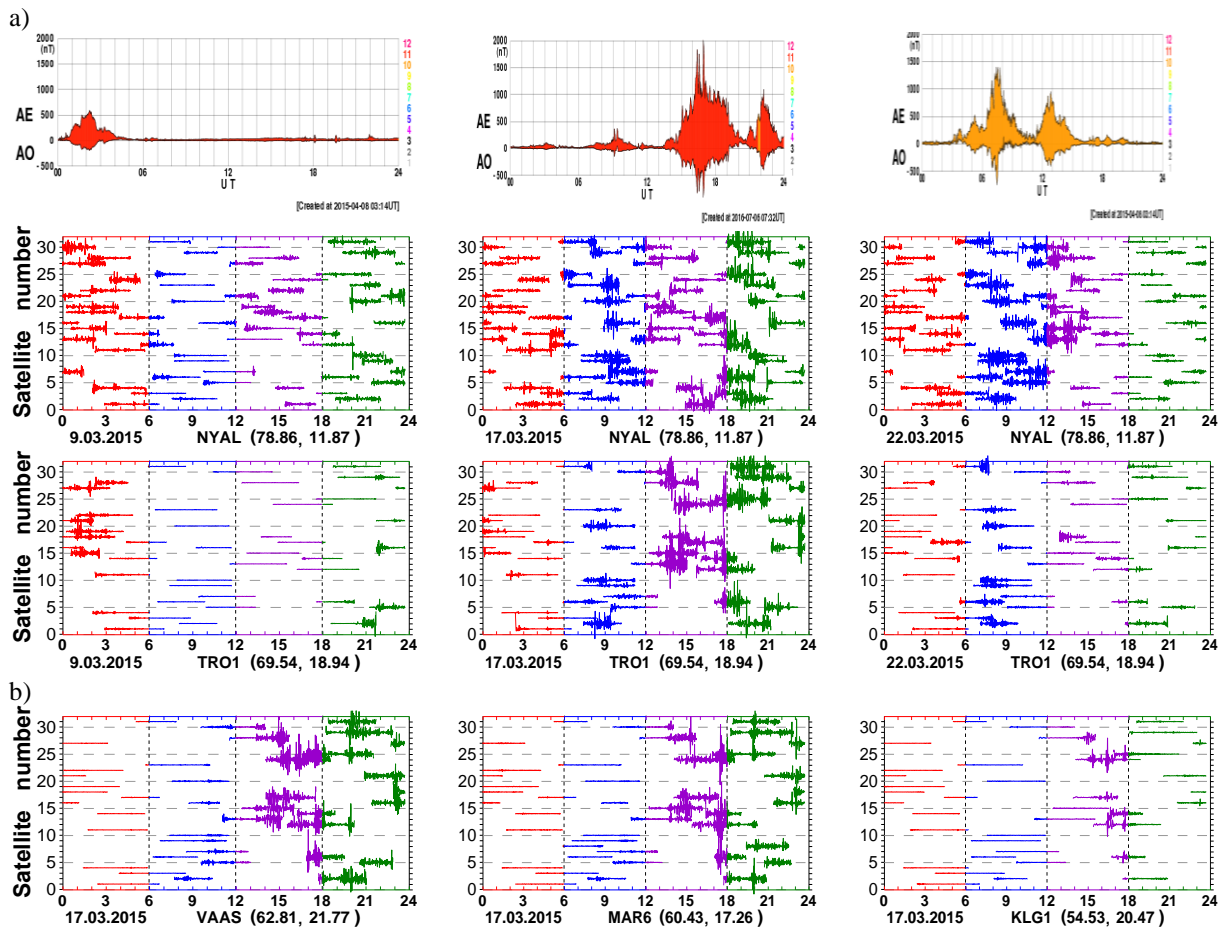


Figure 2. Development of the TEC fluctuations (ROT) at NYAL and TRO1 stations on 9, 17 and 22 March 2015 (a) and VAAS, MAR6 and KLG1 stations for storm day of March17 (b).

In figure 2 the some events are presented when auroral disturbances developed during morning (March 9), post noon (March 17) and near noon (March 22). For all cases TEC fluctuations at TRO1 are followed by AE indexes. It is interesting that fluctuation were registered even in day time of March 22, though this day was not too disturbed one. Diurnal occurrence of TEC fluctuations at NYAL station differ essential from lower latitude TRO1 stations. The reason such behavior associated with station location. The NYAL located near cusp, but TRO1 over auroral zone. At the same development fluctuations corresponds well with the variations of the AE index at both stations.

During low auroral activity at lower than subauroral latitudes fluctuations were very weak (data not shown). During storm fluctuations were registered even at midlatitude station of Kaliningrad.

Analysis GPS positioning errors

The PPP errors were calculated using the GIPSY software of the NASA Jet Propulsion Laboratory in the kinematic mode (<http://apps.gdgps.net>). On the base the 3D position errors were computed with 5-min interval. The 3D position error (P_{3D}) was defined as the offset of the detrended coordinate from its median value (x_0, y_0, z_0) and it was calculated for each epoch [Jacobsen and Dähnn, 2014]:

$$P_{3D}(i) = \sqrt{(x(i) - x_0)^2 + (y(i) - y_0)^2 + (z(i) - z_0)^2}$$

The high correlation between the positioning errors and the ROTI for year 2012 at the latitudes 59°-79°N was found by Jacobsen and Dähnn [2014], it was found also for European sector in the study of geomagnetic storm on 17 March 2015. Positioning errors increase exponentially with the increasing of the ROTI. Figure 3 illustrate the diurnal distribution PPP errors over March 2015 dependence of severe errors. The low values errors which are registered all day characterize accuracy used PPP algorithm for quiet geomagnetic conditions for TRO1 station. Position errors >1 m occurred corresponding to the development of ionospheric irregularities within the auroral oval. Their maximum occurrence is mostly at the equatorward edge of the nightside irregularities oval around magnetic midnight.

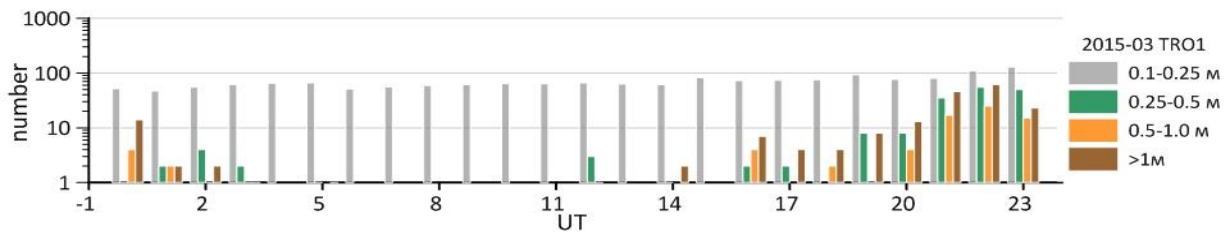


Figure 3. Diurnal distribution the PPP errors over March 2015 for TRO1 station.

It is well known that positioning errors essentially increase during geomagnetic disturbances. Maximal PPP errors over March 2015 are registered during severe storm of March 17. The storm time errors can be considered as indicator of extreme PPP errors at the high latitude ionosphere.

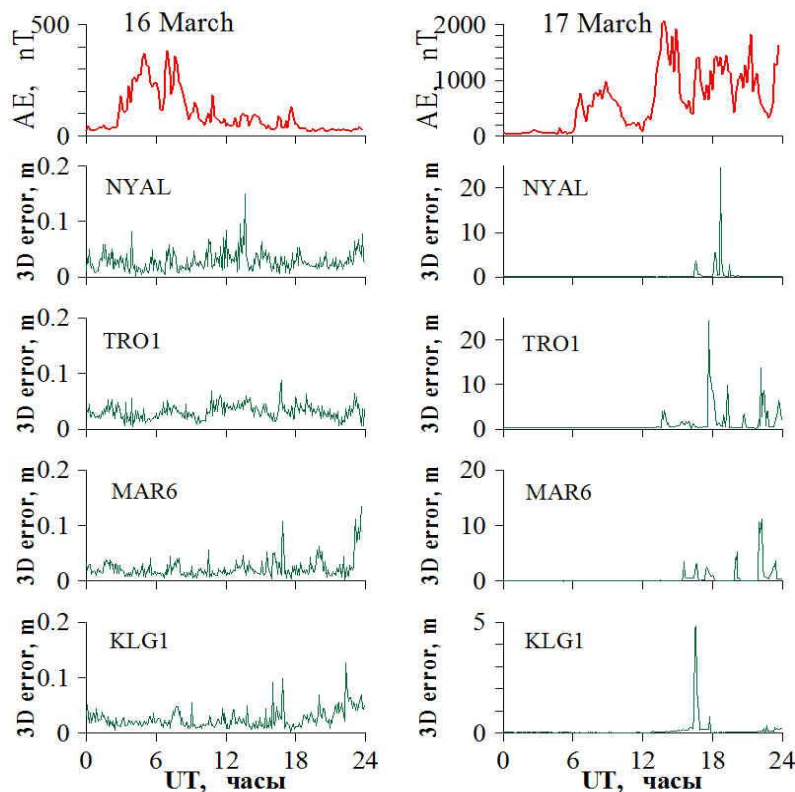


Figure 4. The 3D positioning errors at different stations for 16 (quiet day) and 17 (storm day) March 2015.

Figure 4 illustrate that storm time error errors are more than an order of magnitude higher than quiet time. At auroral latitude maximal errors exceed 20 m. At subaural latitudes errors reached 8-10 m, middle station of Kaliningrad errors exceed 4 m.

Summary

We analyzed the occurrence of the TEC fluctuations and the positioning errors associated with the auroral disturbances over Europe during March 2015. These disturbances occurred at the evening time. The maximal intensity of the TEC fluctuations took place at the auroral ionosphere. Weak fluctuations were observed over subauroral stations. The effects were related with the dynamics of the auroral oval. We analyzed also an impact of the geomagnetic disturbances on the Precise Point Positioning errors. The positioning errors were determined using the GIPSY-OASIS software (APS-NASA). Statistics shown under normal conditions, a centimeter - to decimeter - level PPP accuracy were registered. During the geomagnetic storm on March 17, 2015 positioning errors dramatic increased. At auroral stations errors are exceed more than 20 m. Even at middle station of Kaliningrad PPP errors are reached 5 m.

Acknowledgment

This investigation was partly supported by RFBR Grant № 19-05-00570. The authors are grateful for GNSS data provided by IGS/EPN. Data Center of Geomagnetism for the data of AE, Dst index Kp (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>).

References

- Cherniak Iu., Zakharenkova I., Redmon J. (2015). Dynamics of the high-latitude ionospheric irregularities during the 17 March 2015 St. Patrick's Day storm: Ground-based GPS measurements. *Space Weather*. 13, 585-597. DOI: 10.1002/2015SW001237.
- Chernouss S.A., Kalitenkov N.V. (2011). The dependence of GPS positioning deviation on auroral activity. *International Journal of Remote Sensing*. 32(1), 3005-3017.
- Черноус С.А., Шагмуртов И.И., Ивенко И.Б., Филатов М.В. и др. (2018). Авроральные возмущения как индикатор воздействия ионосферы на навигационные сигналы. *Хим. Физика*. 37, 5, С. 77. DOI: 10.7868/S0207401X18050102
- Jacobsen K.S., Dähnn M. (2014). Statistics of ionospheric disturbances and their correlation with GNSS positioning errors at high latitudes. *J. Space Weather Space Clim*. 4(A27). DOI: 10.1051/swsc/2014024
- Jacobsen K., Andalsvik Y. (2016). Overview of the 2015 St. Patrick's day storm and its consequences for RTK and PPP positioning in Norway. *J. Space Weather Space Clim*. 6(A9). DOI: 10.1051/swsc/2016004
- Jin Y, Miloch W.J., Moen J.I., Clausen B.N. (2018). Solar cycle and seasonal variations of the GPS phase scintillation at high latitudes. *J. Space Weather Space Clim*. 8(A48). DOI: 10.1051/swsc/2018034
- Juan J.M., Sanz J., Guillermo G.-C. et al. (2018). Feasibility precise navigation in high and low latitude regions under scintillation conditions. *J. Space Weather Space Clim*. 8(A05). DOI: 10.1051/swsc/2017047
- Marques H.A., Marques H.A.S., Aquino M. et al. (2018). Accuracy assessment of Precise Point Positioning with multiconstellation GNSS data under ionospheric scintillation effects. *J. Space Weather Space Clim*. 8(A15). DOI: 10.1051/swsc/2017043.
- Prikryl P., Jayachandran P.T. et al. (2015). Climatology of GPS phase scintillation at northern high latitudes for the period from 2008 to 2013. *Ann Geophys*. 33, 531-545. DOI: 10.5194/angeo-33-531-2015
- Shagimuratov I.I., Chernouss S.A., Despirak I.V. et al. (2018). Occurrence of TEC fluctuations and GPS positioning errors at different longitudes during auroral disturbances. *Sun and Geosphere*. DOI: 10.31401
- Shagimuratov I., Krankowski A., Efishov I., Cherniak Yu., Zakharenkova I. (2012). High latitude TEC fluctuations and irregularity oval during geomagnetic storms. *Earth Planets Space*. 64 (6), pp. 521-529.
- Yang Z., Morton Y.J., Zakharenkova I., Cherniak Ya. et al. (2020). Global view of ionospheric disturbance impacts on kinematic GPS positioning solutions during the 2015 St. Patrick's Day storm. *J. of Geophysical Research: Space Physics*. 123, e2019JA027681. DOI: 10.1029/2019JA027681



DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.006

STUDY OF MID-LATITUDE POSITIVE BAYS DURING SUBSTORMS OVER SCANDINAVIA – A CASE STUDY

V. Guineva¹, I. Despirak², R. Werner¹, R. Bojilova³, L. Raykova¹

¹Space Research and Technology Institute (SRTI), Bulgarian Academy of Sciences, Stara Zagora Department, Bulgaria

²Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

³National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography (NIGGG), Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

Abstract. The purpose of this work is to study the midlatitude effects during substorms observed in different interplanetary conditions over Scandinavia. To identify the substorm disturbances, data from the magnetometer networks IMAGE, SuperMAG and INTERMAGNET in the range 31.8° - 75.25° CGMLat and 92° - 104° CGMLon were used. To verify the interplanetary and geomagnetic conditions, data from the CDAWeb OMNI (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>), the catalog of large-scale solar wind phenomena (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>) and from the WDC for geomagnetism at Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>) were taken.

Two isolated substorms were chosen, with different intensity: ALmin values ~ -270 nT and ~ -1300 nT, respectively. The first substorm occurred on 6 February 2018, at 21:25 UT, under quiet conditions: during slow solar wind streams. The second substorm, at 19:10 UT on 27 September 2020, originated under moderately disturbed conditions: during a high-speed stream (HSS) in the solar wind, just after the passage of EJECTA by the Earth.

It was found out, that the latitude of the bay sign conversion from negative to positive values in the case of quiet solar wind conditions, appeared at latitude, 7° higher than the one in the case of disturbed conditions. In both cases, the amplitude of the positive bays, after a maximum near the sign conversion latitude decreased gradually towards the lower latitudes, with a difference between the minimal and maximal amplitude of about 50%. The magnetic bays kept their duration throughout the whole latitudinal range, ~115 min. for the first case and ~ 60 min. for the second one. It was ascertained, that the mean positive bays amplitude in the case of disturbed conditions was 4 times higher than the amplitude during quiet conditions.

Introduction

The main magnetic disturbances in the Earth's magnetosphere are associated with the development of substorms, which occur more often than magnetic storms. It is known that substorms are a typical phenomenon in the auroral latitudes (~ 60° - ~ 71° MLAT) [1] but depending on the conditions in the solar wind and the magnetic activity, the substorms can reach both very high latitudes (>70° MLAT) (e.g. [2,3,4]) and can propagate to middle (~ 50° MLAT) latitudes [5]. Note, that magnetic substorms at auroral latitudes are observed as negative X bays, and vice versa, at middle latitudes they are expressed by positive bays in the X-component of the ground-based magnetic field (midlatitude positive bays, MPB) [6]. The first studies of positive bays considered this effect to be low latitude reverse currents of the western electrojet [7]. Subsequently, the emergence of positive bays was explained by ascending field-aligned currents [8]. But then it was discovered that the positive mid-latitude bays, which are usually observed during the expansion phase of a substorm. Currently the generally accepted view is, that the positive bays are associated with a substorm current wedge (SCW) [6].

It is worth noting that substorms, which occurred during different conditions in the solar wind can differ significantly from each other (e.g., [9,10,11]). So, depending on the large-scale structures in the solar wind we can see various categories of substorms: "limited" and "extended" [12], "localized" and "normal" [13], "substorms on the contracted oval" and "normal" [14], "polar" and "usually" [15], "high latitude" and "normal" [4], "expanded" and "polar" [16]. Hence, the development of positive bays at midlatitudes during substorms should also have some diverse characteristics, according to the different conditions.

In this context the basic aim of this study is to evaluate the mid-latitude effects of substorms occurred over Europe during different solar wind conditions. Two isolated substorms were chosen, which developed during quiet and disturbed conditions: on 6 February 2018 and on 27 September 2020.

Data

To identify the substorm disturbances, and to study the further development, data from the magnetometer networks IMAGE, SuperMAG and INTERMAGNET in the longitudinal band 90° - 104° GMLon, which is round the

longitude of the Bulgarian station Panagjurishte ($\sim 97^\circ$ GMLon), and the largest possible interval of GM latitudes: $31.8^\circ - 75.25^\circ$ GMLat were used. To ascertain the interplanetary and geomagnetic conditions, the OMNI data base (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>), the catalog of large-scale solar wind phenomena (<http://www.iki.rssi.ru/omni/>) and the WDC for geomagnetism at Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>) have been used.

Interplanetary and geomagnetic conditions

Two isolated substorms were winnowed out for the study.

The first substorm, at 21:25 UT on 6.02.2018, occurred under quiet solar wind conditions. A slow stream was observed for this day, V_x increased gradually from ~ -320 km/s to ~ -420 km/s before the substorm, the IMF Bz was ~ -4 nT. According Kyoto WDS, the values of the main geomagnetic indexes were moderate: the AL index was about -270 nT, SYM/H ~ -5 nT, Kp=1-.

The second event, at 19:12 UT on 27.09.2020 occurred under comparatively disturbed conditions, against an interplanetary background of a high-speed stream (HSS), just after a small Coronal Mass Ejection (CME), consisting of Sheath and Ejecta. An interplanetary shock was registered after Ejecta. Before the substorm onset V_x was about -580 km/s and was on the decrease, the IMF Bz, after fluctuations around 0, jumped down by 8 nT, and then kept to -8 nT for more than one hour. The AL index value was ~ -1300 nT, but a magnetic storm did not yet develop in this time (SYM/H ~ -25 nT), the general disturbance of the ground-based magnetic field was moderate (Kp=5-).

Substorms development

The IMAGE magnetometers chain (PPN-NAL) data have shown that more than 3 hours before the substorms there weren't perceptible disturbances. The substorm on 6.02.2018 began at 21:25 UT at $\sim 67^\circ$ GMLat (stations MAS-SOR), and the center of the westward electrojet was at $\sim 69.7^\circ$ GMLat (between SOR and BJN) (determined by Z – component variations).

The substorm on 27.09.2020 started at 19:12 UT at $\sim 67^\circ$ GMLat (SOR), and the center of the electrojet propagated to $\sim 75^\circ$ GMLat (HOR-LYR).

The substorm appearance at midlatitudes

To study the appearance of the selected substorms at midlatitudes, the magnetic field disturbances from auroral to midlatitudes were examined in more detail by data from 20 stations situated in the following longitudinal and latitudinal ranges: from 92° to 104° GMLon and from 65° to 31° GMLat. This longitudinal range is located close to the IMAGE meridian (NAL-NUR) and the Panaguriste station (PAG, Bulgaria).

In Fig.1 the variations of X-component of the magnetic field at chosen stations for both substorm events are shown. The approximate time of the midlatitude positive bays (MPB) onset is marked by red vertical lines. The MPB are observed in both cases below the negative bays at auroral latitudes. As it is seen from Fig. 1, the bay sign conversion latitude for the substorm on 06 February 2018 was at about 63° GMLat, between the stations SOD (Sodankyla) and LYC (Lycksele). The conversion latitude for the substorm on 27 September 2020 was at about 56° , between the stations UPS (Uppsala) and TAR (Tartu). Thus, the latitude of the bay sign conversion in the case of quiet solar wind conditions appeared at latitude of about 7° higher than the one in the case of disturbed conditions.

From Fig.1 it is seen that the MPB amplitudes in both cases are different. Furthermore, they changed with the decreasing of the latitude. A difference of about 50% between the minimal and maximal positive amplitude at different latitudes for each of the cases was obtained.

In Fig.2, the dependence of the MPB amplitude on the geomagnetic latitude for the event on 6.02.2018 (left panel) and the one on 27.09.2020 (right panel), is presented. In order to reveal better the dependence, in view of the strong dependence on the geomagnetic longitude, as well, the longitudinal band was divided into three narrower strips ($90^\circ-95^\circ$, $95^\circ-99^\circ$, $99^\circ-104^\circ$ GMLon). The data grouped in this way, are indicated by different symbols. The amplitude of the MPB initially increased towards the lower latitudes and after a maximum at about 50° GM latitude decreased gradually. It is seen also, that the MPB amplitude during the substorm in disturbed conditions is larger than the one during quiet conditions. The mean MPB amplitude for the event on 6.02.2018 was ~ 13.7 nT, and for the second event on 27.09.2020 - ~ 55 nT. So, the mean positive bays amplitude in the case of disturbed conditions was about 4 times higher than the MPB amplitude during quiet conditions.

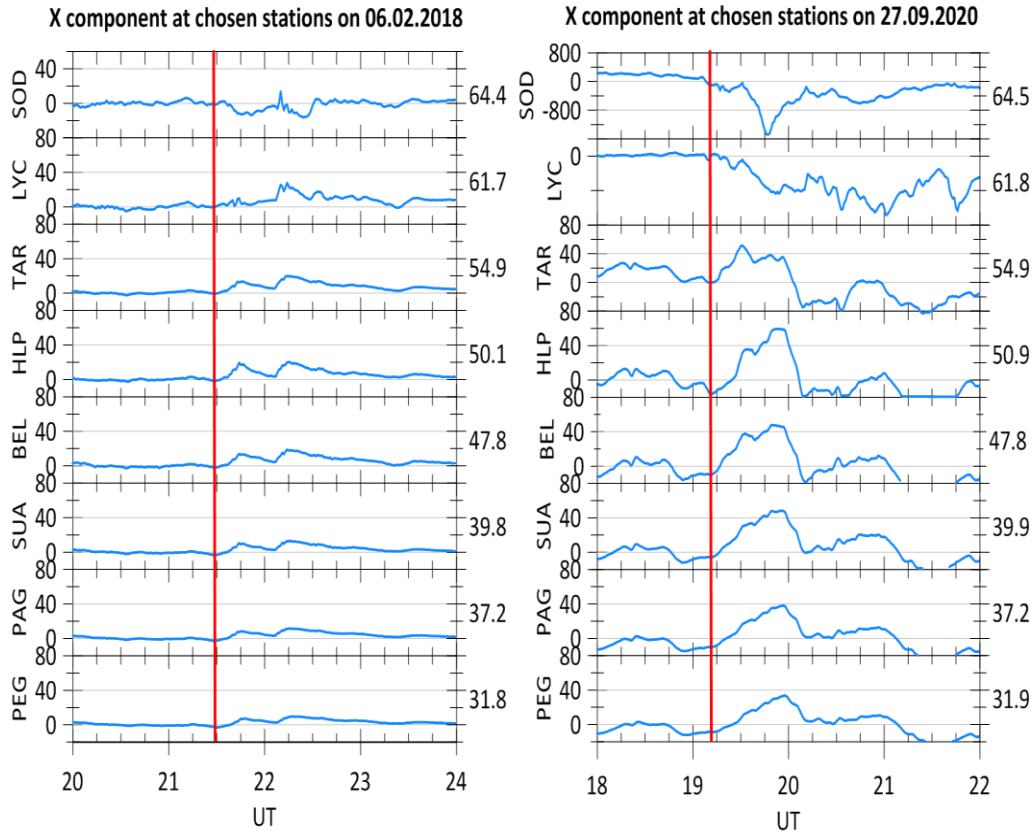


Figure 1. Variations of the X magnetic component by chosen stations of the INTERMAGNET magnetometer network observed during both substorms: on 06 February 2018 (left panel) and on 27 September 2020 (right panel). The station name abbreviations are shown at the left side of the graphs, and their geomagnetic latitudes – at the right side. The approximate time of the MPB onset is indicated by red vertical lines.

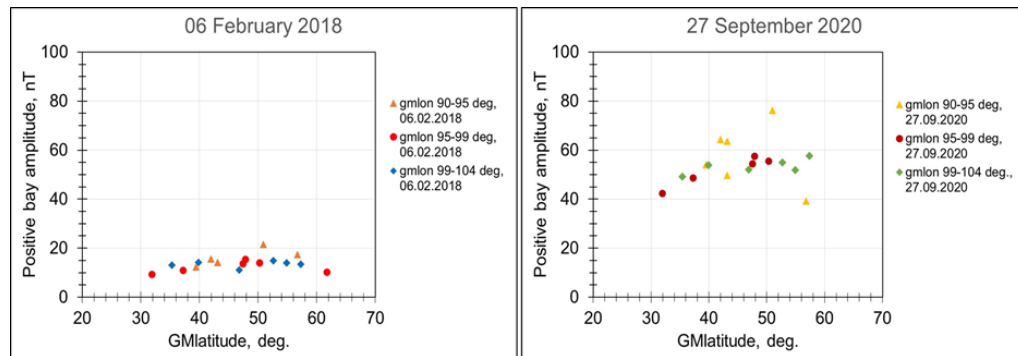


Figure 2. The dependence of magnetic positive bays (MPB) amplitude on the geomagnetic latitude for the substorms on 06 February 2018 (left panel) and on 27 September 2020 (right panel). The results for the examined longitudinal intervals are marked as follows: 90°-95° GMLon – by triangles, 95°-99° GMLon – by circles, and 99°-104° GMLon – by diamonds (shown in the right part of the panels).

Summary

This study has investigated the effect of two substorms, occurred during different interplanetary and geomagnetic conditions, namely the substorms at 21:25 UT on 6.02.2018 and at 19:12 UT on 27.09.2020, at midlatitudes. The following results have been obtained:

- 1) The latitude of the bay sign conversion from negative to positive values in the case of quiet solar wind conditions appeared at latitude of 7° higher than the one in the case of disturbed conditions;
- 2) The amplitude of the positive bays initially increased towards the lower latitudes and after a maximum at about 50° GM latitude decreased gradually;

- 3) A difference of about 50% between the minimal and maximal positive amplitude at different latitudes for each of the cases was obtained;
- 4) The mean positive bays amplitude in the case of disturbed conditions was about 4 times higher than the amplitude during quiet conditions.

Acknowledgements

The authors are grateful to the creators of the databases OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>), SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>), IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>), WDS at Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>) and the solar wind large-scale phenomena catalog (<http://www.iki.rssi.ru/omni/>) for the opportunity to use them in this work.

This study was supported by the National Science Fund of Bulgaria (NSFB) (project number КП-06-Русия/15) and by the RFBR (project number 20-55-18003Болг_a).

References

1. Akasofu S.-I. (1964). The development of the auroral substorm. *Planet. Space Sci.*, 12, No. 4, 273–282.
2. Pudovkin M.I., Troshichev O.A. (1972). On the types of current patterns of weak geomagnetic disturbances at the polar caps. *Planet. Space Sci.*, 20, 1773–1779.
3. Nielsen E., Bamber J., Chen Z.-S., Brekke A., Egeland A. et al. (1988). Substorm expansion into the polar cap. *Ann. Geophys.*, 6, No. 5, 559–572.
4. Despirak I.V., Lyubchich A.A., Biernat H.K., Yahnin A.G. (2008). Poleward expansion of the westward electrojet depending on the solar wind and IMF parameters. *Geomagn. Aeronomy*, 48, No. 3, 284–292.
5. Feldstein Y.L., Starkov G.V. (1967). Dynamics of auroral belt and geomagnetic disturbances. *Planet. Space Sci.*, 15, No. 2, 209–229.
6. McPherron R.L., Russell C.T., Aubry M. (1973). Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968, 9: phenomenological model for substorms. *J. Geophys. Res.*, 78, No. 16, 3131–3149.
7. Akasofu S.-I., Chapman S., Meng C.-I. (1965). The polar electrojet. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 27, 1275–1305.
8. Meng C.-I., Akasofu S.-I. (1969). A study of polar magnetic substorms. 2. 3-dimensional current system. *J. Geophys. Res.*, 74, 4035–4053.
9. Tanskanen E., Pulkkinen T.I., Koskinen H.E.J., Slavin J.A. (2002). Substorm energy budget during low and high solar activity: 1997 and 1999 compared. *J. Geophys. Res.*, 107, No. A6, SMP 15-1 – SMP 15-11.
10. Guineva V., Despirak I., Kozelov B. (2016). Substorms observations during two geomagnetically active periods in March 2012 and March 2015. *Sun and Geosphere*, 11, No. 2, 125–130.
11. Guineva V., Despirak I.V., Werner R. (2018). Observations of substorm auroras by MAIN cameras system in Apatity during two winter seasons: 2014/2015 and 2015/2016. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 177, 63–72.
12. Lui A.T.Y., Akasofu S.-I., Hones E.W., Jr., Bame S.J., McIlwain C.E. (1976). Observation of the plasma sheet during a contracted oval substorm in a prolonged quiet period, Substorms in space: The correlation between ground and satellite observations of the magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 81, No. 7, 1415–1419.
13. McPherron R.L., Russell C.T., Kivelson M.G., Coleman P.J., Jr. (1973). Substorms in space: The correlation between ground and satellite observations of the magnetic field. *Radio Science*, 8, No. 11, 1059–1076.
14. Kamide Y., Akasofu S.-I., Deforest S.E., Kisabeth J.L. (1975). Weak and intense substorms. *Planet. Space Sci.*, 23, No. 4, 579–584.
15. Kleimenova N.G., Antonova E.E., Kozyreva O.V., Malysheva L.M., Kornilova T.A., Kornilov I.A. (2012). Wave structure of magnetic substorms at high latitudes. *Geomagn. Aeronomy*, 52, No. 6, 746–754.
16. Despirak I.V., Lyubchich A.A., Kleimenova N.G. (2018). High-latitude substorm dependence on space weather conditions in solar cycle 23 and 24 (SC23 and SC24). *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 177, 54–62.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.007

НЕЙРОСЕТЕВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИЧИННО – СЛЕДСТВЕННОЙ СВЯЗИ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ С ПАРАМЕТРАМИ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Н.А. Бархатов¹, В.Г. Воробьев², Е.А. Ревунова³, О.И. Ягодкина², И.С. Ундалова¹

¹Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина

²ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты

³Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация

В работе представлены результаты развития метода классификации образов причинно-следственной связи суббуревой активности по индексу AL с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля для солнечных потоков типа магнитное облако (МО). Классификация выполнялась искусственными нейросетями типа слоя Кохонена. Успешность выявления конкретных причинно-следственных классов, содержащих совместные параметры причин суббуревой активности и ее развития, указывает на нелинейные характеристики связи динамики AL индекса с параметрами в теле МО. Важным является то обстоятельство, что результаты нейросетевой классификации вполне согласуются с физическими представлениями о процессах развития суббури.

Введение и развитие метода причинно-следственной классификации

Магнитные облака (МО) солнечного ветра согласно современным представлениям вызывают наиболее интенсивные геомагнитные бури. Этим объясняется интерес к изучению магнитных облаков различными научными группами [1]. В зависимости от скорости облака относительно солнечного ветра на переднем фронте его тела может образовываться ударная волна, за которой следует турбулентная область, часто называемая оболочкой облака. Исследования показывают, что для большинства магнитных облаков начало соответствующих им геомагнитных возмущений приходится на ударную волну и оболочку [2-3]. Упомянутые исследования касаются изучения конкретных событий воздействия магнитных облаков на геомагнитные явления. Установлено, что магнитосферные суббури несут в себе информацию о динамике параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. При этом наиболее эффективной для генерации суббури считается Vz компонента межпланетного магнитного поля (ММП). При этом источником энергии суббури являются скорость (V , км/с) и плотность плазмы (N , см⁻³) солнечного ветра.

Наш подход к изучаемой проблеме заключается в подтверждении отмеченных ранее физических закономерностей нейросетевыми методами причинно-следственной классификации связи суббуревой активности с параметрами магнитных облаков. Принимая во внимание скорость и плотность плазмы солнечного ветра нам удалось выполнить успешный нейросетевой прогноз динамики AL-индекса магнитной активности в периоды изолированных суббурь [4]. Предлагаемый математический процесс имеет физическое обоснование, которое означает, что при формировании суббури происходит переход накопленной кинетической энергии солнечного ветра в ее энергию при участии возмущения Vz компоненты ММП. Наиболее эффективный прогноз вариаций AL индекса был реализован, если в качестве входных последовательностей для искусственной нейронной сети (ИНС) использовался интегральный параметр $\Sigma[NV^2]$, учитывающий предысторию процесса накачки кинетической энергии солнечного ветра в магнитосферу, а также вариацию Vz компоненты ММП [4]. Новые возможности поиска причинно-следственных связей динамики параметров магнитосферы и межпланетной среды использованы в работе [5], где нейросетевая технология применена для классификации создаваемых образов причинно-следственной связи суббуревой активности с воздействием крупномасштабных солнечных потоков типа магнитное облако на земную магнитосферу. Полученные при этом классификационные результаты демонстрируют отождествление выделенных классов суббурь с возмущениями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, отвечающих телам магнитных облаков.

Классификация причинно-следственной связи суббуревой активности с магнитными облаками солнечного ветра выполнялась искусственными нейросетями типа слоя Кохонена. Изучаемые образы представляли собой соответствующие минутные данные, отвечающие интервалам наблюдений МО во время их воздействия на земную магнитосферу. Эти события в [5] подвергались отдельной классификации по параметрам причин (параметры, относящиеся к МО) и последствий (параметры, относящиеся к геомагнитному отклику магнитосферы). Полученные классы сопоставлялись специальным алгоритмом. В

случае совпадения класса комбинаций причинных параметров с классом суббуревое следствия, класс объявлялся установленным. Всего было обнаружено 3 класса суббуревой активности. Таким образом, показано, что исследуемые конфигурации динамики AL-индекса содержат в себе информацию о характеристиках крупномасштабного плазменного потока типа магнитное облако, в которое погружается земная магнитосфера.

В настоящем исследовании развивается упомянутый выше метод [5] классификации образов причинно-следственной связи суббуревой активности по индексу AL с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля для солнечных потоков типа магнитное облако. Для этого выполняется уже совместная причинно-следственная нейросетевая классификация параметров солнечного ветра и ММП в теле МО с вызываемой им суббуревой активностью. При этом ставилось целью установить степень согласованности получаемых классов с классами, установленными в [5]. Изучаемые образы представляли собой соответствующие минутные данные, отвечающие интервалам наблюдений 23 МО, зарегистрированных в 1998-2012 гг. в интервалы их воздействия на земную магнитосферу. Эти события подвергались отдельной классификации по параметрам причин (параметры, относящиеся к МО) и последствий (параметры, относящиеся к геомагнитному отклику магнитосферы). Полученные классы сопоставлялись специальным алгоритмом. В случае совпадения класса комбинаций причинных параметров с классом суббуревое следствия, класс объявлялся установленным.

Алгоритмы нейросетевой классификации

Проверка справедливости полученной в [5] классификации образов включающих в себя параметры солнечного ветра и ММП для тел МО, а также геомагнитного отклика в виде вызываемой ими суббуревой активности, выполняется совместной причинно-следственной нейросетевой классификации. При этом устанавливается степень согласованности получаемых классов с классами, определенными нами ранее в [5] для интервалов воздействия на земную магнитосферу 33 магнитных облаков. Таким образом в работе использованы те же минутные данные взятые с узла <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov> и отвечающие интервалам наблюдений этих межпланетных магнитных облаков, зарегистрированных в 1998-2012 гг. Для каждого интервала МО анализировались параметры солнечного ветра: концентрация N и скорость плазмы V и компоненты вектора $B(B_x, B_y, B_z)$ межпланетного магнитного поля в GSM системе координат, а так же значения SYM/H и AL индексов магнитной активности. Интервалы взяты с разной продолжительностью, определяемой параметрами магнитных облаков. Начало и конец каждого события МО определялись по общедоступным каталогам. Экстремумы и интегральные значения физических переменных вычислялись за весь анализируемый интервал, индивидуальный для каждого МО.

Совместная классификация предполагает подтверждение полученных ранее в [5] результатов, но не путем сопоставления результатов работы двух независимых ИНС, а на единой нейросети типа слоя Кохонена. Для этой цели предложен алгоритм поиска комбинации параметров для наилучшей согласованности установленных ранее классов и классов полученных совместной классификацией. Суть алгоритма заключается в количественном анализе нейросетевых результатов классификации одного и того же набора событий. Алгоритм подсчитывает процентное соотношение «попаданий» одного и того же набора событий в один класс. Если в ранее установленный старый класс попали все события, полученные в результате новой совместной классификации, то такая ситуация соответствует 100% и наилучшей комбинации параметров для согласованности установленных ранее классов и классов, полученных совместной классификацией.

На практике оказалось, что подобрать входные комбинации параметров и получить при этом высокий процент согласованности – сложная задача. Кроме того, в трех ранее полученных классах содержится разное количество событий. Так, в первом классе – 4 события (условный вес каждого события 1/4), во втором – 13 событий (1/13), в третьем – 6 событий (1/6). После перебора всех возможных комбинаций параметров и при учете перемешивания событий в новой классификации удалось получить такие максимально возможные проценты согласованности: для первого класса 1/4*4 (все события из старого класса) минус 1/13*3 (добавились три события из старого второго класса) итого 0,77 (77%); для второго класса 1/13*8 (все события из старого класса) итого 0,62 (62%); для третьего класса 1/6*6 (все события из старого класса) минус 1/13*2 (добавились два события из старого второго класса) итого 0,85 (85%).

В результате работы этого алгоритма было показано, что наиболее успешная совместная классификация возможна при включении в расчет следующих параметров: экстремум B_z , экстремум NV2, интегральный NV2, интегральный SYM/H, экстремум AL, интегральный AL. Учет этих параметров позволил достичь наибольшей согласованности с результатами [5] для трех ранее установленных классов. Класс 1 проявляется в динамике индекса AL в виде уединенных слабых суббурь с медленно изменяющейся B_z -компонентой в теле МО с точностью 77%. Класс 2 – умеренные проявления суббуревой активности в динамике индекса AL в виде уединенных или серий суббурь, вызываемых интенсивными изменениями B_z в теле МО с точностью 62%. Класс 3 – экстремальные проявления суббуревой активности в виде серий суббурь с экстремальными значениями индекса AL, отождествляемые со значительным ростом интегральной величины NV2 в теле МО с точностью 85%. Каждый выделенный класс представляет собой причинно-следственную связь типов

суббурь с конкретным типом возмущений параметров солнечного ветра и ММП в теле магнитного облака. Результаты нейросетевой классификации вполне согласуются с физическими представлениями о процессах развития суббурь. Они представлены на рис. 1 в виде диаграммы типа «радар», где каждый угол отсчитывается от центра на расстояние, соответствующее уровню параметров. Отсчет параметров начинается справа и далее по кругу против часовой стрелки.

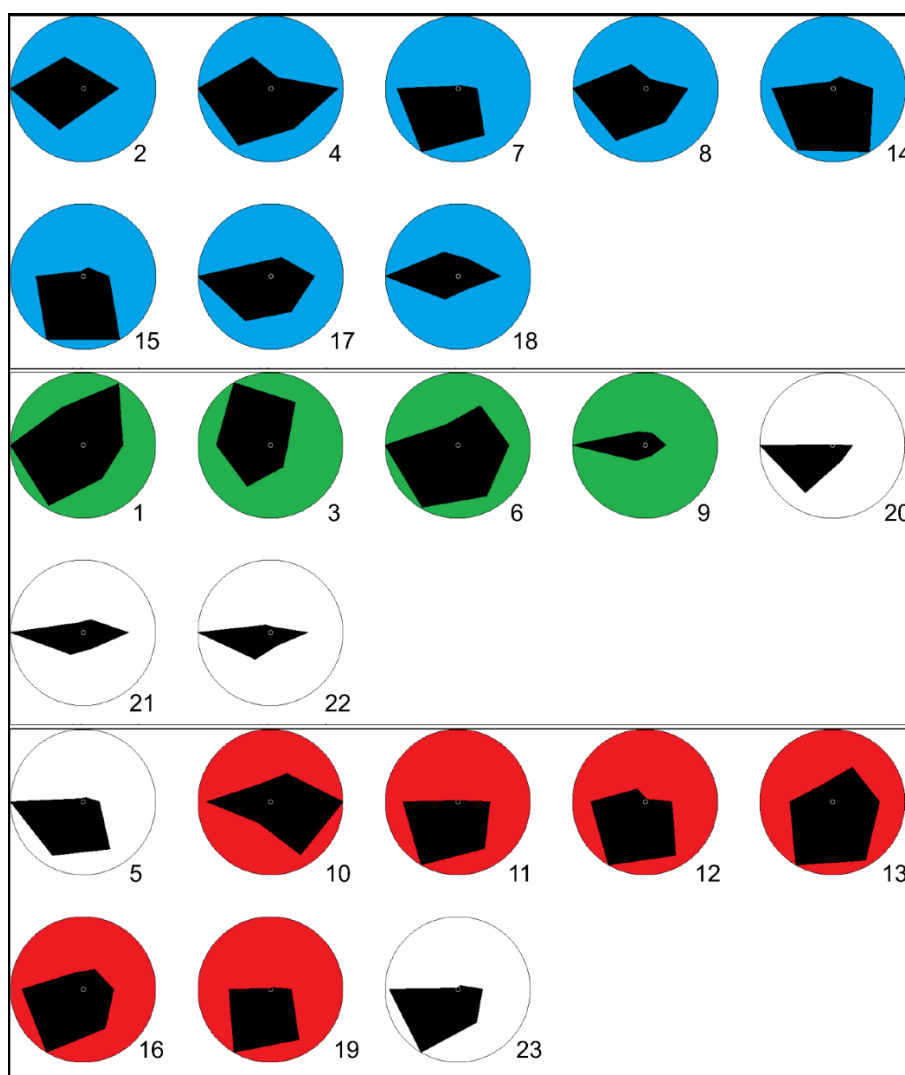


Рисунок 1. Результаты совместной классификации событий, ассоциированных с телами МО. Одинаковым цветом в каждой группе (синий – класс 1, зеленый – класс 2, красный – класс 3) показаны согласованные с предыдущим результатом в [5] случаи. Числами указаны номера событий МО из таблицы 1. Порядок построения данных: экстремум B_z , экстремум NV^2 , интегральный NV^2 , интегральный SYM/H , экстремум AL , интегральный AL .

Заключение и выводы

Численные эксперименты показали, что наиболее успешная совместная классификация возможна при включении в расчет следующих параметров: экстремум B_z , экстремум NV^2 , интегральный NV^2 , экстремум AL , интегральный AL . В число используемых параметров для новой классификации был включен индекс глобальной геомагнитной активности вычисляемой на основе SYM/H . Учет этого параметра позволил достичь наибольшей согласованности с результатами по определению трех ранее установленных классов. Класс 1 проявляется в динамике индекса AL в виде уединенных слабых суббурь с медленно изменяющейся B_z -компонентой в теле МО с точностью 77%; класс 2 – умеренные проявления суббуревой активности в динамике индекса AL в виде уединенных или серий суббурь, вызываемых интенсивными изменениями B_z в теле МО с точностью 62%; класс 3 – экстремальные проявления суббуревой активности в виде серий суббурь с экстремальными значениями индекса AL , отождествляемые со значительным ростом интегральной величины NV^2 в теле МО с точностью 85%. Каждый выделенный нами класс представляет

собой причинно-следственную связь типов суббурь с конкретным типом возмущений параметров солнечного ветра и ММП в теле магнитного облака.

Успешность выявления конкретных причинно-следственных классов содержащих совместные параметры причин суббуревой активности и ее развития указывает на нелинейные характеристики связи динамики AL индекса с параметрами МО. Важным является то обстоятельство, что результаты нейросетевой классификации вполне согласуются с физическими представлениями о процессах развития суббурь.

Список литературы

1. Nikolaeva N.S., Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G., Dependence of Geomagnetic Activity during Magnetic Storms on the Solar Wind Parameters for Different Types of Streams: 4. Simulation for Magnetic Clouds // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2014, Vol. 54, No. 2, pp. 152-161
2. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Зверев В.Л., Влияние параметров плазмы солнечного ветра на интенсивность изолированных магнитосферных суббурь // *Геомагнетизм и аэрoномия*, 2018, том 58, №3, с. 311-323, DOI:10.7868/S001679401803001X
3. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ундалова И.С., Нейросетевая классификация суббуревой активности, вызываемой магнитными облаками солнечного ветра // “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XLII Annual Seminar, Apatity, 2019, pp. 36-39, DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.36-39
4. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Проявление динамики параметров солнечного ветра на формирование суббуревой активности // *Геомагнетизм и аэрoномия*, 2017, том 57, №3, с. 273–279
5. Barkhatov N.A., Vorobjev V.G., Revunov S.E., Barkhatova O.M., Revunova E.A., Yagodkina O.I., Neural network classification of substorm geomagnetic activity caused by solar wind magnetic clouds // *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2020, Vol. 205, 105301, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105301>

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.008

СУПЕРСУББУРЯ 20 ДЕКАБРЯ 2015 ГОДА: МАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ НА РАЗНЫХ ШИРОТАХ

А.А. Любич¹, И.В. Дэспирак¹, Н.Г. Клейменова², Р. Вернер³

¹ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия

²Институт Физики Земли (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

³Институт Космических Исследований и Технологий (ИКИТ), БАН, г. Стара Загора, Болгария

Абстракт. Анализируется суперсуббуря (очень интенсивная суббуря с SML индексом ~ 2100 нТл), наблюдавшаяся 20 декабря 2015 года (с началом в 16:13 UT) во время интенсивной магнитной бури, вызванной воздействием на магнитосферу магнитного облака с устойчивым южным направлением ММП. Показано, что ионосферные токи, соответствующие этой суперсуббуре, развивались в глобальном масштабе – от поздне-утреннего до вечернего секторов. Во время ее развития наблюдался очень интенсивный западный электроджет с максимумом в утреннем секторе (~ 06 MLT). В вечернем секторе (~ 18 MLT) наблюдался восточный электроджет. Во время взрывной фазы суббури в вечернем секторе наблюдались вариации магнитного поля, соответствующие появлению дополнительного токового клина обратного направления. Развитие суббури сопровождалось появлением большой положительной вариации X-компоненты магнитного поля на геомагнитных широтах от $\sim 60^\circ$ до $\sim 50^\circ$, что могло привести к наблюдаемому импульсу MPV-индекса (Midlatitude Positive Bay index).

Введение

Схема развития суббури впервые была разработана более полувека назад (Акасофу, 1971; Старков и Фельдштейн, 1971; Исаев и Пудовкин, 1972). За прошедшие годы многократно проводилась классификация суббурь по различным характерным признакам, выделялись их отдельные типы, разрабатывались физические модели суббурь, в общем, происходило накопление и анализ новых фактов. Этим вопросам посвящен огромный пласт литературы. Не будем его здесь вскрывать, а сразу перейдем к интересующему нас вопросу. Относительно недавно в отдельный класс были выделены суперсуббури (Tsurutani et al., 2015). Суперсуббуриями (SSS) были названы интенсивные суббури, во время которых SML индекс опускался ниже -2500 нТл. Напомним, что изначально для оценки геомагнитной активности был предложен AL-индекс, рассчитываемый по геомагнитным станциям, расположенным в авроральной зоне. Однако, в очень возмущенные периоды, например, во время магнитных бурь, геомагнитная активность может сильно смещаться по широте, отдаляясь от «традиционных» авроральных станций. Чтобы, в частности, лучше учесть такие смещения был предложен SML индекс, рассчитываемый по большему числу станций SuperMAG, включая станции, расположенные экваториальнее и полярнее авроральных широт (Newell and Gjerloev, 2011; Gjerloev, 2012). Отметим, что выбранный критерий суперсуббурь $SML < -2500$ нТл не имеет четких физических обоснований, то есть, является, в некотором смысле, произвольным. Иногда суперсуббуриями называют и чуть менее интенсивные события. Например, Дэспирак и др. [2021] использовали более мягкий критерий $SML < -2200$ нТл. Zong et al. [2021] суббури с $1000 < AE < 2000$ нТ называли сильными, а для SSS – $AE > 2000$ нТ. Установлено, что SSS обычно наблюдаются во время прохождения магнитных облаков (MC) солнечного ветра (СВ) или предшествующей им переходной области (Sheath), при высоких плотностях солнечного ветра (СВ) и больших отрицательных значениях B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) (Hajra et al., 2016). До сих пор ученые спорят, являются ли SSS просто очень интенсивными суббуриями или они обладают специфическими особенностями, отличающими их от обычных суббурь, или даже представляют собой вообще особый класс явлений.

Еще на заре исследования суббурь предполагали, что с ними связаны свои ионосферные токовые системы (например, Пудовкин и др. [1977]). Токовую систему суббури DP_1 разделяли на две части - DP_{11} и DP_{12} . Система DP_{12} является относительно стабильной, существующей на всех фазах суббури, системой. С ней связаны западный (в утреннем секторе) и восточный (в вечернем секторе) электроджеты. Ее можно назвать реальной токовой системой, так как с ней связаны реальные ионосферные токи, например, токи растекания, текущие в ионосфере средних широт и полярной шапки. Токовая система DP_{11} , в свою очередь, связана с взрывной фазой суббури и обычно приводит к усилению западного электроджета в ночном секторе. Ее считают эквивалентной токовой системой, так как она обычно не связана с реальными токами, а является двумерным отражением трехмерной магнитосферно-ионосферной токовой системой. Такую трехмерную систему часто называют токовым клином суббури (SCW) (McPherron et al., 1973). Zong et al. [2021], Fu et al.

[2021] пришли к выводу, что во время суперсуббурь, в отличие от обычных суббурь, в вечернем секторе образуется дополнительный токовый клин обратного направления (втекающий ток расположен западнее вытекающего), приводящий к усилению восточного электроджета.

Следствием развития токового клина суббури является появление положительной бухты в X-компоненте геомагнитного поля на средних широтах (McPherron et al., 1973). В развитие этой идеи недавно был предложен МРВ (Midlatitude Positive Bay) индекс (Chu et al. [2015], McPherron and Chu [2016, 2018]). На данный момент методика его вычисления продолжает шлифоваться. Существуют два слегка отличающихся списка МРВ индекса за период примерно с 1982 года. Их можно найти в дополнительной информации к интернет-версии статьи McPherron and Chu [2018]. Различия в методиках расчета описаны, например, в работе McPherron and Chu [2016]. Главное для нас различие: список McPherron получен по данным 36 станций с геомагнитной широтой λ_{mag} между -50° и 50° , тогда как список Chu составлен по данным 41 станции северного и южного полушарий с $20^\circ < |\lambda_{mag}| < 52^\circ$.

Мы проанализируем суперсуббурю, наблюдавшуюся 20 декабря 2015 года. Определим, имеет ли она особенности в развитии, отличающие ее от типичной суббури. Заодно рассмотрим, какие возмущения она создает на средних широтах.

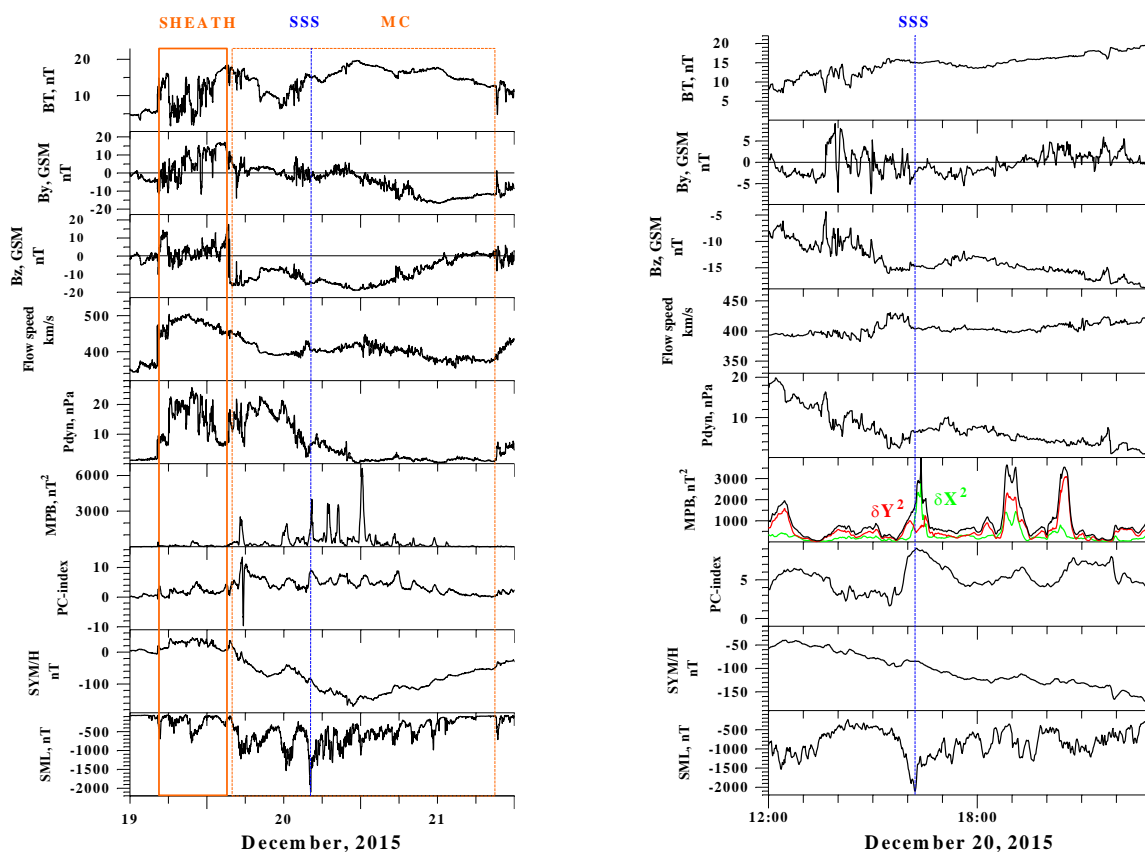


Рисунок 1. Модуль ММП, V_Y и V_Z компоненты ММП (в системе GSM), скорость и динамическое давление СВ, геомагнитные индексы МРВ, PC, SYM/H и SML за период с 12 UT 19 декабря до 24 UT 21 декабря 2015 года (слева) и с 12:00 до 23:00 UT 20 декабря (справа).

Описание события

Посмотрим на Рис. 1, где показано поведение ММП, некоторые параметры СВ и геомагнитные индексы за интервал с 12 UT 19 декабря до конца 21 декабря 2015 года (слева). Детальней показан период с 12 до 23 UT 20 декабря (справа). Мы видим прохождение мимо Земли магнитного облака, перед которым располагается переходная область (Sheath). СВ является относительно медленным, его скорость максимальна в переходной области и не превышает 505 км/с. В этом событии наблюдается очень высокая плотность солнечного ветра (до ~ 50 частиц в см^3 в переходной области и до ~ 70 частиц в см^3 в начале MC), за счет чего имеем высокое динамическое давление СВ. В магнитном облаке наблюдается устойчиво отрицательная V_Z компонента магнитного поля (опускается до -19 нТл). За счет высокой плотности СВ и отрицательной V_Z -компоненты ММП наблюдается большой приток энергии в магнитосферу. В результате на Земле разыгралась магнитная буря (Dst индекс достигал -155 нТл, SYM/H опускался до -170 нТл, что соответствует интенсивной магнитной буре согласно, например, Hajra et al. [2016]). Во время магнитной бури наблюдалось несколько

суббури. Во время одной из них, в 16:13 UT, SML-индекс опустился до ~ -2100 нТл, в этот момент AE-индекс был равен 1946 нТл. Это событие чуть-чуть не дотягивает до суперсуббури согласно «мягкому» критерию Дэспирак и др. [2021] ($SML < -2200$ нТл) и попадает почти точно на границу между сильными суббуриями и SSS согласно Zong et al. [2021] ($AE = 2000$ нТл). Не будем здесь заниматься «крючкотворством» и отнесем это событие к суперсуббуре. Во время магнитной бури наблюдалось несколько всплесков среднеширотного MPB-индекса. Во время суперсуббури, в 16:23 UT, этот индекс, являющийся средней суммой квадратов вариаций горизонтальных компонент магнитного поля на станциях в ночном секторе, достигал ~ 4000 нТл². Здесь мы использовали список Chu (McPherron and Chu [2018]). Максимум был достигнут в основном за счет вариаций δX^2 (зеленая линия на правом графике). Наблюдаемое значение MPB индекса намного превышает минимальное пороговое значение (25 нТл²), используемое при отборе событий при анализе связи индекса с суббуревой активностью (McPherron and Chu [2016, 2018]). Отметим, что во время прохождения магнитного облака были и другие всплески MPB индекса, вплоть до 6600 нТл²; прямой связи между величиной MPB индекса и амплитудой вариации SML индекса здесь не наблюдается.

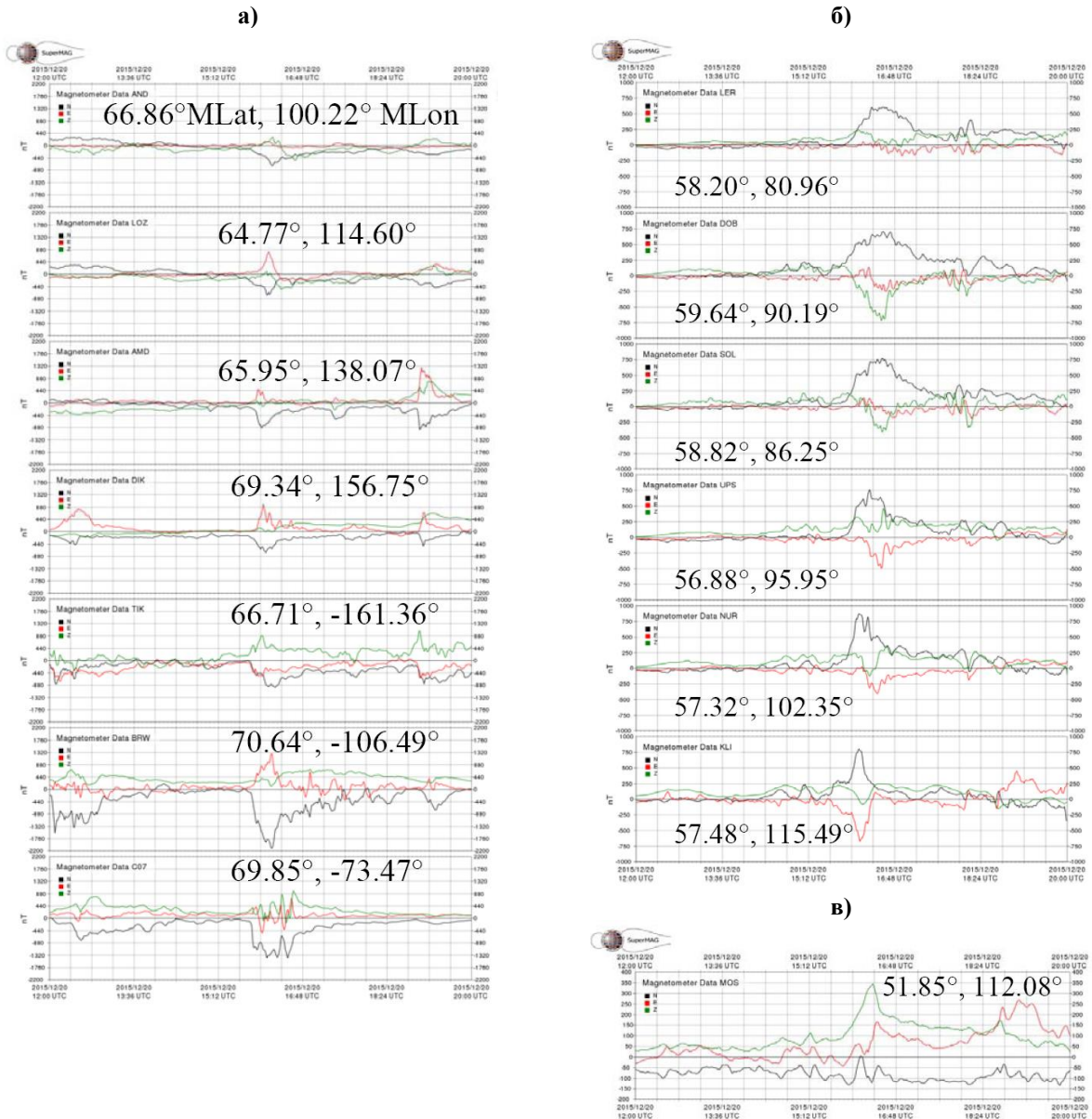


Рисунок 2. Магнитограммы станций сети SuperMAG с 10:00 до 20:00 UT 20 декабря 2015 года. **а)** На геомагнитных широтах $\sim 65 - 70^\circ$ (геомагнитные широта и долгота указаны на графиках) для станций Andenes (AND), Ловозеро (LOZ), Амдерма (AMD), Диксон (DIK), Тикси (TIK), Barrow (BRW) и Norman Wells (C07) [диапазон изменений по оси Y от -2200 до $+2200$ нТл]; **б)** На геомагнитных широтах $\sim 56 - 60^\circ$ для станций Lerwik (LER), Dombas (DOB), Solund (SOL), Uppsala (UPS), Nurmijärvi (NUR) и Климовская (KLI) [диапазон по оси Y от -1000 до $+1000$ нТл]; **в)** На станции Москва (MOS) [диапазон по оси Y от -200 до $+400$ нТл].

Вариации магнитного поля на земной поверхности и на низкой околоземной орбите

Рассмотрим Северное полушарие. Во время суперсуббури (минимум SML индекса был зарегистрирован в 16:13 UT) цепочка станций IMAGE располагалась в вечернем секторе, MLT ~ 17-18 часов. Над Канадой и Аляской было утро, MLT ~ 5-7 часов, в Сибири была ночь. Анализ данных цепочки IMAGE показал, что на северных станциях, от Ny-Ålesund ($\lambda_{\text{mag}} \approx 75.3^\circ$) до Oulujärvi ($\lambda_{\text{mag}} \approx 61.0^\circ$), наблюдалась отрицательная бухта в X-компоненте магнитного поля (самая глубокая бухта ~ -850 нТл была зарегистрирована в Ranua, $\lambda_{\text{mag}} \approx 62.1^\circ$). В это время южнее, от Mekrijärvi ($\lambda_{\text{mag}} \approx 59.1^\circ$) до Birzai ($\lambda_{\text{mag}} \approx 52.3^\circ$) видна положительная бухта, имеющая максимум также ~850 нТл на $\lambda_{\text{mag}} \sim 57^\circ$. Цепочка станций IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>) имеет высокую плотность магнитометров, хорошее временное разрешение (10 с), но ограничена в пространстве. Для анализа поведения магнитного поля на разных долготах удобнее использовать базу данных SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>). На Рисунке 2 показаны магнитограммы на разных долготах. От вечернего до утреннего секторов, от севера Норвегии (AND) через Сибирь до северо-запада Канады (C07), почти одновременно видна отрицательная бухта в X-компоненте. Возмущения максимальны в утреннем секторе, на Аляске (BRW). В это же время при $\lambda_{\text{mag}} \sim 56 - 60^\circ$ видна положительная бухта в X-компоненте от севера Шотландии (LER) через юг Скандинавии до юга Архангельской области (KLI). Видна ли эта бухта восточнее, за Уралом – неизвестно, нет данных на нужных широтах. При движении на запад импульс расширяется, а время регистрации немного возрастает. Положительный импульс виден и на широтах ~52°, в Москве, Казани и около Екатеринбурга. В Москве амплитуда импульса превышает 100 нТл. Отметим, что Москва попадает в диапазон широт, используемый Chu (*McPherron and Chu* [2018]) для расчета МРВ-индекса, хотя и не входит в его список используемых станций.

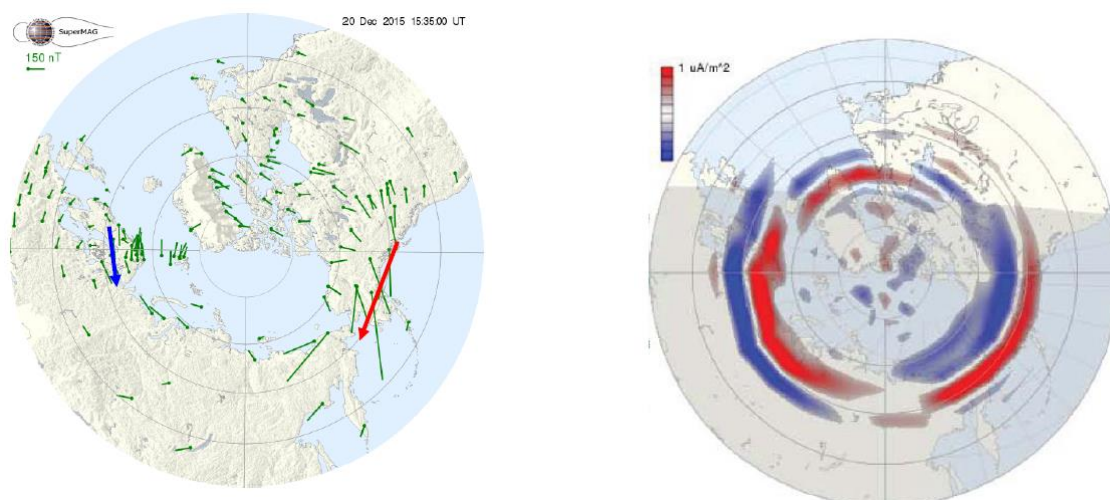
С помощью данных магнитометров сети SuperMAG можно получить пространственную картину вариаций магнитного поля. На сайте <http://supermag.jhuapl.edu/>, используя измерения магнитного поля с одноминутным разрешением, строят мгновенную карту векторов в Северном и/или Южном полушарии. Мы использовали карту векторов магнитного поля, повернутых на 90° градусов по часовой стрелке, в геомагнитных координатах для Северного полушария. В предположении, что вариации магнитного поля создаются токами растекания в ионосфере, такие повернутые вектора указывают направление ионосферного тока. Длина вектора соответствует величине вариаций магнитного поля (или плотности тока). Вначале, на предварительной фазе суббури, мы видим западный (в утреннем секторе) и восточный (в вечернем секторе) электроджеты. На рис. 3а слева электроджеты схематически показаны красной и синей стрелками. На взрывной фазе суббури сильно возрастает величина западного электроджета, восточный электроджет также усиливается. На рис. 3б (и 3в) слева восточный электроджет схематически показан синей стрелкой. Затем в вечернем секторе начинает наблюдаться вращение векторов вокруг восточного электроджета. Южнее (севернее) электроджета поворот осуществляется по (против) часовой стрелки. На рис. 3в области поворота векторов схематически отмечены синими овалами с указанием их долготных размеров. Наблюдаемая картина соответствует появлению в вечернем секторе дополнительного токового клина суббури, что подтверждает выводы *Zong et al.* [2021] и *Fu et al.* [2021]. Затем, на фазе восстановления, возмущения начинают затухать.

Сеть SuperMAG дает, так сказать, взгляд на ионосферу снизу, с земной поверхности. Но можно посмотреть на ионосферу и сверху, с низкой околоземной орбиты. Такую возможность предоставляет, например, проект AMPERE (Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment). Используя измерения магнитного поля на спутниках связи Iridium, имеющих круговую полярную орбиту высотой около 780 км, получают карту распределения вариаций горизонтальных компонент магнитного поля на этой высоте. Решая обратную задачу, восстанавливают вертикальные токи, способные создать наблюдаемые вариации. Используемая математическая процедура и описание создаваемого научного продукта приведены, например, в работах *Anderson et al.* [2014], *Waters et al.* [2020]. Карты распределения вариаций магнитного поля и вертикальных токов доступны на сайте <http://ampere.jhuapl.edu/>. Для трех рассмотренных выше моментов времени карты эквивалентных вертикальных токов показаны на рис. 3 в правой колонке. Карты пространственного распределения втекающих и вытекающих токов, в целом, неплохо согласуются со схемой, показанной в работе *Iijima and Potemra* [1978]. В вечернем секторе, в области появления дополнительного токового клина, на карте токов появляется дополнительная область втекающего тока (правая часть рис. 3в). Этот дополнительный втекающий ток на картах AMPERE наблюдается в интервале 16:00 – 16:30 UT (карты строятся за 10-минутный интервал) на широтах ~50-55°.

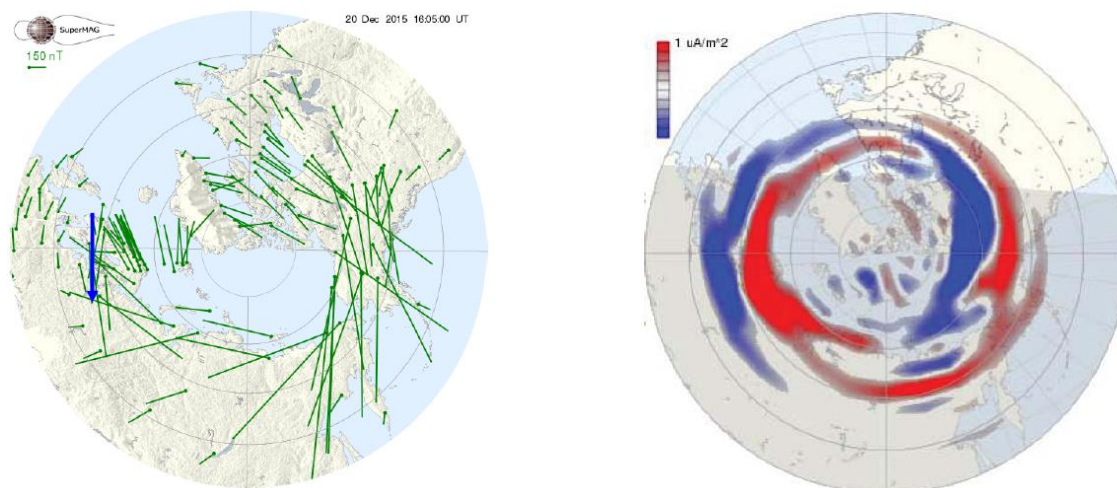
Результаты и их обсуждение

Подведем итоги анализа суперсуббури, наблюдавшейся 20 декабря 2015 года в ~16:13 UT. Суперсуббурия наблюдалась во время прохождения мимо Земли магнитного облака при устойчиво южном направлении межпланетного магнитного поля (в момент SSS B_z ММП ~ -15 нТл). В это время на Земле была зарегистрирована интенсивная магнитная буря. Согласно результатам работы *Hajra et al.* [2016] комбинация условий (южное ММП, МС и магнитная буря) были благоприятны для возникновения суперсуббурии.

а)



б)



в)

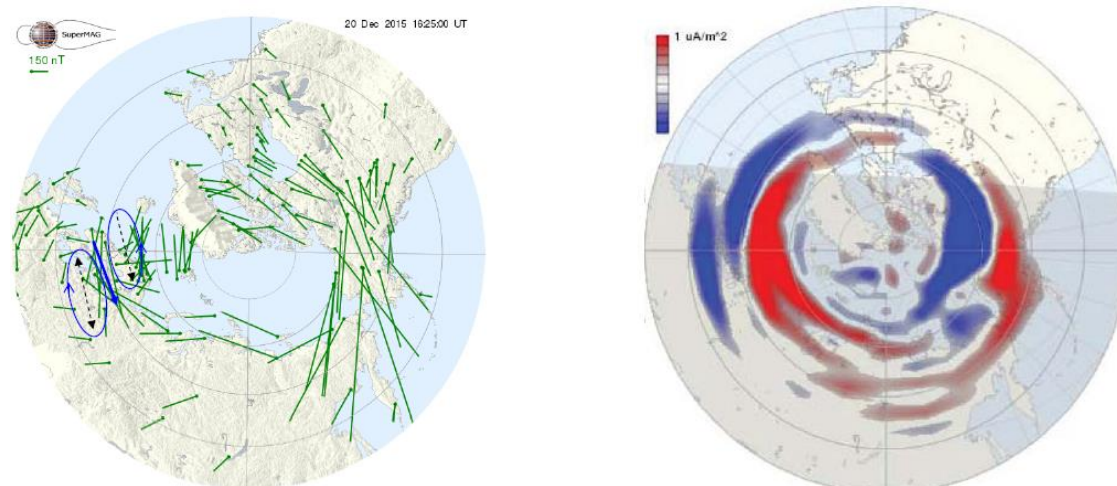


Рисунок 3. Слева показана карта вариаций магнитного поля по данным сети SuperMAG. На карте вектора магнитного поля повернуты на 90 по часовой стрелке, показывая направление эквивалентных ионосферных токов. Справа построена карта втекающих (синий цвет) и вытекающих (красный цвет) ионосферных токов по данным проекта AMPERE. Карты построены в геомагнитных координатах для северного полушария для трех моментов времени: 15:35 (а), 16:05 (б) и 16:25 UT (в). Начальная широта - 40° градусов. Полдень вверху карты, полночь – внизу, 06 MLT – справа и 18 MLT – слева.

В ионосфере суперсуббури развивалась в глобальном масштабе: от поздне-утреннего до вечернего сектора. Во время ее развития наблюдался очень интенсивный западный электроджет, максимум которого отмечался в утреннем секторе (~06 MLT). В вечернем секторе (~18 MLT) наблюдался восточный электроджет. Во время взрывной фазы суббури в вечернем секторе наблюдалась токовая структура, соответствующая появлению дополнительного токового клина обратного направления. Эти факторы (глобальный масштаб и дополнительный токовый клин в вечернем секторе) отличают SSS от обычной суббури. Наблюдаемый характер развития суперсуббури согласуется с результатами *Zong et al.* [2021], *Fu et al.* [2021], *Дэспирак и др.* [2021].

Во время суперсуббури наблюдался интенсивный импульс МРВ-индекса (~ 4000 нТл²). В это время наблюдался положительный импульс в X-компоненте геомагнитного поля на геомагнитных широтах от ~60 до ~50°. В Москве, на широте ~52°, амплитуда вариации X-компоненты превышала 100 нТл. Можно предположить, что большая амплитуда МРВ-индекса может быть связана со смещением к экватору во время магнитной бури ионосферных проекций многих магнитосферных структур, таких как авроральный овал, плазмопауза и другие. В это время станция, обычно находящаяся на средних широтах (в геомагнитном смысле), может попасть в субавроральные или даже в авроральные широты.

Благодарности. Параметры ММП, плазмы солнечного ветра и индекса магнитной активности взяты на сайте <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>. Карты распределения втекающих и вытекающих ионосферных токов взяты с сайта <http://ampere.jhuapl.edu/>. Авторы благодарны создателям баз магнитных данных IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>) и SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>). Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект No. 20-55-18003_Болг_а и Национальным Научным Фондом Болгарии (NSFB), проект номер КП-06-Русия/15.

Литература

- Акасофу С.-И., Полярные и магнитосферные суббури. М.: Мир, 1971, 316 с.
- Дэспирак И.В., Любчик А.А., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Громов С.В., Малышева Л.М., Долготные геомагнитные эффекты суперсуббури во время магнитной бури 9 марта 2012 г., Известия РАН. Серия физическая, 2021, Т.85, №3, С.346-352. doi: 10.31857/S0367676521030108 [Despirak I.V., Lyubchich A.A., Kleimenova N.G., Gromova L.I., Gromov S.V., Malysheva L.M., Longitude geomagnetic effects of the supersubstorms during the magnetic storm of March 9, 2012, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2021, V.85, No.3, P.246–251. doi: 10.3103/S1062873821030096]
- Исаев С.И., Пудовкин М.И., Полярные сияния и процессы в магнитосфере Земли. Л.: Наука, 1972, 244 с.
- Пудовкин М.И., Козелов В.П., Лазутин Л.Л., Трошичев О.А., Чертков А.Д., Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. М.: Наука, 1977, 312 с.
- Старков Г.В., Фельдштейн Я.И., Суббури в полярных сияниях. Геомагнетизм и аэрномия, 1971, Т. 11, С. 560-562.
- Anderson B.J., Korth H., Waters C.L., Green D.L., Merkin V.G., Barnes R.J., Dyrud L.P., Development of large-scale Birkeland currents determined from the Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment. Geophysical Research Letters, 2014, V.41, No.9, P.3017-3025. doi: 10.1002/2014GL059941
- Chu X., McPherron R.L., Hsu T.-S., Angelopoulos V., Solar cycle dependence of substorm occurrence and duration: Implications for onset. JGR Space Physics, 2015, V.120(4), P.2808–2818. <https://doi.org/10.1002/2015JA021104>
- Fu H., Yue C., Zong Q.-G., Zhou X.-Z., Fu S., Statistical characteristics of substorms with different intensity. JGR Space Physics, 2021, V.126, No.8, e2021JA029318. <https://doi.org/10.1029/2021JA029318>
- Gjerloev J.W., The SuperMAG data processing technique. JGR, 2012, V.117, No.A9, A09213. <https://doi.org/10.1029/2012JA017683>
- Hajra R., Tsurutani B.T., Echer E., Gonzalez W.D., Gjerloev J.W., Supersubstorms (SML < -2500nT): Magnetic storm and solar cycle dependences. JGR, 2016, V.121, No.8, P.7805-7816. doi:10.1002/2015JA021835
- Iijima T., Potemra T.A., Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms. JGR, 1978, V.83, No.A2, P. 599-615. <https://doi.org/10.1029/JA083iA02p00599>
- McPherron R.L., Chu X., The mid-latitude positive bay and the MPB index of substorm activity. Space Science Reviews, 2016, V.206 (1–4), P.91–122. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0316-6>
- McPherron R.L., Chu X., The midlatitude positive bay index and the statistics of substorm occurrence. JGR Space Physics, 2018, V.123, P.2831–2850. <https://doi.org/10.1002/2017JA024766>
- McPherron R.L., Russell C.T., Aubry M.P., Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968; 9. Phenomenological model for substorms. JGR, 1973, V.78, No.16, P. 3131-3149.
- Newell P.T., Gjerloev J.W., Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power, JGR, 2011, V.116, A12211. doi:10.1029/2011JA016779
- Tsurutani B.T., Hajra R., Echer E., Gjerloev J.W. Extremely intense (SML ≤ -2500 nT) substorms: isolated events that are externally triggered? Ann. Geophys., 2015, V.33, P.519–524.
- Waters C.L., Anderson B.J., Green D.L., Korth H., Barnes R.J., Vanhamäki H., Science Data Products for AMPERE. In: Dunlop M., Lühr H. (eds) Ionospheric Multi-Spacecraft Analysis Tools. ISSI Scientific Report Series, 2020, vol 17. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26732-2_7
- Zong Q.-G., Yue C., Fu S.-Y., Shock induced strong substorms and super substorms: Preconditions and associated oxygen ion dynamics. Space Science Review, 2021, V.217:33. <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00806-x>

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.009

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ИНДИКАТОРОВ МАГНИТОСФЕРНОГО КОЛЬЦЕВОГО ТОКА

Г.А. Макаров

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук», Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера
СО РАН, г. Якутск, 677980, Россия; e-mail: gmakarov@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Исследуются вариации среднесуточных значений геомагнитных индексов Dst, SYM-H и ASY-H. Установлено, что SYM-H и ASY-H линейно растут по модулю с ростом модуля Dst и в течение года имеют возрастания в периоды равноденствий. Модуль отношения (SYM-H)/(ASY-H) растет с ростом модуля Dst и приближается к 1, что означает сравнимость симметричного и асимметричного компонент кольцевого тока.

1. Введение

Индексы Dst, SYM и ASY являются геомагнитными характеристиками магнитосферного кольцевого тока, Dst отражает интенсивность кольцевого тока [Sugiura and Kamei, 1991], SYM и ASY дают информацию о симметричной и асимметричной компонентах кольцевого тока [Iyemori et al., 2010].

Исследования сезонных изменений индекса Dst не потеряли актуальности по сей день. Их рассмотрение было продолжено в работах [Mayaud, 1978], [Cliver et al., 2001], [Takalo and Mursula, 2001], [Hakkinen et al., 2003], [Temerin and Li., 2006], [Макаров, 2020] и др. Обычно объяснения причин сезонных вариаций основаны на изменении ориентации геомагнитного диполя относительно топологии гелиосферы.

Изучая вариации индексов SYM, ASY и Dst, авторы работ [Iyemori et al., 2010] и [Weygand and McPherron, 2006] выявили, что в них содержатся смещения, отражающие тот факт, что эти индексы отличны от нулевых значений в спокойное время. Было выяснено, что смещения представляют собой суммарный вклад нескольких токовых систем, присутствующих в магнитосфере в спокойные от магнитных бурь периоды.

Авторы работы [Kalegaev and Makarenkov, 2008] определили относительные вклады кольцевого тока и магнитосферного хвостового тока в Dst и установили, что кольцевой ток становится доминирующим источником Dst во время сильных магнитных бурь, но во время умеренных бурь его вклад в Dst сопоставим со вкладом хвостового тока. В работе [Dubyagin et al., 2014] с использованием эмпирических моделей магнитосферы был изучен относительный вклад различных токовых систем в индексы SYM и ASY: симметричного кольцевого тока; тока поперек магнитосферного хвоста; ионосферных токов замыкания системы частичного кольцевого тока и продольных токов зон 1 и 2; чисто ионосферных токовых систем.

Кольцевой ток является важным образованием в магнитосфере Земли и играет ключевую роль в развитии геомагнитных бурь. Исследования солнечно-земных связей и проявлений космической погоды часто осуществляется посредством статистических работ, в частности, с использованием среднесуточных значений земных, межпланетных и солнечных параметров. При суточном осреднении земных параметров разные фазы геомагнитных бурь могут накладываться, информация о бурях (фазы, интенсивность, длительность и др.) будет в значительной мере нивелироваться. В этой связи, представляется интересным исследовать изменения среднесуточных значений геомагнитных индексов SYM-H и ASY-H. Целью работы является рассмотрение сезонных вариаций индексов SYM-H, ASY-H по их среднесуточным данным.

2. Вариации индексов Dst, SYM-H и ASY-H

В работе используются геомагнитные индексы Dst, SYM-H и ASY-H за период 1981-2016 гг. Данные об индексах, полученные из Мирового центра по геомагнетизму в Японии (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>), усреднены посуточно по временной шкале UT. Всего этот период содержит 13149 дней, в том числе дней, когда Dst>0 нТл, было 2307, Dst=0 нТл – 321 и Dst<0 нТл – 10521.

На рис. 1 показаны сезонные изменения среднесуточных значений индексов Dst, SYM-H и ASY-H, осредненные за весь период настоящего анализа. Видно, что все 3 индекса претерпевают изменения с заметными полугодовыми возрастаниями абсолютных значений в периоды равноденствий, при этом средние за год значения индексов Dst, SYM-H и ASY-H равны –15.5 нТл, –14.0 нТл и 21.1 нТл соответственно. Поведение индексов Dst и SYM-H подобно, что ранее было отмечено в [Iyemori, 2010; Weygand and McPherron, 2006]. Гармонический анализ сезонных изменений дал следующие результаты: для индекса Dst амплитуда первой гармоники R1=2.82 нТл, фаза φ1 минимальных значений приходится на ~ 6

марта, амплитуда второй гармоники $R_2=4.98$ нТл, фаза φ_2 минимальных значений приходится на ~ 17 марта и 17 сентября; для индекса SYM-H $R_1=0.62$ нТл, $\varphi_1 \sim 28$ марта, $R_2=2.89$ нТл, $\varphi_2 \sim 23$ марта, 23 сентября; для индекса ASY-H $R_1=0.74$ нТл, φ_1 максимальных значений приходится на ~ 18 мая, $R_2=1.75$ нТл, φ_2 максимальных значений приходится на ~ 11 марта, 11 сентября. У всех трех индексов первые гармоники вариаций имеют незначительные амплитуды, а вторые гармоники отличаются достаточно заметными амплитудами – у Dst R_2 почти в 2 раза больше, чем R_1 , у SYM-H это соотношение почти в 5 раз, у ASY-H в 2.5 раза. Фазы φ_2 всех индексов практически совпадают и наблюдаются в периоды равноденствий. Отношения амплитуд вторых гармоник сезонных вариаций индексов к их среднегодовым значениям равны: у Dst -0.3 , у SYM-H -0.2 и у ASY-H 0.1 . Это говорит о том, что полугодовые вариации индексов существенны, особенно Dst и SYM-H. Отсюда можно предположить, что симметричная компонента магнитосферного кольцевого тока довольно заметно подвержена сезонным изменениям, в отличие от асимметричной компоненты.

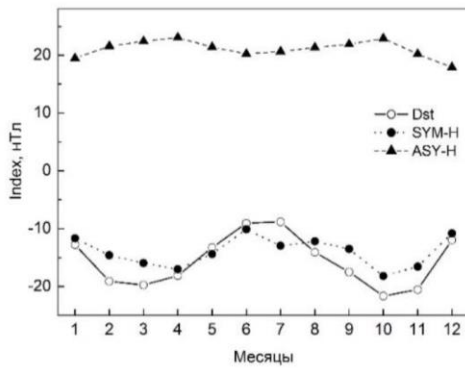


Рисунок 1. Сезонные изменения индексов Dst, SYM-H и ASY-H за весь рассматриваемый период, Index – один из этих индексов.

кольцевого тока и других токов, так и из медленно меняющейся не буревой составляющей. Сделано заключение, что классический равноденственный эффект, по-видимому, доминирует в буревой компоненте, составляя 20-40% амплитуды 6-месячной волны в Dst против ~ 10% для комбинированного механизма, включающего аксиальный эффект и эффект Рассела-МакФеррона [Russell and McPherron, 1973]. Предполагается, что не буревая составляющая 6-месячной волны в Dst обусловлена эффектом, описанным в [Malin and Isikara 1976] и связанным с полугодовым изменением средней широты кольцевого тока.

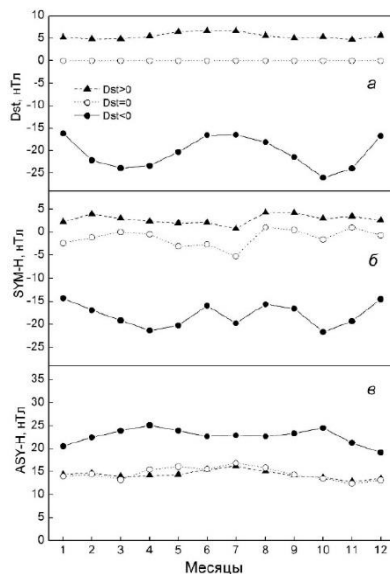


Рисунок 2. Сезонные изменения индексов Dst (а), SYM-H (б) и ASY-H (в) при разных значениях Dst.

Первые гармоники всех 3-х индексов имеют небольшие амплитуды и, по-видимому, обусловлены неоднородностью сети станций [Mayaud, 1978; Данилов и Макаров, 1992; Hakkinen et al., 2003]. Действительно, более однородная сеть станций индексов SYM-H и ASY-H практически исключает образование годовых волн у этих индексов.

Образование вторых гармоник у индексов, вероятно, связано с углом между направлением солнечного ветра и геомагнитной экваториальной плоскостью. Когда угол принимает 90° , то в магнитосфере создаются благоприятные условия для инжекции заряженных частиц из плазменного слоя в область кольцевого тока. В работе [Cliver et al., 2001] получено, что сезонная модуляция Dst состоит как из буревой составляющей, возникающей в результате быстрых изменений

в работе [Данилов и Макаров, 2006] возникновение полугодовых вариаций Dst объясняется перемещением плазменного слоя относительно плоскости геомагнитного экватора при годовом обращении Земли вокруг Солнца и последующим изменением интенсивности частичного кольцевого тока. Наибольшая вероятность поступления частиц в магнитосферу имеет место в периоды равноденствий, наименьшая – в периоды солнцестояний. Подобное объяснение предложено в работе [Mayaud, 1978], в которой происхождение полугодовой вариации Dst связывается с эффектом Малина – Исикары: при годовом обращении Земли вокруг Солнца кольцевой и хвостовой токи смещаются на север зимой (Северное полушарие) и на юг летом в результате сжатия магнитосферы солнечным ветром. Эффект Малина – Исикары был применен также для объяснения годовой и суточной Dst-вариаций [Mayaud, 1978; Cliver et al., 2001; Takalo and Mursula, 2001]. Различие схем, предложенных в работах [Данилов и Макаров, 2006] и [Malin and Isikara, 1976], состоит в том, что мы учитываем смещение относительно геомагнитного экватора плазменного

слоя как источника частиц кольцевого тока, тогда как во второй работе рассматривается изменение в течение года средней широты кольцевого тока. Предположения об изменении расположения частичного кольцевого тока относительно плоскости геомагнитного экватора [Данилов и Макаров, 2006; Malin and Isikara, 1976], на наш взгляд, подтверждаются результатами работы [Liu et al., 2019], в которой по данным коллаборации SuperMAG было получено положение кольцевого тока по магнитной широте при развитии интенсивных геомагнитных бурь.

3. Зависимость индексов от уровня магнитной возмущенности

Рассмотрим влияние уровня возмущенности на индексы. На рис. 2 приведены сезонные ходы индексов Dst, SYM-H и ASY-H для разных значений индекса Dst: Dst>0 нТл, Dst=0 нТл и Dst<0 нТл.

На рис. 2 можно заметить, что во всех случаях 3 индекса изменяются в течение года, но наиболее выражено при Dst<0 нТл. При Dst<0 нТл изменения индексов подобны их сезонным вариациям, представленным на рис. 1, и также имеют равноденственные максимумы. Абсолютные значения индексов при спокойных условиях, когда Dst>0 нТл и Dst=0 нТл, не сильно изменяются в течение года, но возрастают по мере изменения знака Dst с положительного на отрицательный. Индексы Dst и SYM-H проявляют подобные между собой изменения, однако при Dst=0 нТл видны отклонения SYM-H величиной до ± 3 нТл относительно среднегодового значения -1.23 нТл. Отметим практически одинаковое поведение индекса ASY-H при Dst>0 нТл и Dst=0 нТл, причем ASY-H в этих условиях примерно равен 14.6 нТл. Этот факт можно рассматривать как постоянное наличие асимметричного кольцевого тока в магнитосфере, даже в спокойных условиях [Iyemori et al., 2010; Weygand and McPherron, 2006], в том числе при Dst>0 нТл, или как влияние ионосферных токов [Dubyagin et al., 2014].

На рис. 3 приведены корреляционные графики между Dst и SYM-H (а) и Dst и ASY-H (б), составленные по среднесуточным значениям индексов по всему массиву данных. Видно, что связи очень тесные, SYM-H по модулю и ASY-H растут с ростом модуля Dst, что можно интерпретировать как одновременное увеличение симметричного и асимметричного компонентов кольцевого тока по мере усиления магнитной возмущенности. Заметно, что симметричный компонент нарастает сильнее, чем асимметричный компонент.

Соотношения между индексами можно выразить уравнениями SYM-H = $0.86 \cdot \text{Dst} - 0.60$ с величиной достоверности линейной аппроксимации 0.88 и ASY-H = $-0.43 \cdot \text{Dst} + 14.40$ с величиной достоверности линейной аппроксимации 0.61 . Отметим, что уравнения содержат свободные члены (или смещения): в паре индексов SYM-H и Dst смещение равно -0.60 нТл, а в паре ASY-H и Dst 14.40 нТл. Существенное смещение у индекса ASY-H также может быть указанием на постоянное наличие частичного кольцевого тока в магнитосфере, даже в спокойных условиях [Iyemori et al., 2010] и [Weygand and McPherron, 2006].

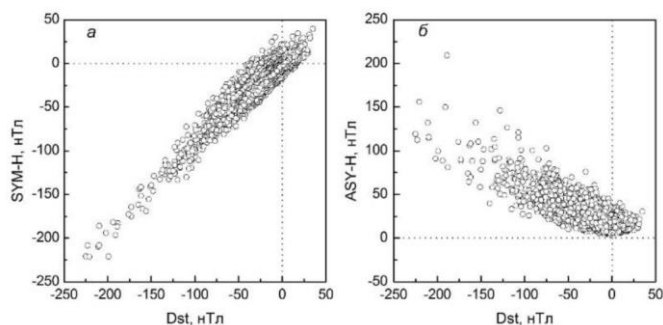


Рисунок 3. Сравнение среднесуточных значений индексов Dst и SYM-H (а), Dst и ASY-H (б). Пунктирные прямые нанесены относительно нулевых значений индексов.

4. О показателе симметрии кольцевого тока

Показателем степени симметрии кольцевого тока по определению [Weygand and McPherron, 2006] является отношение (SYM-H)/(ASY-H). На рис. 4 показаны сезонные изменения отношения (SYM-H)/(ASY-H) при разных значениях индекса Dst. Видны следующие особенности: во-первых, отношение (SYM-H)/(ASY-H) растет по абсолютной величине последовательно от случаев Dst>0 нТл и Dst=0 нТл к случаю Dst<0 нТл; во-вторых, при Dst<0 нТл отношение приближается к 1; в-третьих, вариации отношения имеют выраженные возрастания в равноденственные периоды. Следует заметить, что при нашем рассмотрении, когда за сутки усредняются эффекты всех фаз бури, а также эффекты спокойных периодов, показатель симметрии кольцевого тока, возможно, теряет физический смысл, но тем не менее качественные выводы можно получить. Первая особенность, вероятно, отражает полученное при рассмотрении вариаций индекса ASY-H на рис. 2 указание о постоянном наличии частичного кольцевого тока в магнитосфере, даже в спокойных условиях. Приближение отношения модулей индексов к 1 можно объяснить тем, что в буревые дни обе компоненты кольцевого тока усиливаются, однако в силу того, что фаза восстановления бури значительно продолжительнее, чем основная фаза бури, примерно в 3 и более раз, симметричный кольцевой ток сохраняется в течение большего времени и при суточном усреднении создает вклад в геомагнитные

изменения, сравнимый со вкладом частичного кольцевого тока во время основной фазы, когда интенсивность этого тока значительно сильнее. Третья особенность отражает наличие равноденственных максимумов в сезонном ходе магнитной активности.

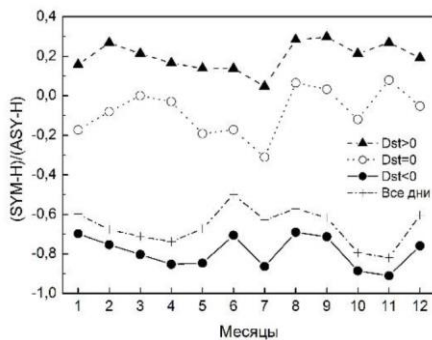


Рисунок 4. Сезонные изменения отношения индексов (SYM-H)/(ASY-H) при разных значениях Dst.

геомагнитных индексов SYM-H и ASY-H линейно растут по модулю с ростом модуля индекса Dst, что можно рассматривать как одновременное усиление симметричного и асимметричного компонентов кольцевого тока в магнитосфере, при этом симметричный компонент нарастает сильнее, чем асимметричный.

4. По среднесуточным данным установлено, что показатель степени симметрии кольцевых токов, отношение геомагнитных индексов (SYM-H)/(ASY-H), растет по модулю последовательно от случаев, когда $Dst \geq 0$, к случаю, когда $Dst < 0$ нТл; при $Dst < 0$ отношение приближается к 1, что означает сравнимость вкладов в индексы симметричного и асимметричного компонент кольцевого тока.

Литература

- Данилов А.А., Макаров Г.А. (1992), О влиянии распределения геомагнитных обсерваторий на суточные и сезонные вариации Dst-индекса, *Магнитосферные исследования*, М.: МГК РАН, № 18, 125–129.
- Данилов А.А., Макаров Г.А. (2006), Зависимость магнитной активности от расположения плазменного слоя относительно геомагнитного экватора, *Геомагнетизм и аэрномия*, Т. 46, № 2, 168–174.
- Макаров Г.А. (2020), Геометрический фактор в сезонных вариациях среднесуточных значений геомагнитного индекса Dst, *Солнечно-земная физика*, Т. 6, № 4, 59–66, doi: 10.12737/szf-64202008
- Cliver E.W., Kamide Y., Ling A.G., Yokoyama N. (2001), Semiannual variation of the geomagnetic Dst index: Evidence for a dominant nonstorm component, *J. Geophys. Res.*, 106, No. A10, 21297–21304.
- Dubyagin S., Ganushkina N., Kubyshkina M., Liemohn M. (2014), Contribution from different current systems to SYM and ASY midlatitude indices, *J. Geophys. Res.*, 119, 7243–7263, doi:10.1002/2014JA020122
- Hakkinen L.V.T., Pulkkinen T.I., Pirjola R.J., Nevanlinna H., Tanskanen E.I., Turner N.E. (2003), Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Revised Dst versus external drivers, *J. Geophys. Res.*, 108, No. A2, 1060, doi:10.1029/2002JA009428
- Iyemori T., Takeda M., Nose M., Odagi Y., Toh H. (2010), Mid-latitude Geomagnetic Indices "ASY" and "SYM" for 2009 (Provisional). Available at <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf>.
- Kalegaev V.V., Makarenkov E.V. (2008), Relative importance of ring and tail currents to Dst under extremely disturbed conditions, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70, iss. 2-4, 519–525.
- Liu B.J., Zhang X.X., He Fei (2019), Tilt of the ring current during the main phases of intense geomagnetic storms, *Science China. Technological Sciences*, 62, No.5, 820–828, <https://doi.org/10.1007/s11431-018-9344-5>
- Malin S.R.C., Isikara A.M. (1976), Annual variation of the geomagnetic field, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 47, 445–457, doi: 10.1111/j.1365-246X.1976.tb07096.x
- Mayaud P.N. (1978), The annual and daily variations of the Dst index, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 55, 193–201.
- Russell C.T., McPherron R.L. (1973), Semiannual variation of geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.*, 78, No 1, 92–108, doi: 10.1029/JA078i001p00092
- Sugiura M., Kamei T. (1991), Equatorial Dst index 1957–1986, *IAGA Bull.* No. 40. 14 p.
- Takalo J., Mursula K. (2001), A model for the diurnal universal time variation of the Dst index, *J. Geophys. Res.*, 106, No. A6, 10905–1092.
- Temerin M., Li X. (2006), Dst model for 1995–2002, *J. Geophys. Res.*, 111, A04221, doi:10.1029/2005JA011257
- Weygand J.M., McPherron R.L. (2006), Dependence of ring current asymmetry on storm phase, *J. Geophys. Res.*, 111, A11221, doi:10.1029/2006JA011808

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.010

ГЛОБАЛЬНАЯ ИЗОЛИРОВАННАЯ СУББУРЯ, ВЫЗВАННАЯ ДИАМАГНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ МЕДЛЕННОГО СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА 22.12.2015

В.А. Пархомов¹, В.Г. Еселевич², М.В. Еселевич², Б. Цэгмэд³, С.Ю. Хомутов⁴,
Р.А. Рахматулин², Т. Райта⁵, А.А. Мочалов⁶, С.В. Пильгаев⁶

¹Байкальский государственный университет

²Институт солнечно-земной физики СО РАН

³Институт астрономии и геофизики АН Монголии

⁴Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

⁵Геофизическая обсерватория Соданкюля, университета Оулу, Финляндия

⁶ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия

Аннотация

Показано, что на орбите Земли 22.12.2015 г. взаимодействие диамагнитной структуры (ДС) медленного солнечного ветра с магнитосферой после продолжительной северной ориентации V_z генерирует изолированную суббурю, длительность которой определяется длительностью ДС. Суббуря начинается в околополуденные часы прохождением ДС в магнитосферу и распространяется к востоку. В течение двух часов наблюдаются все фазы суббури – подготовительная, взрывная и восстановительная. Протоны ДС, генерируясь в области источника, достигают орбиты Земли и, взаимодействуя с частицами радиационных поясов, вызывают генерацию колебаний IPDP в околополуденные часы в большом широтном диапазоне.

Введение

Один из главных вопросов физики магнитосферы - о факторах, контролирующих поступление энергии в магнитосферу и интенсивность суббурь, в настоящее время остается открытым. Установлено, что источником энергии магнитосферных суббурь является солнечный ветер (СВ) и межпланетное магнитное поле (ММП). Наиболее распространена точка зрения, считающая главным параметром, определяющим накопление энергии в хвосте магнитосферы, выделяемой в ходе суббурь, является V_z компонента ММП. Параметры солнечного ветра - скорость и концентрация плазмы СВ отдельно не рассматриваются как самостоятельные источники энергии суббуревых возмущений, но входят в различные комбинированные индексы [1-4].

В работах [5] введено понятие плазмоидов. Такие структуры в [6,7] определены как диамагнитные плазменные структуры (ДС). Столкновение диамагнитных структур "медленного" СВ с магнитосферой может вызывать суббуреподобные магнитосферные возмущения и, в частности, так называемые, пилообразные суббури (sawtooth substorms) [6-9]. В них было показано, что ДС, которые вблизи Солнца видны как лучи повышенной яркости, составляют основу "медленного" квазистационарного СВ на орбите Земли. Источниками "медленного" квазистационарного СВ на Солнце являются пояс [10] и цепочки стримеров [11] или псевдостримеры [12]. На орбите Земли "медленный" СВ характеризуется повышенной концентрацией плазмы $N > (10 \pm 2) \text{ см}^{-3}$ и относительно небольшой скоростью СВ $V \approx 250 \div 450 \text{ км/с}$ по сравнению с "быстрым" СВ, истекающим из корональных дыр, скорость которых составляет $V \approx 450 \div 800 \text{ км/с}$ [13,14].

Цепочки стримеров в короне в белом свете выглядят, как и пояс стримеров, в виде последовательности лучей повышенной яркости (концентрации плазмы). В них течет "медленный" СВ, примерно, с теми же свойствами, что и в поясе стримеров. Однако цепочки отличаются от пояса тем, что разделяют в короне области с открытыми магнитными силовыми линиями, имеющими одинаковую полярность поля [10].

При этом лучи цепочек стримеров, как и пояса стримеров, представляют собой квазистационарные диамагнитные структуры "медленного" СВ, которые определяются по наличию отрицательного коэффициента корреляции между скачками концентрации СВ N и модуля ММП - V .

Целью данной работы является продолжение исследования природы магнитосферных возмущений, связанных с воздействием на магнитосферу Земли диамагнитной структуры (ДС) 22.12.2015 г., источником которой на Солнце является цепочка стримеров. Главное внимание уделяется анализу передачи энергии от ДС в магнитосферу по характеру магнитосферных процессов, стимулированных ДС, в различных долготных секторах магнитосферы.

Данные и методы анализа

Для оценки динамики движения ДС в солнечном ветре и магнитосфере используются результаты наблюдений на спутниках ACE, Wind, THEMIS, GOES-13, GOES-15, RBSP A, B (рис. 1). Магнитосферный отклик по наблюдениям в четырёх долготных секторах (полуденном, вечернем, полуночном и утреннем) анализируется по данным наземных магнитометров сетей INTERMAGNET, THEMIS, IMAGE и индукционных магнитометров обсерваторий Ивало (IVA, $\Phi=68^{\circ}.56$, $\Lambda=27^{\circ}.29$), Ловозеро (LOZ, $\Phi=67^{\circ}.97$, $\Lambda=35^{\circ}.08$), Исток (IST, $\Phi=69^{\circ}.35$, $\Lambda=88^{\circ}.19$), Паратунка (PET, $\Phi=52^{\circ}.94$, $\Lambda=158^{\circ}.25$) и Ministik Lake (MSTK, $\Phi=53^{\circ}.35$, $\Lambda=247^{\circ}.03$).

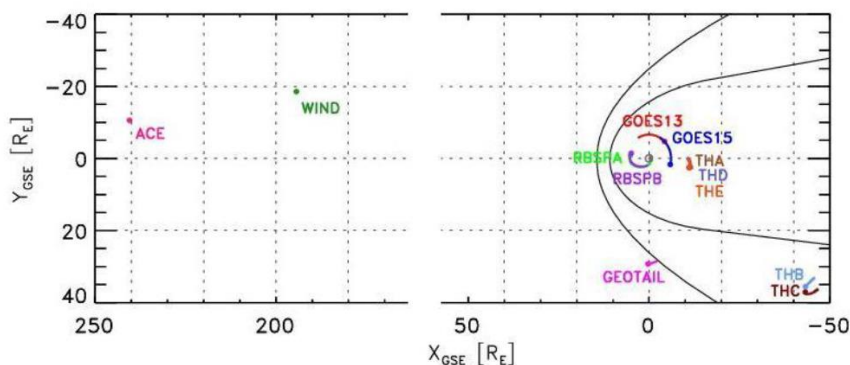


Рисунок 1. Положение спутников внутри магнитосферы в GSE координатах в плоскости (XY) с 09 до 13UT 22.12.2015 г. Точки – начало движения.

Прежде всего, приведём доказательство изолированности ДС, которая определяется по антикорреляции кривых В и N на рис. 2, в интервале времени $\approx 09:00-12:00$ UT 22.12.2015 (выделено вертикальным прямоугольником). ДС вызвала магнитосферное возмущение в виде изолированной суббури (AE макс = 1076 нТл), которая наблюдалась на фазе затухания большой магнитной бури (Dst макс 20.09.2015 = 155 нТл в 20 UT). Действительно, несмотря на существенные вариации концентрации СВ и вертикальной компоненты B_z ММП в течение 7 час до начала суббури, связанные с ДС, средние значения индексов авроральной магнитной активности $AE_{cp} = 146$ нТл, $AL_{cp} = -50.4$ нТл изменяются незначительно и суббуря кроме исследуемой не наблюдается (рис. 2). Т.е. суббуря является изолированной согласно алгоритма определения изолированности [3].

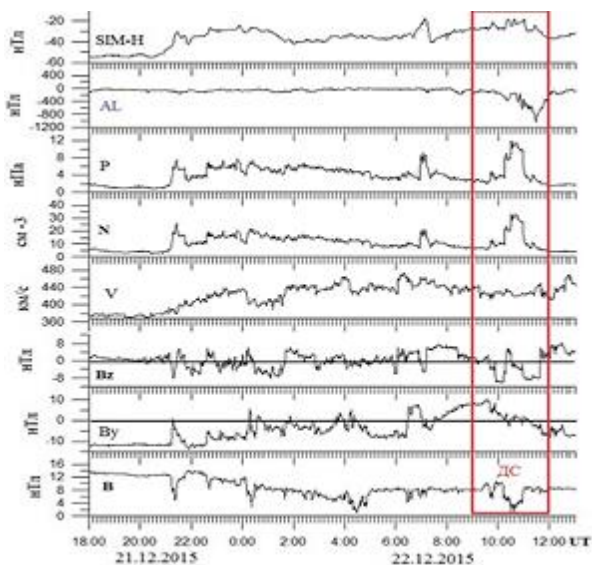


Рисунок 2. Вариации составляющих В, B_y , B_z ММП, параметров плазмы солнечного ветра V, N, P, и индексы геомагнитной активности AL и SYM-H по данным OMNI (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>). Прямоугольником выделена ДС.

Отождествление источника ДС на Солнце и на орбите Земли 22.12.2015 г.

Используя методику и формулы, приведенные в [5,10], а также результаты расчетов в потенциальном приближении Руденко (<http://bdm.iszf.irk.ru/>) положений на Солнце нейтральной линии глобального магнитного поля и цепочек стримеров, можно показать, что источником рассматриваемого на орбите Земли ДС в 09:00-12:00UT является участок пересечения цепочки стримеров с эклиптической на Солнце, который проходит через центральный меридиан Солнца в момент времени $\approx 00:00$ UT.

Диамангнитная структура движется со скоростью медленного СВ 430 км/с к орбите Земли и имеет ряд особенностей. Прежде всего, в интервале 05:00–09:36UT B_z имеет преимущественно северное направление со средним значением 2.3 нТл, а с 07:10 до 09:36 среднее значение B_z составило 6.1 нТл. Важно отметить, что B_y и B_x также имеют положительные значения, скорость падает от 470 до 420 км/с, а давление и концентрация солнечного ветра остаются на одном уровне с 07UT. Это указывает на то, что накопления энергии в магнитосфере за счёт пересоединения магнитосферного магнитного поля и ММП не происходит.

Глобальный геомагнитный отклик магнитосферы на взаимодействие с ДС 22.12.2015 г.

Геомагнитный отклик на взаимодействие ДС с магнитосферой рассмотрим в вариациях индексов геомагнитной активности AL и SML (рис. 3а, б) и долготных особенностях режима геомагнитных пульсаций (Рис. 3е).

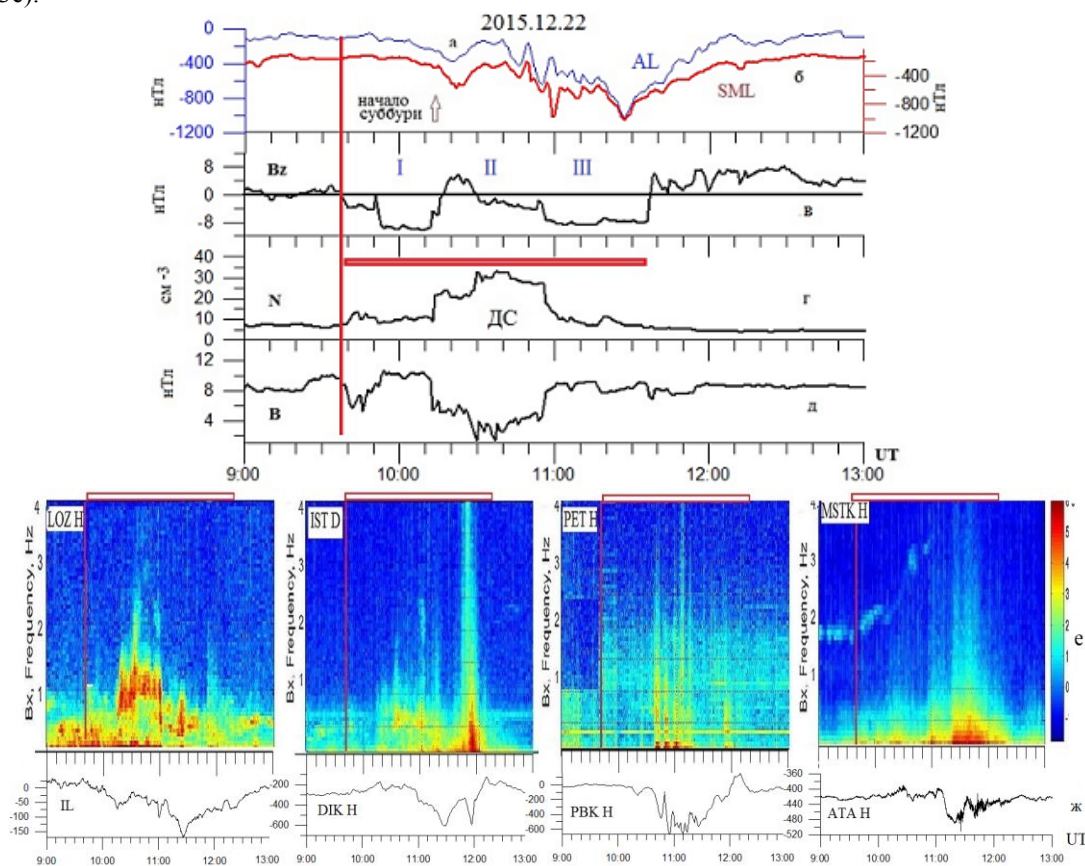


Рисунок 3. Вариации индексов AL (а) и SML (б), Bz ММП (в), плотности СВ (г) модуля напряжённости ММП по измерениям на Wind (д), спектрограммы геомагнитных пульсаций в различных долготных секторах (е), магнитограммы обсерваторий, соответствующие часам местного времени спектрограмм (ж). Горизонтальным прямоугольником обозначена ДС. Сплошная вертикальная линия - начало взаимодействия с ДС. Стрелкой показано начало суббури по [15], фазы отмечены римскими цифрами.

Начало суббури связано со сменой знака Bz (рис. 3в), что предполагает этот момент как включение триггера, открывающего поступление энергии внутрь магнитосферы. По вариациям (началу возрастания величины) AL индекса авроральной магнитной активности (рис. 3а) и индекса SML (рис. 3б), начало суббури можно определить в 09:38 UT (показано вертикальной красной линией). По вариациям индексов можно выделить три фазы суббури, обозначенные римскими цифрами. В первой фазе 09:38–10:14 UT возрастание AL индекса от -60 до -360 нТл (рис. 3а) и SML индекса от -170 до -480 нТл (рис. 3б) совпадает с возрастанием концентрации СВ от 5 до 10.6 см⁻³ (рис. 3г) и изменением Bz от 0 до -10 нТл (рис. 3в). Вторая фаза суббури начинается резким скачком концентрации от 9 до 31 см⁻³, падением модуля ММП с 11 до 5 нТл и изменения Bz от -10 до +10 нТл. Максимальное значение индексов совпадает по времени (11:27 UT) и величине (1036 нТл), после чего значение индексов резко возвращается к невозмущённому уровню. Таким образом, продолжительность суббури и её энергетика определяются длительностью взаимодействия ДС с магнитосферой или поступлением энергии СВ, вносимой ДС в магнитосферу.

Другая важная деталь – диамагнитная структура проникает в магнитослой и магнитосферу и примерно через 15 мин последовательно наблюдается на спутниках ТНВ, ТНС в магнитослое и на спутниках ТНА, ТНД, ТНЕ в деформированном виде в плазменном слое хвоста магнитосферы на расстояниях ~ 44.5 и ~ 11.4 Re, соответственно. Динамика движения ДС детально показана на рис. 5.

Вопреки сложившимся представлениям, взаимодействие ДС с магнитосферой приводит к генерации суббури, которая начинается не на ночной, а на дневной стороне авроральной зоны, и распространения её в хвост магнитосферы по мере движения ДС, прошедшей в магнитосферу, что отражается в смене режимов геомагнитных пульсаций в различных долготных секторах (рис. 3е) и вариациям ионосферных токов. Рассмотрим смену режимов от полуденных к полуночным и утренним часам. В околополуденном секторе

(обсерватория Ловозеро – LOZ H) наблюдаются колебания с нестационарным спектром (IPDP) и усиление западного тока, отразившееся в возрастании I_L индекса, определяемого по вариациям H -компоненты на меридиональной сети магнитометров, до -200 нТл (рис. 3ж). В вечернем секторе 16–18 MLT происходит кратковременная интенсификация аврорального тока (отрицательная бухта на обсерватории Диксон $H \sim - (600)$ нТл) и регистрируется широкополосный всплеск пульсаций $Pi1-2$ (обсерватория Исток – IST D) (рис. 3ж, е). В околополуночном секторе резко возрастает интенсивность западной электроструи ($H \sim -(700)$ нТл) и регистрируются последовательные широкополосные всплески $Pi 1-2$. В послеполуночном секторе (02–06 MLT) наблюдаются обычные явления, составляющие суббури – мощный западный ток ($H = -500$ нТл), пульсации, свойственные восстановительной фазе суббури, (на обсерваториях сети CARISMA) и PiC пульсации (на обсерваториях MSTK, АТА). Завершающей фазой динамики взаимодействия ДС с магнитосферой может быть последовательность смены режимов пульсаций и начала усиления ионосферных токов к востоку от полуденного меридиана. Эта закономерность противоречит классическим результатам [1,2], утверждающим, что несмотря на различие моделей начала магнитосферной суббури, все они включают основные элементы токового клина суббури, который перемещается к западу от полуночного меридиана и обеспечивает основной путь для связи реконфигурации магнитосферы с динамикой ионосферы.

Дополнительные подтверждения этого вывода представлены на рис. 4, где представлены параметры СВ и ММП и динамический спектр геомагнитных пульсаций на обс. Ивало. Как видно на рис. 4, в низкочастотной части спектра наблюдается несколько всплесков пульсаций $Pi2$ (с периодом порядка 150 с). Напомним, что $Pi2$ пульсации являются общепризнанным индикатором начала суббури. Но рассматриваемая картина наблюдается в околополуденные часы на субавроральных широтах. Видно, что каждый всплеск совпадает с моментом перехода B_z через 0 и с резкими пиками B_z .

В верхней части рисунка показаны пульсации с нестационарным спектром типа $Pc1$. Как видно, они связаны с вариациями потока протонов СВ в ДС. Напрашивается вывод о раздельном воздействии ММП и концентрации протонов на режим геомагнитных пульсаций. B_z генерирует всплески пульсаций, предположительно вследствие пересоединения ММП и геомагнитного поля на магнитопаузе. В это же время протоны (или альфа-частицы) проникают в магнитосферу и вызывают неустойчивость в радиационных поясах и генерируют электромагнитные ионно-циклотронные волны, наблюдаемые на Земле как излучения с нестационарным спектром, по морфологическим признакам близким к колебаниям типа IPDP [16]. Такие колебания сопровождают суббури, наблюдаются обычно в предполуночные часы и связаны с циклотронной неустойчивостью протонов, инжектируемых в радиационный пояс во время суббури. В [17] источником подобных колебаний также рассматривалась циклотронная неустойчивость, но ионов кольцевого тока, стимулированная импульсным сжатием магнитосферы скачками давления СВ.

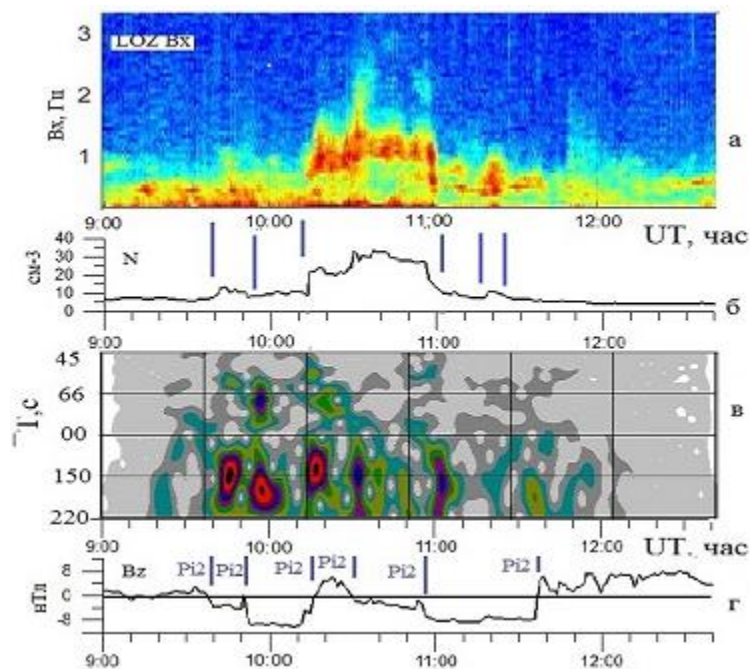


Рисунок 4. Суббури в геомагнитных пульсациях, генерированная ДС, в околополуденные часы: а) спектрограмма высокочастотного диапазона геомагнитных пульсаций (IPDP) на обсерватории Ловозеро; б) вариация концентрации протонов СВ в ДС; в) динамический спектр геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 45 – 220 с на обсерватории Ивало; г) вариация B_z ММП. Вертикальными линиями отмечены интервалы соответствия возрастания концентрации протонов в СВ и генерации IPDP (б) и соответствия генерации $Pi2$ при переходе через 0 значения B_z .

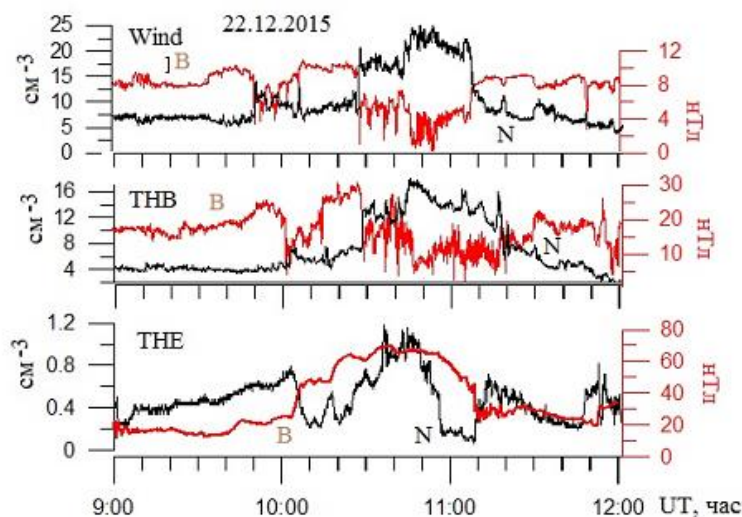


Рисунок 5. Вариации модуля напряжённости магнитного поля В (чёрная кривая) и концентрации протонов N_p (красная кривая): а) в солнечном ветре по данным спутника WIND; б) в магнитослое по данным спутника THB; в) в магнитосфере по данным спутника THE.

Примечательным фактом является сохранение структуры ДС, ее временных масштабов и антикорреляция профилей В и N при движении от WIND к Земле и проникновении ДС в магнитослой по данным спутника THB на расстояниях вплоть до $\sim 44.5 R_e$ (рис. 5а, б). В области хвоста магнитосферы на расстоянии $\sim 10 R_e$ (THE) картина кардинально меняется. Наблюдаемые структуры уже не являются ДС, т.к. отсутствует антикорреляция В и N (рис. 5в). При этом величина N уменьшается практически в 10 раз (по сравнению с магнитослоем), а величина В возрастает примерно в 5 раз. Все это, по-видимому, отражает проявление диссипативных процессов, которые инициируются воздействием ДС на замагниченную плазму в хвосте магнитосферы.

Выводы

1. Взаимодействие ДС с магнитосферой после длительной северной ориентации B_z генерирует изолированную суббуру, продолжительность которой определяется продолжительностью ДС. Суббура начинается в околополуденные часы прохождением ДС в магнитосферу и распространяется к востоку.
2. В течение двух часов наблюдаются все фазы суббуры – подготовительная, взрывная и восстановительная.
3. Протоны ДС, генерируясь в области источника, достигают орбиты Земли и, взаимодействуя с частицами радиационных поясов, вызывают генерацию колебаний IPDP в околополуденные часы в большом широтном диапазоне.
4. ДС проходит в магнитосферу и наблюдается в магнитослое и плазменном слое хвоста.

Благодарности

Работа Пархомова В.А. выполнена в рамках госбюджетной темы ФГБОУ ВО «БГУ» на 2021–202 гг. «Системный анализ и методы обработки информации в космических исследованиях».

Литература

1. Akasofu S.-I. Auroral substorms: Search for processes causing the expansion phase in terms of the electric current approach. *Space Sci. Rev.* 2017. V. 212. P. 341–381. DOI: 10.1007/s11214-017-0363-7
2. Kepko L., McPherron R.L., Amm O., Apatenkov S., Baumjohann W., Birn J., Lester M., Nakamura R., Pulkkinen T.I., Sergeev V. Substorm current wedge revisited. *Space Sci. Rev.* 2015. V. 190. P.1–46.
3. Vorobjev V.G., Antonova E.E., Yagodkina O.I. How the intensity of isolated substorms is controlled by the solar wind parameters. *Earth, Planets and Space.* 2018. V. 70. P. 148. DOI: 10.1186/s40623-018-0922-5
4. Troshichev O.A., Janzhura A. Space weather monitoring by ground-based means: PC index. Springer Verlag. 2012. DOI 10.1007/978-3-642-16803-1
5. Karlsson T., Kullen A., Liljeblad E., et al. On the origin of magnetosheath plasmoids and their relation to magnetosheath jets. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. V. 120, Is. 9. P. 7390–7403. DOI: 10.1002/2015JA021487
6. Еселевич М.В., Еселевич В.Г. Фрактальная структура гелиосферного плазменного слоя на орбите Земли. *Геомагнетизм и аэрономия.* 2005. Т. 45, № 3. С. 347-358.
7. Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Eselevich V.G., Eselevich M.V., Dmitriev A.V., Chilikin V.E. Solar wind diamagnetic structures as a source of substorm – like disturbances. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2018. V. 181. P. 55-67. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.10.010
8. Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Еселевич В.Г., Еселевич М.В. Резкие изменения концентрации в спорадическом солнечном ветре и их воздействие на магнитосферу Земли. *Космич. исслед.* 2015. Т. 53, № 6. С.449.

9. Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В. и др. Классификация магнитосферных откликов на взаимодействие с диамагнитными структурами медленного солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 4. С. 26–41. DOI: 10.12737/szf-64202004
10. Svalgaard L.J., Wilcox W., Duvall T.L. A model combining the solar magnetic field. *Solar Phys.* 1974. V. 37. P. 157.
11. Eiselevich V.G., Fainshtein V.G., Rudenko G.V. Study of the structure of streamer belts and chains in the solar corona. *Solar Phys.* 1999. V. 188. P. 277.
12. Wang Y.M., Sheeley N.R., Rich N.B. Coronal pseudostreamers. *Astrophys. J.* 2007. V. 685. P. 1340.
13. Borrini G., Wilcox J.M., Gosling J.T., Bame S.J., Feldman W.C. Solar wind helium and hydrogen structure near the heliospheric current sheet; a signal of coronal streamer at 1 AU. *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86. P. 4565.
14. Eiselevich V.G., Fainshtein V.G. The heliospheric current sheet (HCS) and high-speed solar wind: interaction effects. *Planet. Space Sci.* 1991. V. 39. P. 737- 744.
15. Gjerloev J.W. The SuperMAGdata processing technique. *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. A09213. doi:10.1029/2012JA017683.
16. Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations (A Review). *Space Sci. Rev.* 1998. V. 83. P. 435–510.
17. Yahnina T.A., Frey H.U., Bösinger T., Yahnin A.G. Evidence for subauroral proton flashes on the dayside as the result of the ion cyclotron interaction. *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A07209. doi:10.1029/2008JA013099

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.011

НЕЙРОСЕТЕВОЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕНЕРАЦИИ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВЫЗЫВАЕМЫХ ОБОЛОЧКАМИ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

С.Е. Ревунов¹, В.Г. Воробьев², О.М. Бархатова³, О.И. Ягодкина², А.А. Зуборева¹

¹Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина

²ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты

³Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация

В исследовании рассмотрены особенности генерации высокоширотных геомагнитных возмущений, вызываемых оболочками магнитных облаков (МО) солнечного ветра представляющих собой горячую и плотную турбулентную плазму с сильными флуктуациями компонент межпланетного магнитного поля. Для этих целей выполнены нейросетевые классификационные эксперименты по сопоставлению динамики параметров оболочек магнитных облаков с динамикой аврорального AL-индекса еще до развития глобального геомагнитного возмущения. Результаты, полученные искусственным интеллектом, согласуются с физическими представлениями о процессах развития высокоширотной геомагнитной активности под действием турбулентной среды оболочек магнитных облаков на земную магнитосферу.

Введение

Использование нейросетей в решении фундаментальных задач гелиогеофизики открывает новые возможности поиска причинно-следственных связей динамики параметров магнитосферы и межпланетной среды. Известно [1, 2], что исследуемые конфигурации динамики AL индекса содержат в себе информацию о характеристиках крупномасштабного плазменного потока типа МО, в которое погружается земная магнитосфера. В зависимости от скорости облака относительно солнечного ветра на переднем фронте его тела может образовываться ударная волна, за которой следует турбулентная область, часто называемая оболочкой облака. Исследования показывают, что для большинства магнитных облаков начало соответствующих им геомагнитных возмущений приходится на ударную волну и оболочку [3, 4]. Источником энергии магнитосферных суббурь является плазма солнечного ветра и межпланетное магнитное поле, содержащееся в телах МО. В настоящем исследовании применен классификационный нейросетевой подход, который использовался нами ранее [1] при анализе комплекса явлений высокоширотной геомагнитной активности (динамика индекса AL), вызываемых телом магнитного облака солнечного ветра. В качестве входных параметров для нейросетевых экспериментов были использованы интегральные компоненты ММП, показавшие свою эффективность ранее. Однако в настоящей работе мы обращаем внимание на возможность участия в динамике суббурь турбулентных оболочек МО. Турбулентные оболочки магнитных облаков, сопровождаемых ударными волнами, являются важной причиной возникающего суббурного процесса [2]. Здесь для поиска причинно-следственных характеристик образов этой структурной части магнитного облака и динамики высокоширотной геомагнитной активности применяется ИНС типа слоя Кохонена.

Используемые данные и методы обработки

В работе использованы данные, отвечающие интервалам наблюдений 33 межпланетных магнитных облаков с оболочками, зарегистрированных в 1998-2012 гг. Информация о рассматриваемых нами магнитных облаках содержится в каталогах, опубликованных в работах [3, 4]. Данные этих каталогов проверены с помощью созданной нами программы поиска магнитных облаков в солнечном ветре, основанной на специально разработанном методе [3]. Кроме того, часть данных взята из нашего каталога [4], содержащего дополнительно обнаруженные магнитные облака. Для каждого интервала МО анализировались параметры солнечного ветра: концентрация N и скорость плазмы V и компоненты вектора $B(B_x, B_y, B_z)$ межпланетного магнитного поля в GSM системе координат, а так же значения SYM/H и AL индексов магнитной активности. Интервалы взяты с разной продолжительностью, определяемой параметрами оболочек магнитных облаков. Экстремумы и интегральные значения физических переменных вычислялись

за анализируемый интервал, содержащий оболочку каждого рассматриваемого МО. Все данные взяты с минутным разрешением с узла <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>.

В исследовании применен метод классификационного нейросетевого подхода к анализу комплекса явлений высокоширотной геомагнитной активности, фиксируемого по динамике индекса AL, вызываемых магнитными облаками солнечного ветра. В качестве входных параметров для нейросетевых экспериментов используются интегральные компоненты ММП, показавшие ранее свою эффективность для восстановления индекса AL [1]. Классификационные эксперименты проводились с отдельным применением комбинаций параметров, отвечающих только причинам возникновения суббурь и только динамике развития суббурь, согласно методике [1]. Для этого были созданы две разные классификационные искусственные нейросети (ИНС). Первая нейросеть классифицировала параметры, относящиеся к оболочке МО и выделяла классы причин, вторая - классифицировала параметры, относящиеся к геомагнитному отклику магнитосферы и выделяет классы последствий. Число классов, которое желательно получить с помощью нейросети, задавалось пользователем таким образом, чтобы лучше всего соответствовать информации, содержащейся в используемых входных данных.

Результаты классификации

Выполняемая здесь отдельная классификация подразумевает независимую типизацию используемых данных в пространстве входных признаков задачи (параметры причин) и в пространстве выходных признаков задачи (параметры следствий). ИНС №1 классифицирует параметры, относящиеся к оболочкам МО, получает классы причин, ИНС №2 классифицирует параметры, относящиеся к геомагнитному отклику магнитосферы, получает классы последствий. Поиск выполнялся среди параметров причин, относящихся к оболочке МО, для ИНС №1: экстремум B_z , интегральный B_z , экстремум NV^2 , интегральный NV^2 , интегральный B_z в минуту, интегральный NV^2 в минуту и параметров геомагнитного отклика магнитосферы для ИНС №2: интегральный AL, экстремум AL, число суббурь, наличие SSC, интегральный AL в минуту.

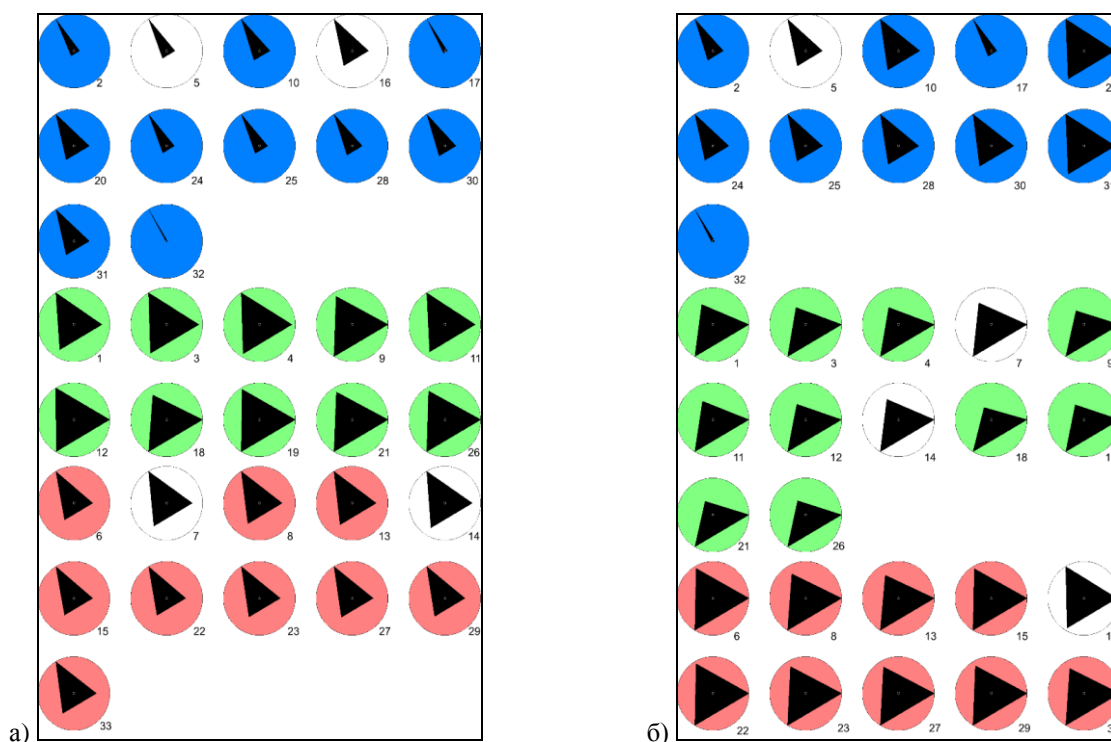


Рисунок 1. Результаты согласованной до 80% классификации событий, ассоциированных с оболочками МО на двух независимых ИНС. а) ИНС №1, результат классификации параметров причин, относящихся к оболочке МО, порядок построения данных: интегральный NV^2 , интегральный NV^2 в минуту; б) ИНС №2, результат классификации параметров геомагнитного отклика магнитосферы, порядок построения данных: интегральный AL, интегральный AL в минуту. Одинаковым цветом в каждой группе (синий – класс 1, зеленый – класс 2, красный – класс 3) показаны согласованные случаи. Числами указаны условные номера анализируемых событий МО.

Полученные классы сопоставлялись алгоритмом, изложенным в [1]. В случае совпадения класса комбинаций причинных параметров с классом суббурьего следствия, класс объявлялся установленным.

Алгоритм устанавливал число и соответствие классов, при которых содержащаяся в них информация наилучшим образом соответствует причинно-следственным связям. Классификационные результаты двух независимых ИНС наиболее близки при использовании параметров: интегральный NV^2 , интегральный NV^2 в минуту (ИНС №1) и интегральный AL, интегральный AL в минуту (ИНС №2). Показано, что классификацию имеет смысл выполнять на три класса. Обнаруженные при этом классы комплексов возмущенных параметров отвечают разным событиям космической погоды, каждый из которых соответствует конкретной суббуревой активности. При этом согласованность классов достигает 80%. Результаты классификации представлены на рис. 1. в виде диаграммы типа «радар». Первый параметр дублируется для построения плоскости диаграммы, т.к. параметров меньше трех.

Всего было обнаружено 3 сопоставляющихся класса суббуревой активности. Класс 1 отвечает взрывному росту интегрального NV^2 (большие значения интегрального NV^2 в минуту, значительно превышающие интегральные значения NV^2), взрывному росту интегрального AL (большие значения интегрального AL в минуту, значительно превышающие интегральные значения AL). Класс 2 – высокие значения интегрального NV^2 , высокие значения интегрального AL при низкой скорости роста интегрального AL (низкие значения интегрального AL в минуту). Класс 3 – быстрый рост интегрального NV^2 , высокие значения интегрального AL. Каждый выделенный класс представляет собой причинно-следственную связь типов суббурь с конкретным типом возмущений параметров солнечного ветра и ММП в турбулентной оболочке магнитного облака.

Заключение и выводы

Применение ИНС для классификации образов причинно-следственной связи суббуревой активности с воздействием крупномасштабных солнечных потоков типа магнитное облако на земную магнитосферу дает возможность выявлять соответствующую реакцию высокоширотного геомагнитного поля в виде индекса AL. Визуально на диаграмме типа «радар» каждое событие может быть однозначно отнесено к определенному классу, а совокупность однотипных диаграмм формирует формальный образ класса. За этими образами стоят комплексы причинно-следственных параметров, которые интерпретируются конкретным типом возмущений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в магнитных облаках солнечного ветра и соответствующей суббуревой активностью. В результате нейросетевых экспериментов продемонстрирована успешность определения конкретных причинно-следственных классов, содержащих совместные параметры причин суббуревой активности и ее развития, которая указывает на нелинейную связь динамики AL индекса со структурными элементами МО.

Выполненное исследование продемонстрировало возможность классификации суббуревой активности (интенсивности и динамики) на основе учета интегральных параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Параметры межпланетной среды магнитных облаков и динамики суббуревой активности, формирующие обнаруживаемые классы, могут быть использованы для уточнения физических моделей воздействия на магнитосферу Земли потоков солнечной плазмы от конкретных солнечных источников. Создаваемые нейросетевые модели могут успешно применяться, как для установления непосредственной связи динамики AL индекса с элементами МО, так и для восстановления самого AL индекса в периоды изолированных магнитосферных суббурь или серий суббурь, вызываемых воздействием магнитных облаков различных типов на земную магнитосферу.

Список литературы

1. Barkhatov N.A., Vorobjev V.G., Revunov S.E., Barkhatova O.M., Revunova E.A., Yagodkina O.I., Neural network classification of substorm geomagnetic activity caused by solar wind magnetic clouds // Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics, 2020, V. 205, 105301, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105301>
2. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Зверев В.Л., Влияние параметров плазмы солнечного ветра на интенсивность изолированных магнитосферных суббурь // Геомагнетизм и аэронавигация, 2018, Т. 58, №3, С. 311–323. DOI:10.7868/S001679401803001X
3. Бархатов Н.А., Калинина Е.А., Определение параметров магнитных облаков и прогноз интенсивности магнитных бурь // Геомагнетизм и аэронавигация, 2010, Т. 50, № 4, С. 477–485
4. Бархатов Н.А., Виноградов А.Б., Ревунова Е.А., Проявление ориентации магнитных облаков солнечного ветра в сезонной вариации геомагнитной активности // Космические исследования, 2014, Т. 52, № 4, С. 286–295
5. Barkhatov N.A., Vorobjev V.G., Revunov S.E. et al., Investigating the statistical relationship between Coronal Mass Ejections and Solar Flares // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., 2021, V. 85, P. 234–237, <https://doi.org/10.3103/S1062873821030059>

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.012

ФЛУКТУАЦИИ GPS-СИГНАЛОВ И ОШИБКИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В ПОЛЯРНОЙ И АВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ В НОЯБРЕ 2012 ГОДА

И.И. Шагимуратов¹, И.И. Ефишов¹, М.В. Филатов², И.Е. Захаренкова¹, Н.Ю. Тепенитчина¹, Г.А. Якимова¹

¹Калининградский филиал ИЗМИРАН, Калининград, Россия

²ФГБНУ «Полярный геофизический институт», Апатиты, Россия

E-mail: shagimuratov@mail.ru

Аннотация

В работе дано сопоставление проявления фазовых флуктуаций GPS-сигналов и их воздействия на точность позиционирования на полярной NYA1 и авроральной TRO1 станциях для ноября 2012г. Представлен детальный анализ особенностей и различий ионосферных эффектов на обсуждаемых станциях во время конкретных геофизических условий.

Введение

Флуктуации GPS/ГЛОНАСС сигналов в высоких широтах обусловлены присутствием в ионосфере различных масштабов неоднородностей. Интенсивность и частота появления флуктуаций существенно усиливаются во время геомагнитных возмущений. Ионосферные неоднородности структурированы по широте, и характер их проявления соответствует динамике таких структур, как авроральный овал, касп, полярная шапка. Особый интерес к исследованиям флуктуаций обусловлен тем, что они являются одним из основных факторов, влияющих на функционирование космических навигационных систем в Арктике. В последнее время много работ посвящено проявлению фазовых GPS-флуктуаций в различных областях ионосферы [Cherniak et al., 2015; Prikryl et al., 2015]. Чаще всего фазовые флуктуации трансionoсферных сигналов наблюдаются в районе магнитного полудня и в районе магнитной полуночи. Особенно сильные флуктуации, ассоциируемые с авроральными возмущениями, регистрируются в авроральном овале [Черноус и др., 2015]. Интенсивные фазовые флуктуации GPS-сигналов, вызванные авроральными возмущениями, существенно ухудшают точность навигационных измерений [Jacobsen and Dähmn, 2014; Yang et al., 2019]. При этом по сравнению со спокойными условиями ошибки позиционирования могут увеличиваться более чем на порядок. Флуктуации вызывают скачки фазы сигналов (cycle slips) и могут приводить к потере слежения принимаемых сигналов, что в конечном итоге ухудшает точность навигационных измерений [Shagimuratov et al., 2018]. По комплексным наблюдениям станции NY-Alesund проведены исследования проявления флуктуаций в полярной ионосфере, обусловленных полярными патчами (polar cap patches) и полярными суббуриями [Jin et al., 2014; Belakhovsky et al., 2020]. В работе [Belakhovsky et al., 2021] представлен анализ влияния различных типов возмущений в полярной ионосфере на навигационные сигналы. Исследования касаются проявления фазовых и амплитудных цинтилляций, обусловленных дневными высыпаниями в каспе, высыпаниями во время суббуревой активности в полярной ионосфере, а также вызванных влиянием полярных патчей. В данной работе по GPS-наблюдениям по станциям NYA1 и TRO1 представлена детальная картина проявления фазовых флуктуаций и ошибок позиционирования во время конкретных геофизических условий.

1. Данные

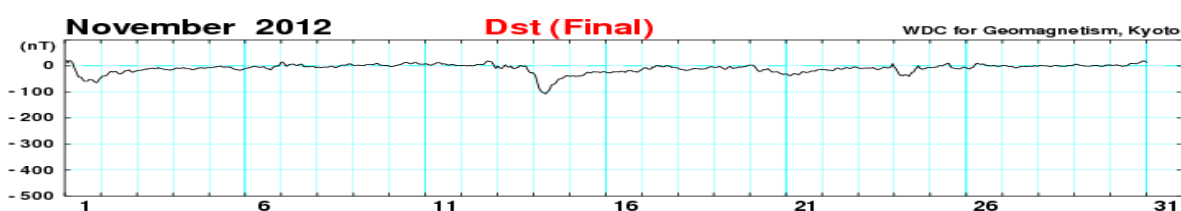


Рисунок 1. Dst за ноябрь 2012 года.

В работе использовались GPS наблюдения полярной NYA1 и авроральной TRO1 станций за интервал 11-14 ноября 2012 г. и данные сети магнитометров IMAGE (<http://www.space.fmi.fi/IMAGE>). В качестве меры флуктуационной активности использовался параметр ROT (Rate of TEC) на 1 мин. интервале. В качестве единицы измерения TEC используется TECU (1 TECU соответствует 10^{16} эл/м²). Геомагнитные условия (рис. 1) включали умеренную бурю 14 ноября, минимальная величина Dst достигало -108 нТ в 00:08 UT. Максимальная авроральная активность 14 ноября 2012 г. приходилась на 00-10 UT.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Событие 11 ноября 2012 года

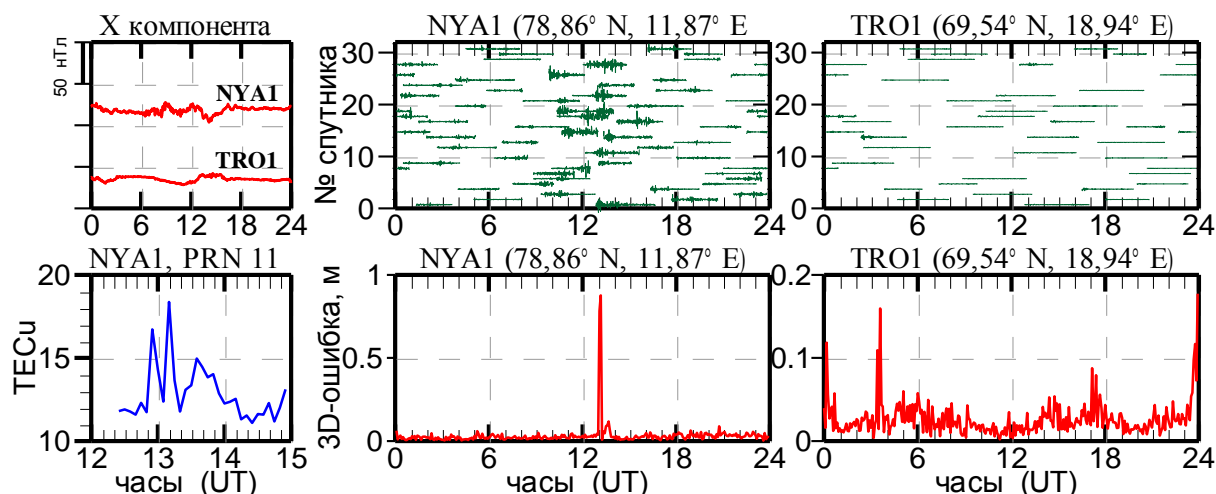


Рисунок 2. Магнитограммы и вариации ROT по всем пролетам спутников за 24 часовой интервал по станциям NYA1 и TRO1 (верхняя панель); TEC вдоль пролета спутника и ошибки позиционирования (нижняя панель).

Вариации магнитного поля на обеих станциях по данным сети IMAGE показывают, что 11 ноября был спокойным днем. Слабое возмущение на станции NYA1 регистрировалось в районе 08-16 UT. На этом интервале наблюдалось усиление фазовых флуктуаций (ROT) на всех спутниковых пролетах над станцией NYA1, которая в этот период располагалась в районе Каспа. На авроральной станции TRO1 флуктуации были очень слабыми (на уровне фона). Как видно на рисунке 2, для спутника №11 наблюдались TEC вариации в виде всплесков повышенной ионизации, которые можно интерпретировать как проявление «патч» структур. Амплитуда всплесков достигала фактора 1,5 относительно фона. Для оценки влияния фазовых флуктуаций на ошибки позиционирования был использован алгоритм высокоточного позиционирования для конкретной станции, получивший название Precise Point Positioning (PPP). Метод основан на стратегии обработки GPS-наблюдений одного приемника и позволяет эффективно определять с высокой точностью координаты потребителя. Для расчета ошибок использовалась программа GIPSY (<http://apps.gdgps.net>), 3D-ошибки позиционирования определялись как детрендированные координаты от средних значений (x_0 , y_0 , z_0) на каждую эпоху:

$$P_{3D}(i) = \sqrt{(x(i) - x_0)^2 + (y(i) - y_0)^2 + (z(i) - z_0)^2}.$$

Ошибки по станции TRO1 не превышали 15 см. По станции NYA1 максимальная ошибка составляла около 1 м и регистрировалась в районе 13 UT. Характерно, что наблюдается явное временное соответствие между флуктуациями и ошибками позиционирования.

2.2. Событие 12 ноября 2012 года

Вариации магнитного поля на обеих станциях по данным сети IMAGE показывают, что на станции NYA1 наблюдалась небольшая положительная бухта после 21 UT. На авроральных станциях после 20 UT регистрировалось интенсивная суббуревая активность. На станции TRO1 именно на этот период пришлось интенсивные фазовые флуктуации. Интересно, что в это же время на станции NYA1 также наблюдались сильные флуктуации. Небольшое усиление флуктуаций наблюдалось в дневное время. Флуктуационную активность после 20 UT мы можем ассоциировать с проявлением патч структур, которые наблюдались в вариациях TEC (как пример) на пролете спутника №8, когда флуктуации в три раза превышали относительно фона. На обеих станциях ошибки позиционирования регистрировались приблизительно в одно и то же, вечернее время. По станции TRO1 ошибки были более чем в два раза больше, чем на NYA1.

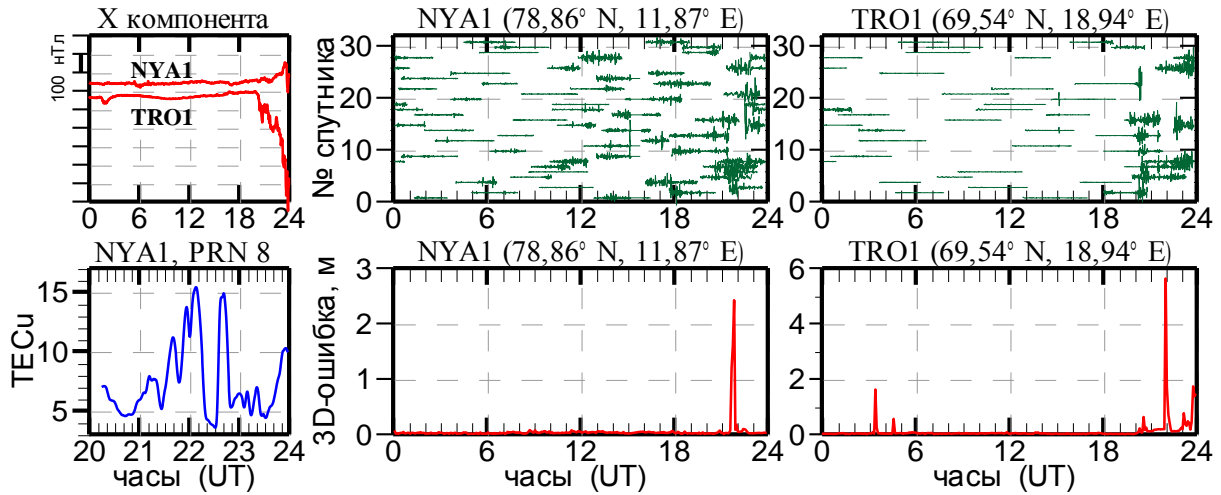


Рисунок 3. Магнитограммы и вариации ROT по всем пролетам спутников за 24 часовой интервал по станциям NYA1 и TRO1 (верхняя панель); TEC вдоль пролета спутника и ошибки позиционирования (нижняя панель).

2.3. Событие 13 ноября 2012 года

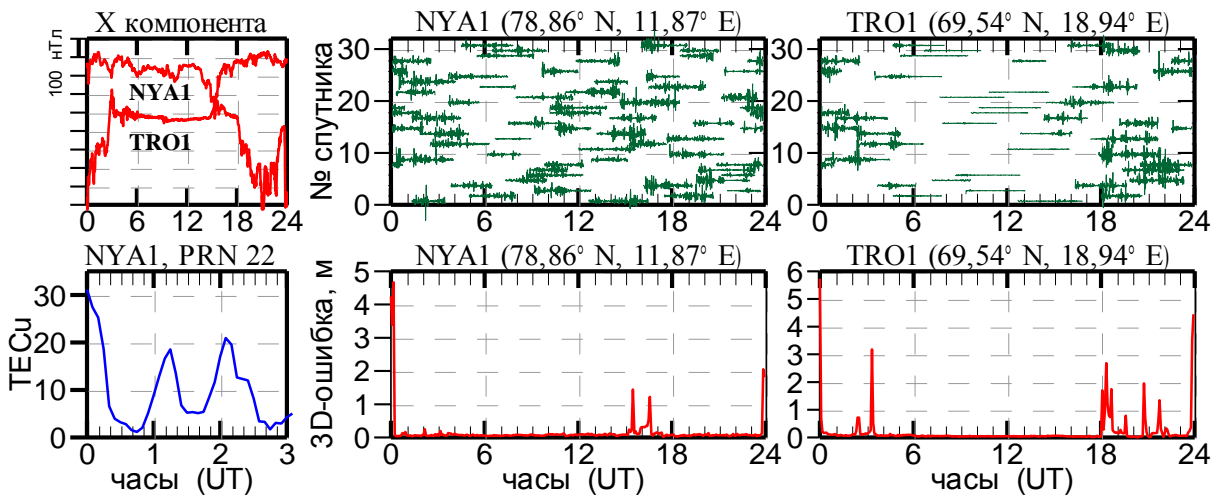


Рисунок 4. Магнитограммы и вариации ROT по всем пролетам спутников за 24 часовой интервал по станциям NYA1 и TRO1 (верхняя панель); TEC вдоль пролета спутника и ошибки позиционирования (нижняя панель).

По данным сети IMAGE (рис. 4) на станции NYA1 в послеполуденное время наблюдалась суббуря умеренной интенсивности. На станции TRO1 регистрировались суббури в утреннем и вечернем секторах. По интенсивности вечерняя суббурия превышала утреннюю. На станции TRO1 на эти периоды приходилось усиление фазовых флуктуаций, причем амплитуда была больше в вечернее время. На станции NYA1 также наблюдалось усиление флуктуаций в эти периоды. Усиление флуктуаций хорошо соотносилось с временным периодом, когда наблюдалась суббурия. Поведение ошибок позиционирования в целом хорошо согласуется с проявлением фазовых флуктуаций сигналов GPS. В то же время на станции NYA1 максимальная ошибка приходилась на утренние часы. Это можно объяснить проявлением патч структур (см. вариации TEC для спутника №22) в фазовых флуктуациях и их влиянием на ошибки позиционирования.

2.4. Событие 14 ноября 2012 года

По данным сети IMAGE видно, что на станции NYA1 в послеполуденное время наблюдалась суббурия малой интенсивности. На станции TRO1 регистрировались интенсивные флуктуации магнитного поля в утренние часы. В конечном итоге это привело к очень большим ошибкам позиционирования. На станции NYA1 слабые флуктуации наблюдались в течение всех суток. Ошибки малой величины регистрировались в околополуденное время.

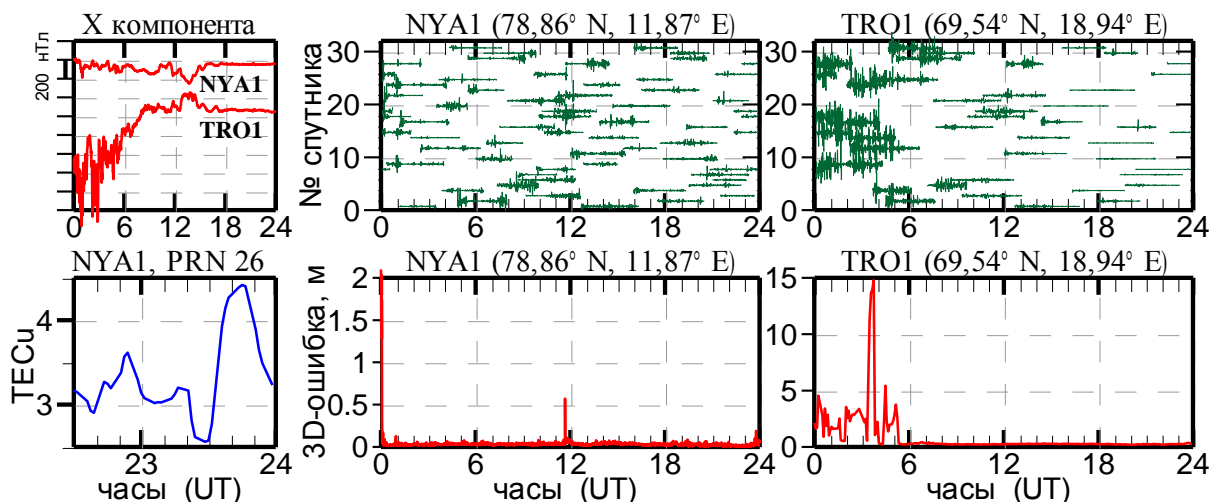


Рисунок 5. Магнитограммы и вариации ROT по всем пролетам спутников за 24 часов интервал по станциям NYA1 и TRO1 (верхняя панель); TEC вдоль пролета спутника и ошибки позиционирования (нижняя панель).

Заключение

Проведен детальный анализ проявления флуктуационной активности и ошибок позиционирования на полярной NYA1 и авроральной TRO1 станциях на интервале 11-14 ноября 2012 г. За этот период регистрировались различного характера геомагнитные возмущения. По станции TRO1 как флуктуации, так и ошибки позиционирования хорошо согласуется с временным развитием авроральной и суббуревой активности. Проявления флуктуационной активности по станции NYA1 носит достаточно сложный характер. Наблюдается связь флуктуаций как с полярными суббурями, так и полярными патчами. Можно предположить, что это обусловлено зависимостью от геомагнитной возмущённости положения станции в каспе или в авроральной ионосфере. В общем, ошибки позиционирования по NYA1 меньше, чем по станции TRO1.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ: грант № 19-05-00570.

Литература

- Shagimuratov I.I., Chernouss S.A., Despirak I.V. et al. (2015). Occurrence of TEC fluctuations and GPS positioning errors at different longitudes during auroral disturbances. *Sun and Geosphere*, 13/1, 89-94.
- Черноус С.А., Швец М.В., Филатов М.В., и др. (2015). Исследования особенностей навигационных сигналов в периоды авроральных возмущений. *Химическая физика*, 34(10), 33-39.
- Prikryl P., Jayachandran P.T., Chadwick R., Kelly T.D. (2015). Climatology of GPS phase scintillation at northern high latitudes for the period from 2008 to 2013. *Ann. Geophys.*, 33, 531–545. DOI: 10.5194/angeo-33-531-2015
- Cherniak Yi., Zakharenkova I. (2015). Dependence of the high-latitude plasma irregularities on the auroral activity indices: A case study of 17 March 2015 geomagnetic storm. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 151. DOI: 10.1186/s40623-015-0316-x
- Jin Y., Moen J., Miloch W. (2014). GPS scintillation effects associated with polar cap patches and substorm auroral activity: direct comparison. *J. Space Weather Space clim.*, 4, A23. DOI: 10.1051/swsc/2014019
- Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W.J. (2021). Influence of different types of ionospheric disturbances on GPS signals at polar latitudes. *Ann. Geophys.*, 39, 687–700. DOI: 10.5194/angeo-39-687-2021
- Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W.J. (2020). Influence of the substorm precipitation and polar cap patches on GPS signals at high latitudes. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 17, 6, 139-144. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-6-139-144
- Jin Y., Moen I., Oksavik K., Spicher A. (2017). GPS scintillations associated with cusp dynamics and polar cap patches. *J. Space Weather Space Clim.*, 7, A23. DOI: 10.1051/swsc/2017022
- Yang Z., Jade Morton Y.T., Zakharenkova I. (2019). Global view of ionospheric disturbance impacts on kinematic GPS positioning solutions during the 2015 St. Patrick's Day storm. *J. of Geophysical Research: Space Physics*, DOI: 10.1029/2019JA027681
- Jacobsen K.S., Dähnn M. (2014). Statistics of ionospheric disturbances and their correlation with GNSS positioning errors at high latitudes. *J. Space Weather Space Clim.*, 4, A27. DOI: 10.1051/swsc/2014024

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.013

ДАВЛЕНИЕ ИОНОВ В НОЧНОЙ АВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

В.Г. Воробьев¹, О.И. Ягодкина¹, Е.Е. Антонова^{2,3}, И.П. Кирпичев³

¹ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты (Мурманская обл.)

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва

³Институт космических исследований, г. Москва

Аннотация. Данные спутников серии DMSP использованы для исследования ионного давления в ночном секторе авроральной зоны в магнитоспокойные периоды при экстремальных значениях динамического давления солнечного ветра (P_{sw}). Показано, что при экстремально высоких уровнях динамического давления солнечного ветра давление ионов на границе изотропизации (ГИ) увеличивается с ростом P_{sw} и может достигать уровня 4-6 нПа при $P_{sw} = 20-22$ нПа. Получены широтные профили ионного давления при средних уровнях динамического давления равных 0.5 нПа, 2.1 нПа и 16.3 нПа, указывающие на то, что увеличение P_{sw} сопровождается не только ростом давления плазмы в авроральной зоне, но и расширением области авроральных высыпаний, главным образом за счет смещения ГИ в более низкие широты. Проведено проецирование широтного профиля ионного давления на экваториальную плоскость магнитосферы при $P_{sw} \sim 2.0$ нПа.

1. Введение

В экваториальной плоскости магнитосферы на расстояниях, при которых гирорадиус ионов становится больше радиуса кривизны силовой линии, происходит изотропизация пичч-углового распределения энергичных частиц. Радиальное расстояние, на котором возникает изотропизация, зависит от энергии частиц: чем меньше энергия, тем дальше от Земли происходит изотропизация. В области изотропной плазмы её свойства остаются постоянными вдоль геомагнитной силовой линии, что позволяет определять характеристики магнитосферной плазмы по наблюдениям высыпающихся частиц на высотах ионосферы. В работе [Newell et al., 1996] по данным низкоорбитальных спутниках серии DMSP выделена граница, названная границей b2i, на которой поток энергии высыпающихся ионов достигает максимума. В [Newell et al., 1998] статистически показано, что положение b2i хорошо соответствует границе изотропизации (ГИ) ионов с энергией 30 кэВ.

Одним из наиболее важных параметров магнитосферы является давление плазмы, которое в значительной мере определяет распределение продольных токов и устойчивость плазменных доменов в магнитосфере. Усредненное распределение давления плазмы в окружающем Землю плазменном кольце на геоцентрических расстояниях от 6 Re до 10 Re получено в работе [Кирпичев и Антонова, 2011] по данным спутников проекта THEMIS. В работе [Tsyganenko and Mukai, 2003] наблюдения спутника GEOTAIL на расстояниях от 10 Re до 50 Re в ночной магнитосфере использованы для создания 2D модели распределения давления плазмы. Результаты этого исследования указывают на значительный рост давления плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы с увеличением динамического давления солнечного ветра (P_{sw}). По данным спутников DMSP давление ионов в предполуночном секторе авроральной зоны на границе b2i в зависимости от P_{sw} исследовалось в работе [Воробьев и др., 2019], где обнаружена фактически линейная связь этих параметров.

Результаты цитируемых выше исследований, были получены путем обработки больших массивов данных, в которых статистически значимые наборы данных представлены, главным образом, в интервале P_{sw} от 1.0 до 6.0 нПа. Целью настоящей работы является определение величины ионного давления на ГИ и широтного распределения давления ионов при экстремальных значениях динамического давления солнечного ветра. Под экстремальными значениями динамического давления будем понимать значения $P_{sw} < 1.0$ нПа и $P_{sw} > 6.0$ нПа. Такие исследования возможны только в результате анализа отдельных, специально отобранных для этих целей событий.

2. Используемые данные

В работе использованы данные спутников DMSP F6 и F7 за полный 1986 г. и данные спутников этой же серии за отдельные, специально выбранные периоды. Спутники серии DMSP каждую секунду

регистрировали спектры высыпавшихся ионов в диапазоне энергий от 30 эВ до 30 кэВ. Для определения ионного давления по измерениям характеристик высыпавшихся частиц была использована методика, предложенная в работе [Stepanova et al., 2006]. Чтобы избежать значительного влияния суббуревых процессов на результаты исследования, важным критерием при отборе данных и интервалов исследования являлся низкий уровень магнитной активности в авроральной зоне, $AL < -200$ нТл.

Для изучения влияния экстремально больших уровней P_{sw} на величину ионного давления были отобраны магнитные бури, перед началом главной фазы которых при положительных значениях Dst индекса наблюдались большие значения P_{sw} . Такие интервалы классически именуются как фазы DCF (disturbance of corruscular flux) магнитных бурь. При условии низкого уровня магнитной активности в авроральной зоне таким интервалам соответствовали фазы DCF магнитных бурь 13-14 июня 1998 г., 16-17 апреля 1999 г., 18-19 марта 2002 г., 19-20 ноября 2007 г. и 31 мая 2013 г. Магнитным бурям 31 мая 2013 г. и 18 марта 2002 г. предшествовали магнитоспокойные периоды длительностью более 24 ч, которые были использованы для изучения широтного распределения давления ионов при низких и экстремально низких значениях P_{sw} .

3. Влияние P_{sw} на величину ионного давления на границе изотропизации (ГИ)

Потоки энергии ионов (J_i) и их средние энергии (E_i) в ночном секторе авроральной зоны постепенно увеличиваются с уменьшением широты, достигая максимума на экваториальном крае высыпаний. В соответствии с [Newell et al., 1996], положение максимума J_i определялось в качестве границы изотропизации. Экваториальнее ГИ потоки энергии высыпавшихся ионов быстро падают. Таким образом, ГИ располагается в области максимума ионного давления, а её широта будет определять наиболее экваториальную область ионосферы, ионное давление в которой можно проецировать в экваториальную магнитосферу.

Из-за специфики траекторий спутников DMSP максимальное число спутниковых пересечений области авроральных высыпаний в периоды отобранных для исследования событий располагалось в секторе 18:00 – 21:00 MLT. На рис. 1 по статистическому набору данных за 1986 г. показана зависимость ионного давления на ГИ от динамического давления солнечного ветра в этом секторе MLT (линия 1). Так как граница изотропизации не является изобарой, величина ионного давления на ГИ зависит от MLT. Для сравнения на рис. 1 (сплошная линия 2) представлены аналогичные данные в секторе 21:00-24:00 MLT из работы [Воробьев и др., 2019]. Рисунок показывает, что на ГИ давление в секторе 21-24 MLT несколько выше, чем давление в секторе 18-21 MLT. Это наглядно отображается штриховой линией, проведенной на уровне $P_{sw}=6$ нПа, при котором давление ионов в секторе 18-21 MLT составляет ~1.0 нПа, а в секторе 21-24 MLT ~1.3 нПа. Среднеквадратичное отклонение данных на рис. 1 составляет ~0.2-0.3 нПа и более детально обсуждается в работе [Воробьев и др., 2019].

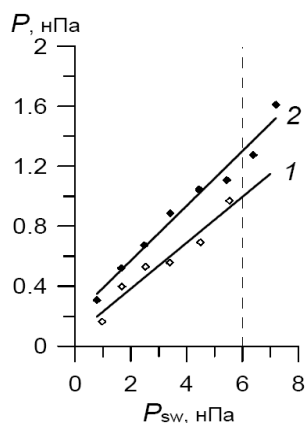


Рисунок 1. Давление ионов на границе изотропизации (ГИ) в зависимости от динамического давления солнечного ветра (P_{sw}): 1 - в секторе 18-21 MLT, 2 - в секторе 21-24 MLT.

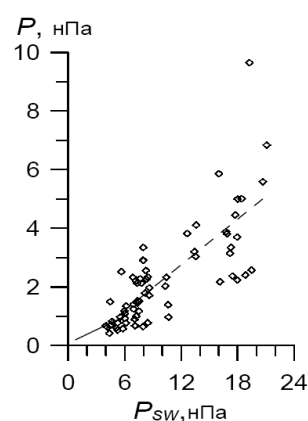


Рисунок 2. Давление ионов на ГИ в секторе 18-21 MLT в периоды экстремально больших значений P_{sw} .

На рис. 2 показано ионное давление на ГИ в секторе 18:00-21:00 MLT с привлечением данных за периоды фазы DCF, отобранных нами магнитных бурь. Сплошная линия около начала осей координат соответствует данным, показанным на рис.1, линия 1. Штриховая линия соответствует уравнению линейной регрессии по точкам на графике. Разброс точек значительный, но очевиден близкий к линейному рост ионного давления с увеличением P_{sw} . Отдельно стоящая точка при $P_{sw}=19.3$ нПа указывает на то, что давление ионов на ГИ может достигать величины ~10 нПа.

4. Широтные профили ионного давления при разных уровнях P_{sw}

В событии 18 марта 2002 г. наблюдался резкий скачок динамического давления солнечного ветра, зарегистрированный как SSC в 13:22 UT, после которого динамическое давление солнечного ветра оставалось очень высоким в течение ~ 10 ч, варьируясь в интервале 14-20 нПа. Данные спутников DMSP за этот период использованы для изучения широтного распределения давления ионов при экстремально высоких уровнях P_{sw} . На рис. 3а (верхняя кривая) представлен широтный профиль ионного давления, полученный усреднением по 10 пересечениям спутников DMSP зоны авроральных высыпаний. По горизонтальной оси на рисунке отложена исправленная геомагнитная широта (CGL). Усреднение проводилось методом наложения эпох относительно границы изотропизации, среднее положение которой составило $\langle \Phi' \rangle = 64.6^\circ$ CGL, $\langle MLT \rangle = 20.4$ при $\langle AL \rangle = -44$ нТ. При величине динамического давления солнечного ветра $\langle P_{sw} \rangle = 16.3$ нПа, ионное давление на границе изотропизации $\langle P_{max} \rangle = 5.1$ нПа.

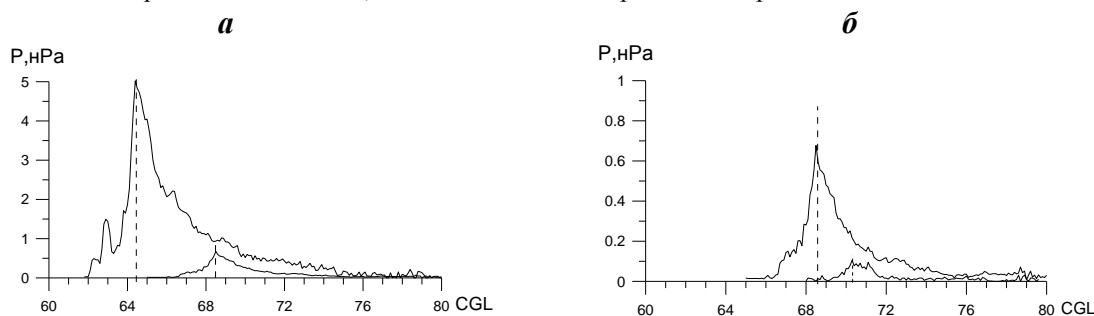


Рисунок 3. Средние профили ионного давления в секторе 18-21 MLT. *а* - при экстремально высоком (верхняя кривая) и «средне» низком уровне P_{sw} ; *б* - при «средне» низком (верхняя кривая) и экстремально низком уровне P_{sw} . Вертикальные штриховые линии – граница изотропизации.

При спокойных условиях динамическое давление солнечного ветра обычно не превышает ~ 3 нПа. Так в работе [Tsuganenko and Mukai, 2003] среднее $P_{sw} \sim 2.2$ нПа, а по данным за 1986 г. ~ 2.4 нПа. До начала возмущений в солнечном ветре в событии 18 марта 2002 г динамическое давление солнечного ветра длительное время оставалось на уровне около ~ 2 нПа. На рис. 3а (нижняя кривая) представлен средний широтный профиль ионного давления за этот период. В увеличенном масштабе этот же широтный профиль показан на рис. 3б (верхняя кривая). При «средне» низком динамическом давлении $\langle P_{sw} \rangle = 2.1$ нПа давление ионов на ГИ составило $\langle P_{max} \rangle = 0.7$ нПа; среднее положение ГИ: $\langle \Phi' \rangle = 68.6^\circ$ CGL, $\langle MLT \rangle = 20.0$ при $\langle AL \rangle = -49$ нТл.

В спокойный период до начала магнитной бури 31 мая 2013 г. наблюдался очень низкий уровень P_{sw} , величина которого была менее 1 нПа. На рис. 3б (нижняя кривая) показан средний широтный профиль ионного давления для $\langle P_{sw} \rangle = 0.5$ нПа. Уровень ионного давления на ГИ составил только $\langle P_{max} \rangle = 0.1$ нПа; среднее положение ГИ: $\langle \Phi' \rangle = 72.2^\circ$ CGL, $\langle MLT \rangle = 20.4$ при $\langle AL \rangle = -26$ нТл.

Сопоставление данных, представленных на рис. 3 уверенно демонстрирует, что как величина максимума ионного давления в авроральной зоне, так и широтное положение границы изотропизации существенным образом зависят от динамического давления солнечного ветра. С ростом P_{sw} уровень ионного давления увеличивается, в то время как ГИ смещается в более низкие широты. Так при $\langle P_{sw} \rangle = 16.3$ нПа широта ГИ составляет $\sim 64.6^\circ$ CGL, при $\langle P_{sw} \rangle = 2.1$ нПа - 68.6° CGL, а при $\langle P_{sw} \rangle = 0.5$ нПа уже 72.2° CGL.

5. Полученные результаты, краткое обсуждение

Данные спутников серии DMSP использованы для исследования ионного давления в секторе 18-21 MLT авроральной зоны при экстремальных значениях динамического давления солнечного ветра. Основные результаты можно сформулировать следующим образом:

1. Давление ионов на границе изотропизации (ГИ) в секторе 18:00 - 21:00 MLT составляет ~ 0.8 от ионного давления в секторе 21:00 - 24:00 MLT.
2. При экстремально высоких уровнях динамического давления солнечного ветра давление ионов на ГИ увеличивается с ростом P_{sw} и может достигать уровня 4-6 нПа при $P_{sw} = 20-22$ нПа.
3. Получены широтные профили ионного давления при средних уровнях динамического давления 0.5 нПа, 2.1 нПа и 16.3 нПа, указывающие на то, что увеличение P_{sw} сопровождается не только ростом давления плазмы в авроральной зоне, но и расширением области авроральных высыпаний, главным образом за счет смещения ГИ в более низкие широты. При указанных выше уровнях P_{sw} граница изотропизации располагалась на исправленных геомагнитных широтах 70.2° , 68.6° и 64.6° соответственно.

Авроральные высыпания на широтах выше границы изотропизации рассматриваются как изотропные. В области изотропных высыпаний в условиях магнитоэлектростатического равновесия давление плазмы постоянно

вдоль линии магнитного поля и его можно использовать в качестве “маркера” при сравнении измерений на больших и малых высотах. Такой метод называется методом «морфологического проецирования», для использования которого необходимы знания как о широтном распределении давления на высотах ионосферы, так и о распределении давления плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы. Для определения ионного давления в магнитосфере были использованы наблюдения спутников THEMIS. Радиальное распределение давления в экваториальной плоскости ($Z_{SM} = 0 \pm 1$ Re) на меридиане $MLT = 20 \pm 1$ показано на рис. 4а. Профиль давления получен для магнитоспокойных условий ($AL > -200$ нТ, $Dst > -20$ нТ, $P_{sw} = 2.0 \pm 0.2$ нПа), которые идентичны условиям, при которых был получен широтный профиль ионного давления, показанный на рис. 3б (верхняя кривая) для среднего спокойного уровня P_{sw} .

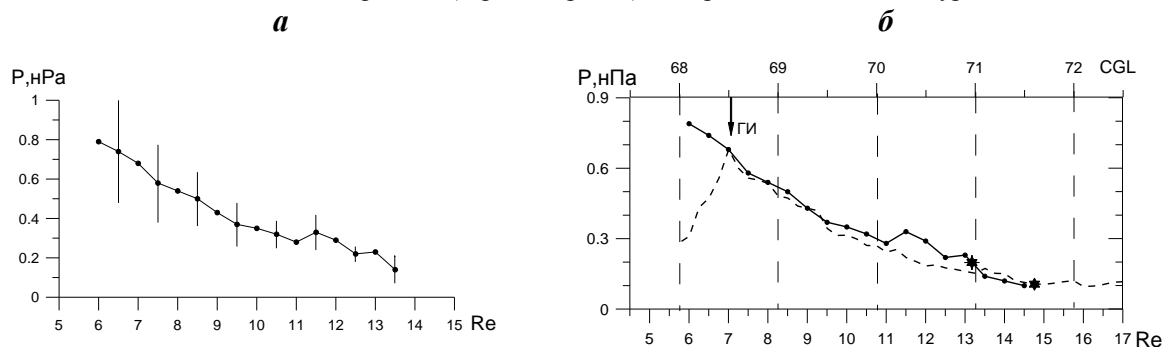


Рисунок 4. Радиальное распределение ионного давления на меридиане 20 ± 1 MLT (а). Проекция широтного профиля ионного давления при $\langle P_{sw} \rangle = 2.1$ нПа на экваториальную плоскость магнитосферы (б).

На рис. 4б показана проекция широтного профиля ионного давления в экваториальную плоскость магнитосферы при условии равенства давлений вдоль геомагнитных силовых линий. Верхняя горизонтальная шкала на рис. 4б показывает исправленные геомагнитные широты, а нижняя – радиальное расстояние, на которое эти широты проектируются. Рисунок показывает, что при средних спокойных условиях граница изотропизации в экваториальной плоскости располагается на расстоянии ~ 7.0 Re. Приполюсная граница ионных высыпаний статистически совпадает с приполюсной границей электронных высыпаний и определена как граница b5i в [Newell et al., 1998]. Положение этой границы в экваториальной плоскости по рис. 4б можно определить двумя способами: (1) по уровню давления на этой границе – звёздочка на 13.3 Re и (2) по средней широте границы – звёздочка на 14.8 Re. Таким образом, приполюсная граница авроральных высыпаний в магнитоспокойные периоды при среднем спокойном уровне динамического давления солнечного ветра находится в экваториальной плоскости на расстояниях 13-15 Re.

Полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что в магнитоспокойные периоды динамическое давление солнечного ветра в значительной мере определяет структуру магнитосферы и радиальное распределение давления магнитосферной плазмы.

Благодарности. Данные спутников DMSP взяты на страницах <http://sd-www.jhuapl.edu>, параметры ММП, плазмы солнечного ветра и индексы магнитной активности взяты на страницах <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> и <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>.

Литература

- Newell P.T., Feldstein Ya.I., Galperin Y.I., et al. The morphology of nightside precipitation // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. No. A5. P. 10737-10748. Doi:10.1029/95JA03516
- Newell P.T., Sergeev V.A., Bikkuzina G.R., Wing S. Characterizing the state of the magnetosphere: testing the ion precipitation maxima latitude (b2i) and the ion isotropy boundary // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. No. A3. P. 4739-4745. Doi:10.1029/97JA03622
- Кирпичев И.П., Антонова Е.Е. Распределение давления плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы Земли на геоцентрических расстояниях от 6 до 10 Re по данным международного проекта THEMIS // Геомагнетизм и аэронавигация. 2011. Т. 51. № 4. С. 456-461. Doi:10.7868/S0016794016040064
- Tsyganenko N.A., Mukai T. Tail plasma sheet models derived from Geotail particle data // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. No. A3. 1136. Doi:10.1029/2002JA009707
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е. Ионное давление на границах авроральных высыпаний и его связь с динамическим давлением солнечного ветра // Геомагнетизм и аэронавигация. 2019. Т. 59. № 5. С. 582–593. Doi:10.1134/S0016794019050146
- Stepanova M., Antonova E.E., Bosqued J.-M. Study of plasma pressure distribution in the inner magnetosphere using low-altitude satellites and its importance for the large-scale magnetospheric dynamics // Adv. Space Res. 2006. V. 38. No. 8. P. 1631-1636. Doi:10.1016/j.asr.2006.05.013

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.014

THE INVESTIGATION OF THE PG PULSATIONS WITH USING DATA OF ARASE, GOES SATELLITES AND GROUND-BASED STATIONS

V.B. Belakhovsky¹, V.A. Pilipenko², K. Shiokawa³, Y. Miyoshi³

¹*Polar geophysical Institute, Apatity*

²*Institute of the physics of the Earth, Moscow, Russia*

³*Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya, Japan*

Abstract. The physical nature of Pg (pulsation giant) pulsations, which were observed in the magnetosphere by the Japanese satellite Arase, geostationary satellites GOES, and ground stations of the THEMIS and CARISMA networks, was investigated in this work. Pg pulsations belong to the Pc4 frequency range and are characterized by a very monochromatic shape. For the event on 5 June, 2018, according to the data from the Arase satellite, the Pg pulsation wave packet was recorded in the dawn sector during 3 hours. The pulsations are most pronounced in the radial component of the geomagnetic field, their frequency was about 11 mHz. Pg pulsations observed in the magnetosphere were accompanied by pulsations with the same period according to data from a number of ground-based magnetic stations located near the conjugate point. According to the data of ground stations, the pulsations were most strongly expressed in the Y-component of the geomagnetic field. Pg pulsations were accompanied by pulsations in electron and proton fluxes according to the Arase, GOES satellite observations. There are no clear phase relationships between geomagnetic pulsations and pulsations in charge particle fluxes. Pg pulsations were excited under quiet geomagnetic conditions (SYM-H = -10 nT, AE = 100-400 nT) on the recovery phase of the small geomagnetic storm. It is assumed that the expansion of the plasmasphere at low geomagnetic activity leads to an increase in the plasma density in the region of the geostationary orbit, which creates favorable conditions for the excitation of Pg pulsations due to the drift-bounce resonance of protons with the geomagnetic field lines oscillations in the magnetosphere.

Introduction

There are many types of ULF waves in the Earth magnetosphere, which differ by their periods (Pc3-5, Pg, Pi2-3), waveforms (broadband or monochromatic), polarization structure (poloidal, toroidal, or compressional), etc [Anderson *et al.*, 1990]. ULF waves have two types of energy sources: external and internal. External sources, such as the Kelvin-Helmholtz instability and compression of magnetosphere by solar wind, excite large-scale perturbations on the magnetopause. ULF waves excited by external sources generally have a small wave number in the azimuthal direction (m-number), for example, $|m| < 10$. By contrast, internal sources, such as plasma instability and wave-particle resonance, excite perturbations with a large m-number, for example, $|m| \sim 100$.

Giant pulsations (Pgs) are a special class of ultralow-frequency (ULF) waves observed on the ground most often at auroral latitudes [Birkeland, 1901] with periods usually around 100s but at times as short as 60s or as long as 200s [Brekke *et al.*, 1987]. Pgs are characterized by a highly sinusoidal waveform, a strong magnetic field perturbation in the east-west direction, strong latitudinal localization, westward propagation, and an azimuthal wave number (m) in the range of 16–35 [Takahashi *et al.*, 1992].

An outstanding and unexplained feature of Pgs is that they occur most often during years of minimum solar activity and almost exclusively on the morningside [Chisham and Orr, 1991].

In this study we try to examine Pg pulsations and its connection with the fluxes of energetic particles in the magnetosphere by the Arase satellite.

Data used

The Arase (ERG: Exploration of energization and Radiation in Geospace) satellite was developed by the Institute of Space and Astronautical Science of JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) for the study Earth radiation belts (Miyoshi *et al.*, 2018a). The apogee is about 5.0 Re (L~6.0, 32 110 km), and the perigee is about 460 km. It was launched at 20 December 2016. In this study, we have used the data from MEPe (S. Kasahara *et al.*, 2018), MGF (Matsuoka *et al.*, 2018), and PWE (Y. Kasahara *et al.*, 2018).

The GOES geostationary spacecrafts was used for the registration of the geomagnetic field variations, variations of the electron and proton fluxes. CARISMA network stations are used for the registration of geomagnetic field variations in conjugate to the satellite regions.

MGF data of Arase satellite are transformed to the mean field-aligned (MFA) coordinate system. The magnetic field averaged over a 5-min moving window is defined as the background field and gives the direction of the $b_{||}$

(parallel) component, the direction of a (azimuthal) component is defined as $\mathbf{b}_a = \mathbf{b} \parallel \times \mathbf{r}$, where \mathbf{r} is the satellite position vector from the center of the Earth, and the direction of \mathbf{b}_r (radial) component is given by $\mathbf{b}_r = \mathbf{b} \times \mathbf{b} \parallel$.

The event 5 June 2018

Pg pulsations were excited under quiet geomagnetic conditions (SYM-H = -10 nT, AE = 100-400 nT) on the recovery phase of the small geomagnetic storm, solar wind speed according to the OMNI database was about 550 km/s.

The wave packet of monochromatic pulsations was observed on GOES-14 spacecraft at time interval 09.30-14.00 UT (Fig. 1) in MFA coordinate system. The Pc4 pulsations were mostly seen in radial (he) and azimuthal (hn) components with amplitude about 2-4 nT. Weaker pulsations can be seen also in the field-aligned component hp and in the total field intensity ht. This polarization indicates on the poloidal-type transverse wave structure. The wavelet spectrum (Fig. 2) shows that the pulsations were excited by the different wave packets in frequency range 8-15 mHz with the spectrum maximum near 10-12 mHz.

The pulsations on GOES-14 satellite were accompanied by the pulsations with the same frequency on the ground stations (Fig. 1). But on ground stations the Pg pulsations are seen only during some moments due to damping of the waves in the ionosphere. The pulsations are mostly evident in Y-component of the geomagnetic field at GILL station located near the conjugate point according to the GOES-14 satellite (Fig. 1). This fact testifies about the rotation of the polarization ellipse of the waves on 90 degrees during the propagations through the ionosphere.

There is no change of the frequency of the Pg pulsations with the change of the latitude. So the considered pulsations are generated not due to the field-line resonance (FLR). It is hard to determine the azimuthal wave number m of Pg pulsations with using longitudinal pair of stations RABB-GILL due to low coherence between the pulsations.

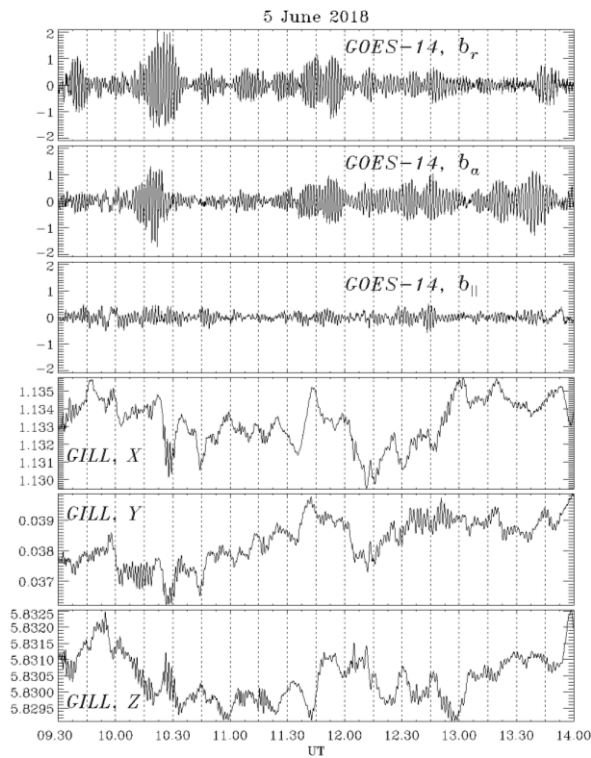


Figure 1. The geomagnetic field variations on GOES-14 spacecraft (radial, azimuthal and field-aligned component), geomagnetic field variations in GILL station (X, Y, Z components).

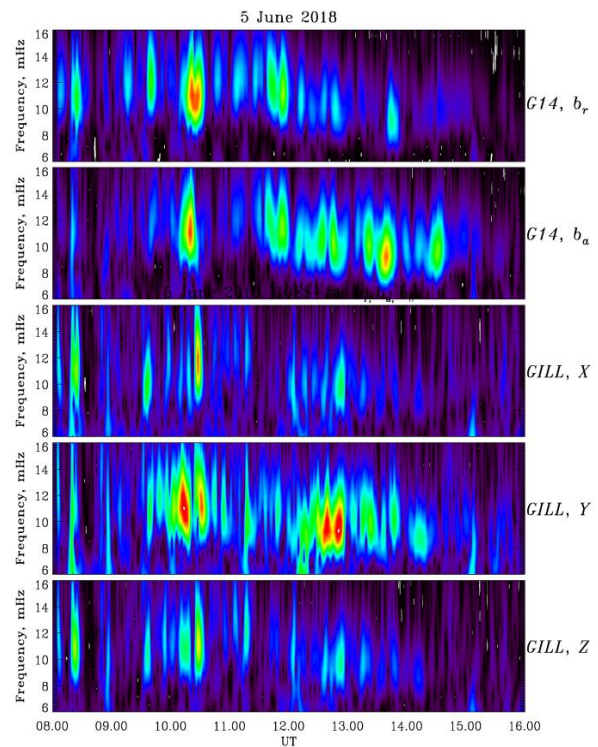


Figure 2. wavelet spectrum of the radial and azimuthal components on GOES-14 spacecraft, wavelet spectrum of X, Y, Z components on GILL station.

At the moment of the Pg pulsations excitation the GOES-14 satellite was located at the early morning sector (see the map on the Fig. 3). Near the GOES-14 the Arase satellite was located (Fig. 3). The GOES-15 satellite was located in 1.5 hours of MLT from the GOES-14 satellite.

The similar Pc4 pulsations were also observed in variations of the electric and magnetic field on Arase satellite (Fig. 5). The pulsations are better seen in electric field variations. But the wave forms of Pc4 pulsations are not well correlate on GOES-13 and Arase satellites. It means that the observed waves have small-scale structure.

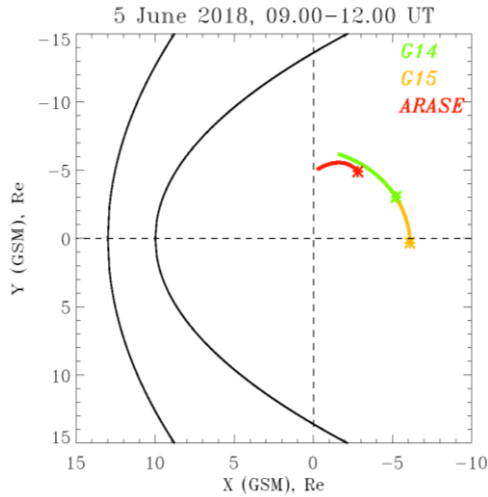


Figure 3. The location of GOES-14, GOES-15, Arase satellites in GSM coordinate system.

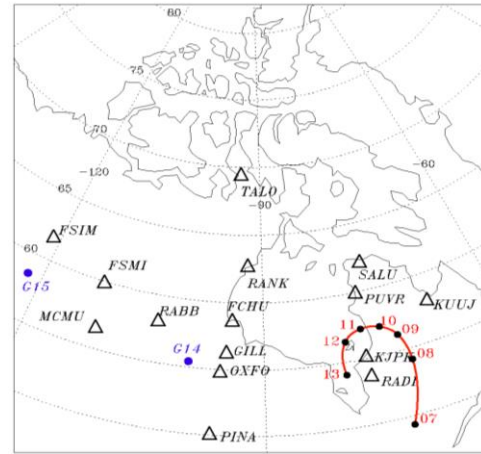


Figure 4. Map showing the location of the geomagnetic station, projection of the Arase, GOES-14, GOES-15 satellites.

Because we have magnetic and electric field measurements on Arase satellite we have calculated the Poynting flux for considered Pg pulsations (Fig. 5, last three panels). It is seen that the energy of the waves are mostly transferred in field-aligned direction which confirms the Alfvén nature of these pulsations.

The geomagnetic Pc4 pulsations according to the GOES-14 and Arase data were accompanied by the pulsations in electron and proton fluxes with the same frequency in wide energy range. The Pc4 pulsations in electron fluxes at some wave packets are in phase with the geomagnetic pulsations while Pc4 pulsations in proton fluxes are in anti-phase with the geomagnetic pulsations (Fig. 6).

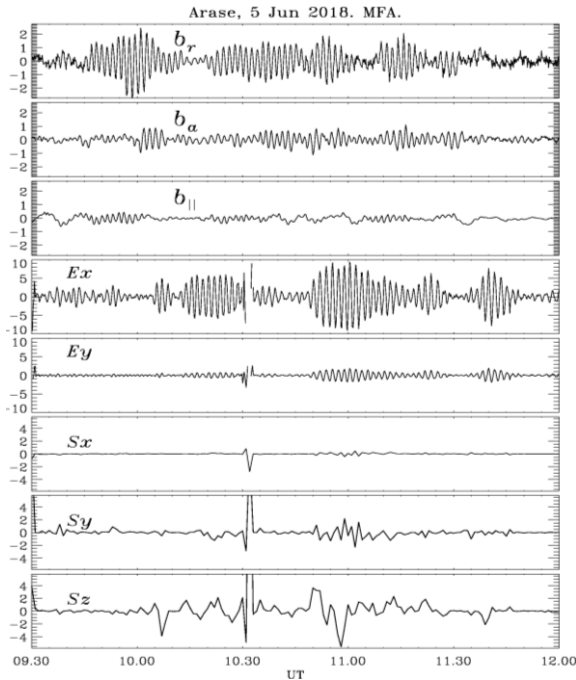


Figure 5. The geomagnetic field variations on Arase spacecraft (radial, azimuthal and field-aligned component), electric field components (E_x , E_y), vector of Poynting (S_x , S_y , S_z).

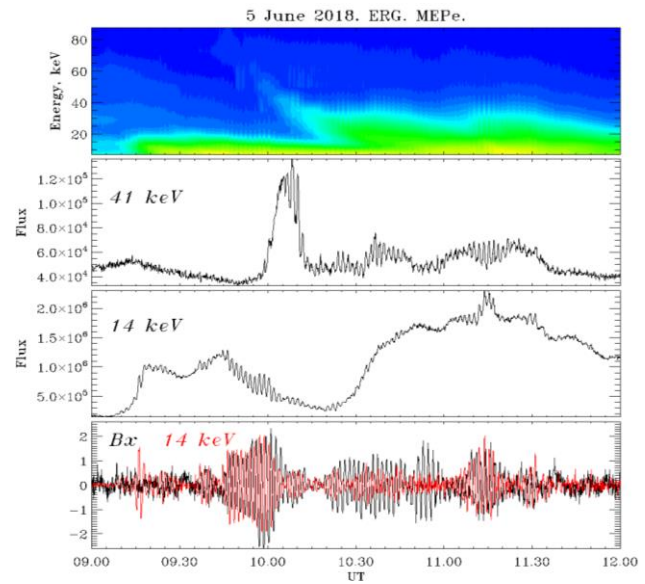


Figure 6. The spectrogram of the energetic electrons (5-90 keV), fluxes of the 41, 14 keV electrons, variations of the Bx-component of the geomagnetic field and flux of the 14 keV electrons.

Conclusions

It is considered the Pg pulsations with using data of Arase, GOES satellites and ground stations of the THEMIS, CARISMA networks for the event on 5 June, 2018. The pulsations are most pronounced in the radial component of the geomagnetic field, their frequency was about 11 mHz. Pg pulsations observed in the magnetosphere were accompanied by pulsations with the same period according to data from a number of ground-based magnetic stations located near the conjugate point. According to the data of ground stations, the pulsations were most strongly expressed in the Y-component of the geomagnetic field. There is no change of the frequency of the Pg pulsations with the change of the latitude. So the considered pulsations are generated not due to field-line resonance.

Pg pulsations were accompanied by pulsations in electron and proton fluxes according to the Arase, GOES satellite observations. The analyze indicate that the Pc4 pulsations in electron fluxes at some wave packets are in phase with the geomagnetic pulsations while Pc4 pulsations in proton fluxes are in anti-phase with the geomagnetic pulsations.

It is assumed that the expansion of the plasmasphere at low geomagnetic activity leads to an increase in the plasma density in the region of the geostationary orbit, which creates favorable conditions for the excitation of Pg pulsations due to the drift-bounce resonance of protons with the geomagnetic field lines oscillations in the magnetosphere.

Acknowledgment. Science data of the ERG (Arase) satellite were obtained from the ERG Science Center operated by ISAS/JAXA and ISEE/Nagoya University (<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/index.shtml.en>, Miyoshi *et al.*, 2018b).

References

- Anderson B.J., Engebretson M.J., Rounds S.P., Zanetti L.J., Potemra T.A. A statistical study of Pc 3–5 pulsations observed by the AMPTE/CCE magnetic fields experiment, 1. Occurrence distributions // *Journal of Geophysical Research*, 95, 10,495–10,523. 1990.
- Birkeland K. Expédition Norvégienne de 1899–1900 pour l'étude des aurores boréales. Résultats des recherches magnétiques // *Videnskabselsk. Skr, I. Mat. Naturvidensk. K.*, 1, 1–80. 1901.
- Brekke A., Feder T., Berger S. Pc4 giant pulsations recorded in Tromsø, 1929–1985 // *J. Atmos. Terr. Phys.*, 49, 1027–1032, doi:10.1016/0021-9169(87)90109-7. 1987.
- Chisham G., Orr D. Statistical studies of giant pulsations (Pgs): Harmonic mode // *Planet. Space Sci.*, 39(7), 999–1006, doi:10.1016/0032-0633(91)90105-J. 1991.
- Kasahara S., Yokota S., Mitani T., Asamura K., Hirahara M., Shibano Y., Takashima T. Medium-energy particle experiments, electron analyzer (MEP-e) for the exploration of energization and radiation in geospace (ERG) mission // *Earth, Planets, and Space*, 70, 69, doi:10.1186/s40623-018-0847-z. 2018.
- Kasahara Y., Kasaba Y., Kojima H., Yagitani S., Ishisaka K., Kumamoto A., Tsuchiya F., Ozaki M., Matsuda S., Imachi T., Miyoshi Y., Hikishima M., Katoh Y., Ota M., Shoji M., Matsuoka A., Shinohara I. The Plasma Wave Experiment (PWE) on board the Arase (ERG) satellite // *Earth, Planets and Space*, 70, Article number: 86. 2018.
- Matsuoka A., Teramoto M., Nomura R., Nose M., Fujimoto A., Tanaka Y., et al. The Arase (ERG) magnetic field investigation. // *Earth, Planets, Space*, 70(43). <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0800-1>. 2018.
- Miyoshi Y., Shinohara I., Takashima T., Asamura K., Higashio N., Mitani T., et al. Geospace exploration project ERG // *Earth, Planets, Space*, 70(101). <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0862-0>. 2018a.
- Miyoshi Y., Hori T., Shoji M., Teramoto M., Chang T.-F., Segawa T., et al. The ERG Science Center // *Earth, Planets, Space*, 70(96). <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0867-8>. 2018b.
- Takahashi K., Sato N., Warnecke J., Lüher H., Spence H.E., Tonegawa Y. On the standing wave mode of giant pulsations // *J. Geophys. Res.*, 97, 10,717–10,732, doi:10.1029/92JA00382. 1992.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.015

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДАЛЬНЕЙ НАВИГАЦИИ РСДН-20 «АЛЬФА» В УЧАСТКАХ ВОЛНОВОДА ЗЕМЛЯ – ИОНОСФЕРА С ГОРИЗОНТАЛЬНО НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

О.И. Ахметов, И.В. Мингалев, О.В. Мингалев, В.Б. Белаховский, З.В. Суворова

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия

Аннотация. Представлены результаты моделирования распространения электромагнитных волн ОНЧ диапазона в горизонтально неоднородных участках высокоширотного волновода Земля-ионосфера при различных профилях концентрации электронов. Профили концентрации электронов и частоты столкновений электронов с нейтралами, которые были использованы соответствовали событиям 24 января 2012 г. В это время происходили высыпания высокоэнергетических частиц в полярную ионосферу в результате взаимодействия межпланетной ударной волны с магнитосферой и последующей магнитной суббурей. Частоты модельного источника сигнала соответствовали частотам радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа» постоянно вещающей в диапазоне ОНЧ на территории Российской Федерации. Показано, что изменения амплитуды сигналов радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа» вызванные действием геомагнитного поля и горизонтальными неоднородностями зависят от направления распространения сигнала относительно вектора геомагнитного поля и не могут быть обращены в случае изменения направления распространения на противоположное.

Введение

Исследования радиосигналов диапазона очень низких частот (ОНЧ) не теряют актуальность в течение многих лет. Первоначально данный диапазон представлял интерес с точки зрения связи и навигации особенно в условиях возмущений электронной плотности в нижней ионосфере, а в последнее время появились коллективы авторов использующие сигналы диапазона ОНЧ для получения дополнительных сведений о состоянии ионосферы на пути их распространения. В качестве хорошего примера можно рассматривать международную сеть приемников и передатчиков Antarctic-Arctic Radiation-belt (Dynamic) Deposition - VLF Atmospheric Research Konsortium (AARDDVARK) [1]. Несмотря на то, что на территории Российской Федерации отсутствуют исследовательские группы, официально сотрудничающие с данным консорциумом, работы в данном направлении проводятся. Так в работах [2] и [3] для диагностики ионосферы используются фазовые и амплитудные параметры сигналов радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-20 «Альфа») [4]. Использование антропогенных стабильных постоянно действующих источников радиосигнала в сравнении со случайными сигналами естественной природы делает задачу исследования нижней ионосферы по результатам наземной регистрации сигналов ОНЧ несколько проще. Современные методы численного моделирования распространения радиосигналов позволяют получить свободные от влияния посторонних факторов изменения амплитудных и фазовых характеристик обусловленные изменениями профилей электронной концентрации в D и частично в E областях ионосферы. Полученные таким образом амплитудные и фазовые характеристики для разных частот, и разных видов профилей электронной концентрации, позволят выявить наиболее информативные параметры радиосигналов для исследования нижней ионосферы и связать их с видом профиля электронной концентрации преобладающим на пути следования радиосигнала.

Целью представленной работы является двух этапное моделирование сигналов системы дальней навигации «Альфа». На первом этапе моделируется источник сигналов системы дальней навигации «Альфа» вблизи города Краснодар (45°24' N 38°09' E), а на втором используются результаты первого этапа для моделирования амплитудных и фазовых характеристик сигналов на несущих частотах системы дальней навигации «Альфа» в области полярных широт при различных состояниях ионосферы.

Профили электронной концентрации, частоты столкновений их с нейтральными частицами и ионами используемые в численных экспериментах

Для моделирования поля источника использовались данные о концентрации электронов и частоты их соударений с нейтральными молекулами и ионами в районе расположения передатчика около города

Краснодар (45°24' N 38°09' E) полученные из ГОСТ Р 25645.157-94. Передатчик, расположенный в районе города Краснодар, был выбран для моделирования из-за его географического положения. Сигнал от него в направлении Кольского полуострова распространяется с очень маленьким углом к горизонтальной составляющей геомагнитного поля. В представленных численных экспериментах на этапе моделирования источника геомагнитное поле принималось горизонтальным направленным вдоль волнового вектора и нормально к волновому вектору. Модуль геомагнитного поля во всех случаях принимался равным $5,3 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Профили электронной концентрации, используемые на втором этапе для моделирования различных состояний высокоширотной ионосферы, получены на основе усредненных за 5 минут данных радара некогерентного рассеивания VHF EISCAT (г. Тромсе) во время события 24 января 2012 года и двух экспоненциальной модели ионосферы Уайта [5]:

$$N_e(h) = 1.43 \cdot 10^7 e^{(-0.15 \cdot h')} e^{[(\beta - 0.15)(h - h')]}$$
 (1)

где h' и β – два параметра в км и км-1 обозначающих высоту D слоя и резкость ионосферного перехода соответственно. Подбор параметров производился таким образом, чтобы профиль Уайта соединился с профилем EISCAT.

Частота столкновений с нейтралами и ионами ν_e рассчитывалась на основе данных EISCAT и данных модели NRLMSISE2000 по формулам из [6].

Профиль проводимости литосферы был задан с учетом результатов исследований, полученных несколькими научными группами и опубликованных в работе [7], по формуле

$$\sigma_L(z) = 2 \cdot 10^5 \cdot 10^{(-z - 0.22222 \dots)}$$
 (2)

где z обозначает глубину в км.

Область моделирования и источник сигнала

Численные расчеты проводились в декартовой системе координат, где ось Z располагалась нормально к поверхности Земли. Таким образом область моделирования для численных экспериментов была параллелепипедом, включающим участок волновода Земля–ионосфера.

В численных экспериментах, моделирующих поле антенны РСДН-20 размер области моделирования, составил 192x600 км по горизонтали, 100 км по высоте в атмосфере и ионосфере и 20 км в глубину в литосфере. Шаг сетки над поверхностью Земли – 200 м по вертикали, 750 м по горизонтали, в литосфере – 100 м по вертикали. Источник представлял собой вертикальный диполь с током высотой 400 м (2 узла сетки) в ближайших окрестностях которого задавалось магнитное поле по закону Био-Савара-Лапласа. Диполь располагался на расстоянии 96 км от трех ближайших граней модельной области. Ток в диполе представлял собой сумму гармонических колебаний на частотах радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20, а именно 11905, 12679, 14881 Гц [8;4].

В численных экспериментах с горизонтально неоднородной ионосферой размер модельной области был 512x1650 км 200 км по высоте в атмосфере и ионосфере и 50 км в глубину в литосфере. Шаг сетки над поверхностью Земли – 1000 м по вертикали, 2000 м по горизонтали, в литосфере – 500 м по вертикали. Центр источника сигнала располагался на расстоянии 256 км от трех боковых граней полученного параллелепипеда. В области шириной 250 км на высотах от поверхности Земли до 60 км было задано горизонтальное магнитное поле, полученное при моделировании источника сигналов системы «Альфа». Это позволило в первом приближении задать плоский фронт волны, создаваемой вблизи источника.

Для всех внешних сторон области моделирования, кроме стороны источника, использовалось условие свободного ухода волны вместе с адаптированными поглощающими слоями PML и профилем потерь Беренгера [9], аналогично тому, как это было реализовано в работе [10]. Это позволило снизить уровень отражений сигналов от границ области до 0.1%.

В представленном исследовании была использована модель распространения электромагнитных сигналов, основанная на численном интегрировании по времени системы уравнений Максвелла и уравнения для плотности тока с учетом инерции электронов в ионосфере. Модификации этой модели также использовалась в работах [10-11]. Численные схемы модели были опробованы на известных аналитических решениях и продемонстрировали хорошее соответствие расчетных волновых характеристик, известных из литературы [12-13], для таких эффектов, как поляризация волн ионосферного источника в высокоширотной замагниченной ионосферной плазме [14].

Результаты экспериментов и их обсуждение

Моделирование источника сигналов радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-20 «Альфа»)

В работе исследовано поле антенны системы «Альфа» на расстояниях более 10 длин волн от передающей антенны. Концентрация и частота столкновений выбраны согласно модели спокойной ионосферы ГОСТ Р

25645.157-94 для передатчика, расположенного вблизи города Краснодар, Российская федерация (45°24' N 38°09' E). Для случая, когда фоновое геомагнитное поле направлено вдоль направления распространения сигнала в вычислительном эксперименте получено, что вблизи антенны преобладает ТЕ мода, а на расстоянии более 300 км основной становится ТМ мода. В вычислительном эксперименте с вектором фонового геомагнитного поля, направленным нормально к направлению распространения сигнала, наблюдается аналогичная картина, но волноводная ТМ мода выделяется несколько медленнее. Однако характер затухания позволяет предполагать, что в обоих случаях на значительном расстоянии более 500 км до источника, останется только ТМ мода.

Прохождение сигналов системы «Альфа» участка волновода Земля-ионосфера с горизонтально сильно неоднородной концентрацией электронов

В данном подразделе обсуждаются результаты четырех экспериментов в которых моделируется преодоление сигналами радиотехнической системы «Альфа» области быстроизменяющейся электронной концентрации.

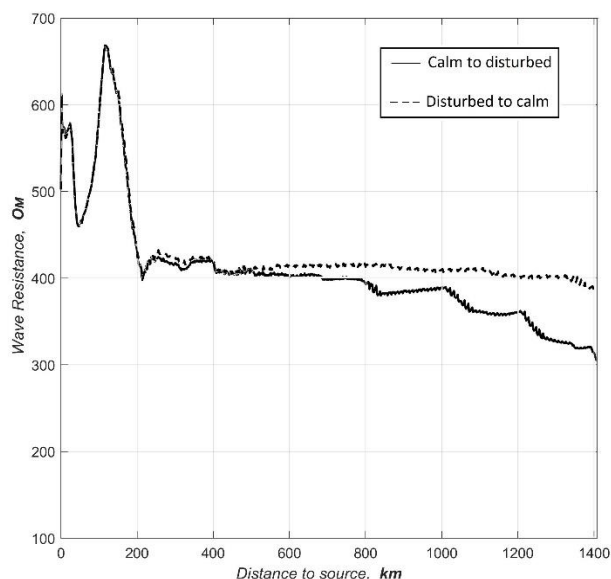


Рисунок 1. Волновое сопротивление в зависимости от расстояния до источника сигнала во время взаимодействия межпланетной ударной волны и магнитосферы с последующим высыпанием заряженных частиц в ионосферу 24 января 2012 года.

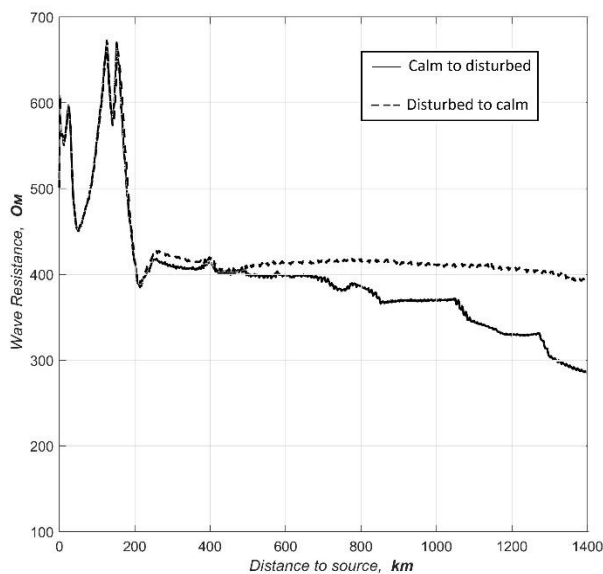


Рисунок 2. Волновое сопротивление в зависимости от расстояния до источника сигнала во время суббури 24 января 2012 года.

В первом эксперименте сигнал из спокойной ионосферы попадает в область с повышенной концентрацией электронов в ионосферной плазме вызванной взаимодействием межпланетной ударной волны и магнитосферы с последующим высыпанием заряженных частиц в ионосферу. Во втором, сигнал, наоборот, из области с повышенной концентрацией электронов попадает в область спокойной ионосферы. В третьем эксперименте сигнал из области спокойной ионосферы попадает в область с повышенной концентрацией электронов вызванной суббурей последовавшей за приходом межпланетной ударной волны. В четвертом, сигнал из области с повышенной концентрацией электронов попадает в область спокойной ионосферы. Эксперименты показали, что переход сигнала из невозмущенной области ионосферы в возмущенную вызывает, незначительное снижение высоты отражения сигнала от нижней ионосферы с 70 км до 68 км в случае межпланетной ударной волны. В случае перехода сигнала из невозмущенной области ионосферы в область повышенной концентрации электронов, вызванной высыпание высокоэнергетических частиц в ионосферу во время суббури вызывает заметное снижение высоты отражения сигнала от ионосферы с высоты 76 км до высоты 70-68 км. Интересно отметить, что во время обоих событий как межпланетной ударной волны, так и последующей суббури в случае перехода из возмущенной области в невозмущенную, высота отражения восстанавливается не полностью особенно во время суббури.

На рисунках 1 и 2 показано волновое сопротивление для рассмотренных ранее вычислительных экспериментов, на рис. 1 событие с межпланетной ударной волной, а на рис. 2 с суббурей. Волновое сопротивление, показанное на графиках, рассчитывалось как отношение амплитуд напряженностей

электрического поля к магнитному зарегистрированных на уровне поверхности Земли. Графики показывают существенную разницу для случая распространении сигналов системы «Альфа» с невозмущенной области в возмущенную и наоборот из возмущенной в невозмущенную, как во время события с межпланетной ударной волной, так и во время суббури. Видно, что влияние суббури более заметно во всех рассмотренных экспериментах.

Выводы

1. На основе вычислительных экспериментов по моделированию сигналов предающей антенны радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа» обнаружена существенная зависимость характера затухания амплитуды в зависимости от направления геомагнитного поля Земли. Показано, что вблизи антенны преобладает TE мода, а на расстоянии более 300 км основной становится TM мода.
2. Вычислительные эксперименты с сильно горизонтально неоднородной электронной концентрацией ионосферы полученной на основе данных радара EISCAT для событий 24 января 2012 года - взаимодействие межпланетной ударной волны с магнитосферой и последующей суббури показали, что изменения амплитуды сигналов радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа» вызванные действием геомагнитного поля и горизонтальными неоднородностями зависят от направления их распространения. Таким образом, в случае прохождения сигналов системы «Альфа» через полярные участки волновода Земля-ионосфера во время сложных гелиогеофизических условий на основе наземных измерений амплитуд отдельных компонент электромагнитного поля достоверное восстановление профиля электронной концентрации ионосферы на этих участках без предварительных сведений о её горизонтальной структуре не представляется возможным.

Литература

1. http://www.physics.otago.ac.nz/space/AARDDVARK_homepage.htm (17.10.2021).
2. Bashkuev Y., Advokatov V., et al. Analysis of the conditions for the radio waves propagation in the waveguide "Earth-Ionosphere" on the paths "Novosibirsk-Ulan-Ude" and "Komsomolsk-on-Amur-Ulan-Ude" during magnetic storms August 31-September 12, 2017. STRPEP 2018. E3S Web of Conferences, V. 62. id. 01002. DOI: 10.1051/e3sconf/20186201002. 2018.
3. Starodubtsev S.A., Baishev D.G., et al. Analyzing solar, cosmic, and geophysical events in September 2017, using SHICRA SB RAS complex observations. Solar-Terrestrial Physics. 2019. V. 5. Is. 1. P. 14–27. DOI: 10.12737/stp-51201903
4. Jacobsen T. The Russian VLF navaid system alpha, RSDN-20. Halden. Norway. <http://www.vlf.it/alphatrand/alpha.htm> (17.10.2021).
5. Wait J.R., Spies K.P. Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. Technical Note 300, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado. 1964. 96 p.
6. Schunk R., Nagy A. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry (2nd ed., Cambridge Atmospheric and Space Science Series). Cambridge: Cambridge University Press. 2009. DOI: 10.1017/CBO9780511635342
7. Korja T., Engels M., et al. Crustal conductivity in Fennoscandia – a compilation of a database on crustal conductance in the fennoscandian shield. Earth Planets Space. 2002. V. 54. N 5. P. 535–558. DOI: 10.1186/BF03353044
8. Хафизов А.В. Радионавигационные системы дальней навигации (РСДН): учебно-методическое пособие. Кировоград: Изд-во ГЛАУ. 2010. 30 с.
9. Berenger J.-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. J. Computational Phys. 1994. V. 114. N 2. P. 185–200. DOI: 10.1006/jcph.1994.1159
10. Akhmetov O., Mingalev O., et al. About horizontal inhomogeneities of electron concentration influence on the propagation of ULF signals in the Earth ionosphere wave guide. 2019. RWP IEEE. P. 224–227. DOI: 10.1109/RWP.2019.8810389
11. Akhmetov O.I., Mingalev I.V., et al. Determination of Ulf-wave characteristics most strongly reacting to minor changes of ionospheric electron density in a high-latitude region. Solar-Terrestrial Physics. 2019. V. 5. N 4. P. 81-90. DOI: 10.12737/stp-54201911
12. Лебедь О.М., Пильгаев С.В., и др. Оценка высоты ионосферного источника, образованного при ВЧ-нагреве стендом EISCAT/heating, по данным измерений фаз на сети высокоширотных станций в спокойных и возмущенных гелиогеофизических условиях. Вестник КНЦ РАН. 2017. № 4. С. 67-74.
13. Ларченко А.В., Пильгаев С.В., и др. Особенности структуры электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на арх. Шпицберген в экспериментах по нагреву ионосферы. Вестник КНЦ РАН. 2018. № 3. С. 115-119.
14. Ахметов О.И., Мингалев И.В., и др. Тестирование численной схемы интегрирования уравнений Максвелла для широкополосных сигналов на задаче распространения электромагнитных волн от ионосферного источника. Труды КНЦ РАН. 2019. Т. 8. P. 193-198. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.8.193-198

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.016

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН КНЧ-ДИАПАЗОНА ОТ КОНТРОЛИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА В ВЫСОКОШИРОТНЫХ РАЙОНАХ ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКОЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЫ НА ПРИМЕРЕ ПОЛУОСТРОВОВ РЫБАЧИЙ И СРЕДНИЙ

В.А. Любчик

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия; e-mail: lubchich@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены результаты трехмерного моделирования процесса распространения в земной коре электромагнитных волн крайне низкочастотного (КНЧ) диапазона, излученных контролируемым источником, в районе полуостровов Рыбачий и Средний. Модельные значения компонент электромагнитного поля соответствуют экспериментально измеренным значениям, полученным в рамках проекта FENICS-2019 по электромагнитному зондированию (ЭМЗ) земной коры Балтийского щита с использованием промышленных линий электропередач (ЛЭП). По результатам моделирования было показано, что существенное влияние на распространение электромагнитных волн КНЧ-диапазона в данном районе оказывает наличие зон тектонических разломов с повышенной электропроводностью, разделяющих Балтийский щит и Западно-Арктическую платформу, и присутствие морской воды, окружающей полуострова Средний и Рыбачий с трех сторон. Такая конфигурация электропроводящих объектов приводит к образованию макромасштабных замкнутых электрических контуров, в которых генерируются вторичные электромагнитные поля, направленные противоположно первичному полю от контролируемого источника.

Ключевые слова: электромагнитное зондирование, тектонический разлом, трехмерное моделирование.

Описание эксперимента. В 2019 году был проведен эксперимент FENICS-2019 по электромагнитному зондированию земной коры Балтийского щита с помощью промышленных ЛЭП. В рамках этого проекта группа сотрудников Полярного геофизического института (ПГИ) провела измерения в пределах полуостровов Рыбачий и Средний. Основной задачей исследования было изучение влияния мощного низкоомного осадочного чехла и крупномасштабных тектонических нарушений на закономерности распространения электромагнитных волн КНЧ-диапазона в земной коре. Полуострова Рыбачий и Средний расположены в зоне перехода от пород кристаллического Балтийского щита к осадочным породам Западно-Арктической платформы. Данная зона перехода характеризуется наличием крупных тектонических разломов. Так полуостров Средний отделен от Балтийского щита сбросом Карпинского, а между полуостровами Рыбачий и Средний проходит тектоническая система сдвига-надвигов Троллефьорд–Рыбачий–Кильдин (ТРК).

В качестве одной из антенн контролируемого источника электромагнитных волн использовалась промышленная ЛЭП – Л-403 длиной 130 км. В линии генерировались электромагнитные поля в диапазоне частот 0.194 - 94.22 Гц. В качестве контролируемого источника использовался экспериментальный образец мощного генератора, разработанный в ПГИ [1]. Измерения электромагнитных полей производилось в двух пунктах, расположенных в южной части полуострова Рыбачий и на полуострове Средний в окрестности буровой скважины «Пограничная-1». С помощью индукционного магнитометра с цифровой системой сбора и обработки информации, основанной на шестиканальном 22-битном АЦП с частотой дискретизации 1024 Гц [2], измерялись горизонтальные магнитные и электрические компоненты поля. Длина приемных электрических антенн составляла 100 м.

Экспериментально измеренные значения отношения амплитуды полного горизонтального электрического поля к полному горизонтальному магнитному полю были пересчитаны через кривые нормального поля в значения кажущегося сопротивления среды ρ_k . Экспериментальная кривая зависимости кажущегося сопротивления среды ρ_k от частоты электромагнитного поля f для точки измерения на полуострове Рыбачий соответствует трехслойной среде с наличием проводящего слоя, расположенного между высокоомным кристаллическим фундаментом и слоем с относительно повышенным удельным сопротивлением в верхней части разреза. В то же время, график кажущегося сопротивления ρ_k для точки измерения электромагнитного

поля на полуострове Средний более соответствует двухслойной среде, где верхний слой с повышенной электропроводностью расположен над плохо проводящим фундаментом.

Описание модели. В соответствии с подобным строением литосферы полуостровов Рыбачий и Средний была выбрана модель осадочного чехла для данной части Западно-Арктической платформы при проведении трехмерного моделирования процесса распространения электромагнитных волн КНЧ-диапазона в исследуемом районе. Модель соответствовала четырехслойной среде с удельным электрическим сопротивлением кристаллического фундамента $10000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. По результатам интерпретации данных ЭМЗ с контролируемым источником [3] для осадочного чехла севернее системы тектонических разломов ТРК была выбрана следующая модель: верхний слой, соответствующий породам собственно полуострова Рыбачий, мощностью 200 м с сопротивлением $2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, относительно высокоомный слой мощностью 1000 м с сопротивлением $5000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, слой с относительно пониженным сопротивлением $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ мощностью 5000 м . Для области между сбросом Карпинского и системой разломов ТРК модель земной коры состояла также из верхнего слоя мощностью 200 м с сопротивлением $2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, соответствующего породам собственно полуострова Средний, второго слоя, относящегося к осадочным породам, мощностью 1000 м с сопротивлением $500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и третьего слоя мощностью 5000 м с сопротивлением $5000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, относящегося к верхней части кристаллического фундамента. Эта модель базируется также на результатах бурения скважины «Пограничная-1» [4]. Удельная электропроводность моря в модели была принята 2 См/м , глубина слоя морской воды – 200 м . Тектонические зоны системы ТРК и сброса Карпинского, разделяющие Балтийский щит, полуострова Рыбачий и Средний, моделировались узкими линейными элементами шириной 1000 м с удельным сопротивлением $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, глубина погружения разломов была принята 10000 м . На рис. 1 представлен горизонтальный план построенной модели, соответствующий земной поверхности.

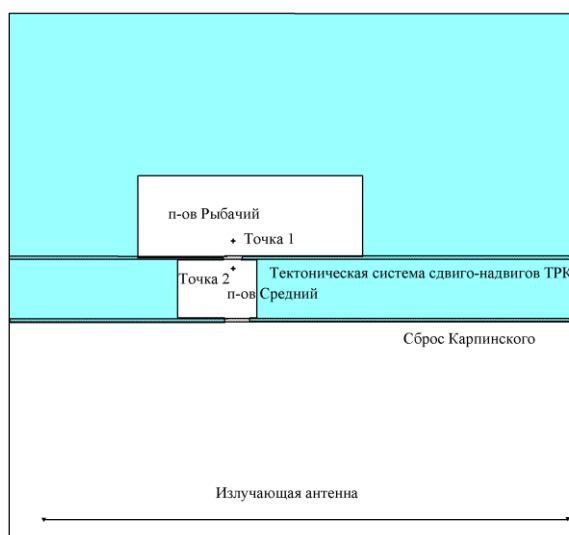


Рисунок 1. Горизонтальный план модели района полуостровов Рыбачий и Средний. Крестами обозначены точки, для которых рассчитывались модельные значения горизонтальных компонент электромагнитного поля. Узкие заштрихованные области соответствуют положению в модели зон тектонических разломов.

При моделировании использовался метод сеточной аппроксимации уравнений для векторного и скалярного потенциалов электромагнитного поля [5]. В этом методе электрические и магнитные поля представлены в виде суммы нормального (первичного) поля E_0, H_0 , обусловленного контролируемым источником, и аномального поля E, H , связанного с избыточной электропроводностью $\Delta\sigma$ в некоторых ограниченных областях среды. Для аномального электрического поля вводятся векторный A и скалярный φ потенциалы:

$$\vec{E} = \vec{A} + \nabla\varphi.$$

Значения аномального магнитного поля H определяются векторным потенциалом A :

$$\vec{H} = (i\omega\mu)^{-1} \nabla \times \vec{A}.$$

Для однозначного определения векторного потенциала используется калибровка Кулона. Тогда уравнение Гельмгольца для аномального электрического поля можно преобразовать в систему дифференциальных уравнений для векторного A и скалярного φ потенциалов:

$$\nabla^2 \vec{A} + i\omega\mu\sigma(\vec{A} + \nabla\varphi) = -S_E$$

$$\nabla \cdot (\sigma\vec{A}) + \nabla \cdot (\sigma\nabla\varphi) = -(i\omega\mu)^{-1} \nabla \cdot S_E,$$

где

$$S_E = i\omega\mu(\sigma - \sigma_0)\vec{E}_0,$$

$\sigma - \sigma_0$ – избыточная электропроводность в аномальных зонах среды, μ – магнитная проницаемость среды, ω – круговая частота электромагнитного поля.

Данная система дифференциальных уравнений удобна тем, что после сеточной аппроксимации мы получим систему линейных уравнений с ленточной матрицей, которая будет обладать свойством сильной диагональной доминантности, что значительно упрощает решение системы. Система линейных уравнений с диагонально доминантной матрицей решалась с помощью итерационного метода Зейделя.

Для сеточной аппроксимации системы дифференциальных уравнений была выбрана трехмерная прямоугольная сетка с линейными размерами ячеек $2000 \times 2000 \times 500$ м (за исключением верхнего слоя, где глубина моря была принята 200 м, и зон тектонических нарушений, где размер ячеек составлял $2000 \times 500 \times 500$ м). Моделирование проводилось для частот генерируемого электромагнитного поля $f = 0.642, 6.422, 64.22$ Гц. Результаты проведенного моделирования для точек измерения электромагнитного поля на полуостровах Средний и Рыбачий представлены в таблице 1. Как видно из таблицы, модельные значения амплитуд компонент электромагнитного поля, в целом, совпадают с экспериментально измеренными величинами.

Таблица 1. Модельные и экспериментально измеренные значения амплитуд компонент электромагнитного поля в точках наблюдения на полуостровах Рыбачий и Средний.

	Результаты моделирования для полуострова Рыбачий (точка 1)			Результаты моделирования для полуострова Средний (точка 2)		
	f = 0.642, Гц	f = 6.422, Гц	f = 64.22, Гц	f = 0.642, Гц	f = 6.422, Гц	f = 64.22, Гц
H_x экспериментальные значения, А/м	6.21E-07± 1.84E-07	7.35E-08± 1.3E-08	1.27E-08± 2.11E-09	3.35E-07± 1.64E-07	1.05E-07± 5.91E-08	9.48E-09± 2.72E-09
H_{mx} модельные значения, А/м	5.12E-07	1.42E-07	2.65E-08	4.22E-07	1.91E-07	3.32E-08
H_y экспериментальные значения, А/м	1.06E-06± 6.1E-07	3.74E-07± 2.64E-08	1.13E-07± 6.29E-09	1.54E-06± 1.07E-07	5.45E-07± 1.02E-07	1.54E-07± 2.61E-09
H_{my} модельные значения, А/м	2.34E-06	8.62E-07	1.77E-07	3.18E-06	1.17E-06	2.30E-07
E_x экспериментальные значения, В/м	6.07E-09± 1.95E-11	1.09E-08± 6.86E-11	1.31E-08± 7.36E-10	6.79E-08± 2.46E-10	2.08E-08± 1.65E-10	8.14E-09± 1.32E-10
E_{mx} модельные значения, В/м	2.91E-08	1.26E-08	6.16E-09	3.41E-08	1.71E-08	8.01E-09
E_y экспериментальные значения, В/м	7.23E-08± 3.28E-10	1.10E-08± 6.53E-11	9.85E-10± 3.36E-10	4.36E-08± 1.6E-10	1.25E-08± 1.03E-10	1.89E-09± 1.37E-10
E_{my} модельные значения, В/м	1.20E-08	1.68E-09	9.23E-10	2.15E-08	2.77E-09	1.15E-09

Результаты моделирования. Наблюдаемые некоторые расхождения между модельными значениями и экспериментально измеренными величинами можно объяснить следующим образом. Присутствие морской воды с высокой электропроводностью, окружающей полуострова Средний и Рыбачий с трех сторон, а также наличие высокопроводящих зон тектонических разломов приводит к образованию замкнутых контуров, в которых генерируются вторичные электромагнитные поля, направленные противоположно первичному полю от контролируемого источника. В таблице 2, для примера, приведены модельные значения компонент нормального поля, обусловленного контролируемым источником, и аномального поля, связанного с избыточной электропроводностью в аномальных зонах, в точке наблюдений на полуострове Средний для частоты электромагнитного поля $f = 64.22$ Гц.

Таблица 2. Модельные значения компонент нормального и аномального электромагнитных полей в точке наблюдения на полуострове Средний для частоты поля $f = 64.22$ Гц.

нормальное поле E_{0x} , В/м	-8.52E-07-i7.89E-10	аномальное поле E_{ax} , В/м	8.46E-07-i4.23E-09
нормальное поле E_{0y} , В/м	-1.20E-07-i8.32E-11	аномальное поле E_{ay} , В/м	1.19E-07-i6.45E-10
нормальное поле H_{0x} , А/м	-3.79E-08-i3.74E-08	аномальное поле H_{ax} , А/м	2.04E-08+i9.20E-09
нормальное поле H_{0y} , А/м	2.71E-07+i2.64E-07	аномальное поле H_{ay} , А/м	-1.47E-07-i7.02E-08

Подобный эффект образования макромасштабных замкнутых электрических контуров при проведении электромагнитных зондирований на Кольском полуострове с использованием мощных контролируемых источников рассматривался в работе [6]. Итоговые модельные значения получаются как разность первичного и вторичных электромагнитных полей и по амплитуде модельные значения на один – два порядка меньше, чем амплитуды первичных и вторичных полей. В такой ситуации сложно добиться идеального совпадения модельных значений с экспериментально измеренными величинами при использовании достаточно грубой модели земной коры в районах полуостровов Рыбачий и Средний.

Вывод. Таким образом, можно сделать вывод, что наличие мощных зон тектонических разломов, обладающих повышенной электропроводностью, и присутствие морской воды оказывают существенное влияние на результаты ЭМЗ с контролируемым источником в районе полуостровов Средний и Рыбачий, расположенных в зоне перехода от пород кристаллического Балтийского щита к осадочным породам Западно-Арктической платформы. Возникновение замкнутых макромасштабных контуров, в которых генерируются вторичные аномальные электромагнитные поля, направленные противоположно первичному полю от контролируемого источника, приводит к понижению амплитуд измеренных компонент электромагнитного поля.

Список литературы

1. Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Баранник М.Б., Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Колобов В.В., Прокопчук П.И., Селиванов В.Н., Копытенко Ю.А., Жамалетдинов А.А. Повышающий преобразователь и система энергопередачи генератора “Энергия-2” для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений // Сейсмические приборы. 2008. Т. 44. № 4. С. 43–66.
2. Филатов М.В., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. Четырехканальный 24-разрядный синхронизированный с мировым временем аналого-цифровой преобразователь // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 73–75.
3. Любич В.А., Шипилов Э.В., Юрик Р.Ю. Первые результаты экспериментального электромагнитного зондирования земной коры на полуостровах Средний и Рыбачий // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. №17. С.334–338.
4. Куликов Н.В., Коновалов В.А., Медведев С.А., Чигвинцев В.Д. Новые данные о геологическом строении севера Кольского полуострова // Разведка и охрана недр. 2007. № 4. С. 22–25.
5. Aruliah D.A., Ascher U.M., Haber E., Oldenburg D. A method for the forward modelling of 3D electromagnetic quasi-static problems // Mathematical Models in Applied Sciences (M3AS). 2001. V. 11. P. 1–21.
6. Велихов Е.П., Григорьев В.Ф., Жданов М.С., Коротаев С.М., Кругляков М.С., Орехова Д.А., Попова И.В., Терещенко Е.Д., Щорс Ю.Г. Электромагнитное зондирование Кольского полуострова мощным крайне низкочастотным источником // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438. №3. С. 390–395.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.017

ИОНОСФЕРНАЯ ОБЛАСТЬ РАССЕЯНИЯ ОНЧ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

А.С. Никитенко¹, М.В. Кузнецова¹, Ю.В. Федоренко¹, Ю. Маннинен²,
Н.Г. Клейменова³, С.В. Пильгаев¹, А.В. Ларченко¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Геофизическая обсерватория Соданкюля, Соданкюля, Финляндия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты анализа всплесков аврорального хисса, зарегистрированных в период с 7 ноября 2018 года по 9 февраля 2020 года на двух пространственно разнесенных точках - Ловозеро (Россия) и Каннуслехто (Финляндия). Всего за время наблюдений выбрано 22 события. Регистрируемые всплески были разбиты по общим признакам на четыре типа: 1) область рассеяния имеет размеры, малые относительно расстояния между станциями; 2) область рассеяния перемещается по долготе; 3) область рассеяния вытянута по долготе; 4) смешанный тип. Подробно рассмотрены примеры регистрации аврорального хисса, соответствующие тому или иному типу и сформулированы их отличительные особенности.

1. Введение

Авроральный хисс - один из типов естественных электромагнитных ОНЧ (очень низкочастотных 3 - 30 кГц) излучений, достаточно часто регистрируемых на земной поверхности. Генерация хисса происходит на высоте 10 - 20 тыс. километров в результате развития черенковской неустойчивости [1]. Наблюдения аврорального хисса на земле и на спутниках достаточно часто связаны с возникновением потока высыпавшихся электронов с энергиями < 1 кэВ [2, 3]. Волновая нормаль генерируемых волн лежит на резонансном конусе, который для электронов с малыми энергиями (< 1 кэВ) близок к 90°. Такие волны принято считать квазиэлектростатическими. Квазиэлектростатические волны не способны выйти к земной поверхности, поскольку они испытывают полное внутреннее отражение в нижней ионосфере. Кроме того, отражение может наступать и в верхней ионосфере, где частота волны становится равной локальной частоте ниже-гибридного резонанса [4]. Общепринятым механизмом выхода квазиэлектростатических волн к земной поверхности является их рассеяние на мелкомасштабных (с длиной волны от десятков до сотен метров) неоднородностях электронной концентрации в верхней ионосфере [4]. В работах [5 - 7] показано, что область в верхней ионосфере, занятая неоднородностями (далее область рассеяния), локальна. Использование данных наземных наблюдений ОНЧ аврорального хисса с привлечением моделирования распространения аврорального хисса от области генерации до наземного наблюдателя [5, 7] позволяет оценить положение области рассеяния.

Положение и динамика области рассеяния представляют особенный интерес для исследователей. Используя накопленный опыт наблюдения ОНЧ аврорального хисса, в данной работе предпринята попытка распределить типы областей рассеяния по общим признакам.

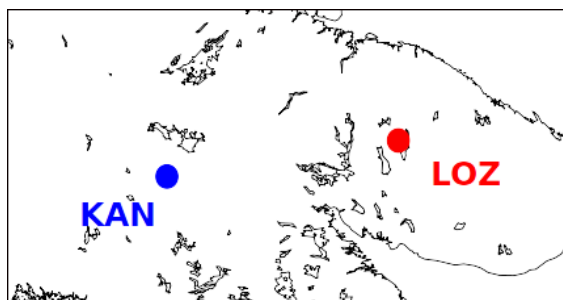


Рисунок 1. Карта расположения точек ОНЧ наблюдений Каннуслехто (KAN) и Ловозеро (LOZ).

2. Аппаратура и обработка данных

В данной работе представлены результаты наземных ОНЧ наблюдений в точках Ловозеро (LOZ, Россия) и Каннуслехто (KAN, Финляндия), разнесенных по долготе на расстояние около 400 км (рис. 1). Регистрация ведется с использованием идентичных приемников, способных измерять горизонтальные компоненты магнитного поля H_x , H_y и вертикальную компоненту электрического поля E_z . Особенности приемника являются низкий уровень собственных шумов и прецизионная привязка данных к мировому времени с ошибкой не более 1 мкс. Более подробно устройство приемника описано в работе [8]. Антенны приемников тщательно откалиброваны, что позволяет проводить сравнение результатов наблюдений на двух станциях. Калибровка магнитных антенн ведется с использованием тороида. С его помощью через плоскость антенн создается магнитный поток известной величины, после чего оцениваются АЧХ и ФЧХ измерительных каналов. ФЧХ электрической антенны оценивается с использованием эквивалента антенны. Оценка АЧХ производится из сигналов атмосфериков на частоте ниже поперечного резонанса волновода Земля-ионосфера $\sim 1,8$ кГц. Для обеспечения стабильности и точной синхронизации фазы синусоидального калибровочного сигнала используется устройство для калибровки регистраторов электромагнитного поля [9].

В данной работе ведется анализ узкополосных сигналов, полученных после фильтрации исходных записей полосовым фильтром с центральной частотой в окрестности максимума интенсивности аврорального хисса - 8 кГц, и шириной полосы 1 кГц. Для анализа излучений в данной работе используются индекс круговой поляризации магнитного поля P_c , отношение E_z/H_t , где H_t - горизонтальная компонента магнитного поля, и плотность потока энергии. Индекс P_c рассчитан в соответствии с работой [10]. Величины P_c и E_z/H_t относительно стабильны во времени, поэтому в данной работе мы рассматриваем только их усредненные значения. Плотность потока энергии представлена в виде распределения по обратному азимуту вектора Пойнтинга $\rho(\phi)$. Расчет $\rho(\phi)$ производился в предположении об эргодичности шума, при этом распределение по ансамблю реализаций заменялось распределением по времени [5,7].

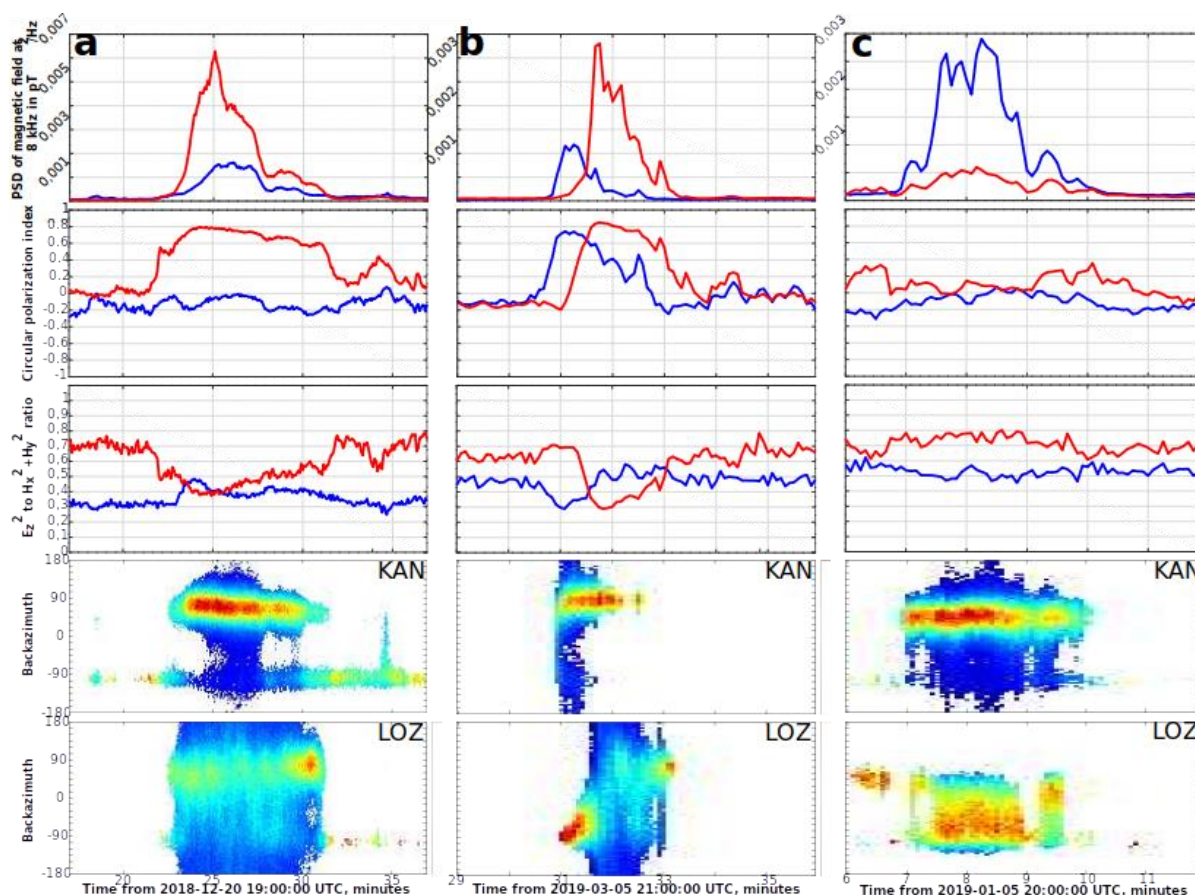


Рисунок 2 (сверху вниз) спектральная плотность мощности магнитного поля, индекс круговой поляризации, отношение вертикальной компоненты электрического поля к горизонтальной компоненте магнитного, распределения плотности потока энергии по азимутальным углам вектора, обратного вектору Пойнтинга, для станций KAN и LOZ в случае а) области рассеяния с размерами, малыми относительно расстояния между станциями б) перемещения области рассеяния по долготе в) области рассеяния, вытянутой по долготе.

3. Наблюдения

В работе рассматриваются всплески аврорального хисса, зарегистрированные на станциях KAN и LOZ в период с 07 ноября 2018 года по 9 февраля 2020 года, когда на станции KAN функционировал регистратор вертикальной компоненты электрического поля. Всего за этот период на станции LOZ отмечено 104 дня, когда регистрировались всплески аврорального хисса. В KAN - 88 дней. Авроральный хисс регистрировался на этих станциях в виде последовательности коротких по длительности всплесков или изолированных всплесков. Средняя продолжительность таких событий составила около 15 мин для обеих станций.

Из всего набора событий были отобраны 22 интервала, в течение которых на обеих станциях наблюдались всплески аврорального хисса. При этом выбирались случаи с отношением сигнал/шум не меньше 10 дБ. Выбранные события были распределены по общим признакам на 4 типа. Рассмотрим особенности каждого типа.

3.1 Область рассеяния с размерами, малыми относительно расстояния между станциями

Из рассматриваемых событий отмечено пять, для которых параметры поля имели схожую динамику, вызванную, на наш взгляд, существованием области рассеяния с размерами, малыми относительно расстояния между станциями. Рассмотрим отличительные особенности этой динамики. В качестве примера на рисунке 2а представлены спектральная плотность мощности магнитного поля, индекс круговой поляризации, отношение E_z/H_t и распределения плотности потока энергии по обратному азимуту вектора Пойнтинга, рассчитанные для станций KAN и LOZ во время регистрации всплесков аврорального хисса 20 декабря 2018 года в интервале 19:17 - 19:37 UT. При существовании области рассеяния с относительно малыми размерами мощность магнитного поля на одной из станций (в данном случае LOZ) в 3 - 5 раз больше, чем на другой станции (KAN). Индекс P_c на станции с большими значениями мощности (LOZ) принимает значения, близкие к 1. Это означает, что на этой станции регистрируются волны с правой, близкой к круговой, поляризацией [5]. В данном случае точка наблюдений находится в окрестности проекции области рассеяния на земную поверхность (далее проекция области рассеяния). На соседней станции (KAN) индекс P_c меньше на 0,5 - 0,8, т.е. наблюдаемые волны испытали отражения от стенок волновода Земля-ионосфера. На станции с большим значением мощности магнитного поля (LOZ) наблюдается уменьшение параметра E_z/H_t . По-видимому, это означает нормальное падение регистрируемых волн. В этом случае для соблюдения граничных условий вертикальная компонента электрического поля будет тем меньше, чем выше проводимость отражающей поверхности. На соседней станции наблюдается увеличение отношения E_z/H_t . Это можно объяснить тем, что в эту точку преимущественно приходят волны с углом падения отличным от нуля. В точке, расположенной в окрестности проекции области рассеяния, (LOZ) наблюдается плотность потока энергии, распределенная по всему диапазону обратного азимута - 360° (рис. 2а). На достаточно большом удалении от проекции максимум распределения $p(\varphi)$ указывает приблизительно на центр проекции области рассеяния [5, 7].

3.2 Перемещение области рассеяния по долготе

На рисунке 2б представлены спектральная плотность мощности магнитного поля и параметры P_c , E_z/H_t и $p(\varphi)$ во время регистрации всплесков аврорального хисса на станциях KAN и LOZ 5 марта 2019 года 21:29 - 21:36 UT. Рассматриваемое событие, на наш взгляд, является примером перемещения области рассеяния. Из 22-х событий было отмечено только три таких случая. По мере приближения области рассеяния к одной из станций на ней (KAN) начинается увеличение мощности магнитного поля и индекса P_c , а также уменьшение параметра E_z/H_t , при малых изменениях этих параметров или полном их отсутствии (в данном случае) на другой станции (LOZ). Затем начинается плавное возвращение мощности и параметров P_c , E_z/H_t к исходному уровню, соответствующему подстилающему шуму волновода Земля-ионосфера. При этом на другой станции (LOZ) происходят аналогичные изменения во времени этих параметров с некоторой временной задержкой. Величина задержки определяется, по-видимому, скоростью перемещения области рассеяния. В рассматриваемом примере процесс перемещения наиболее ярко отражается во временном изменении распределения плотности потока энергии по обратному азимуту вектора Пойнтинга (см. рис. 2б). Во время возникновения всплеска в 21:31 UT в KAN на фоне высокого значения индекса P_c и уменьшения отношения E_z/H_t наблюдается «широкое» распределение $p(\varphi)$. Волны приходят в точку наблюдений со всех направлений, что, вероятно, свидетельствует о расположении проекции области рассеяния близко к точке регистрации. Затем распределение $p(\varphi)$ сужается, а его максимум указывает на восток, в направлении станции LOZ. Такие изменения распределения $p(\varphi)$ и сопровождающие их изменения параметров P_c и E_z/H_t , по-видимому, указывают на перемещение области рассеяния в восточном направлении. В LOZ во время возникновения всплеска (~ 21:31 UT) максимум распределения $p(\varphi)$ указывает на запад в направлении станции KAN, где возник авроральный хисс. По мере увеличения мощности всплеска, индекса P_c и уменьшения отношения E_z/H_t распределение $p(\varphi)$ изменяется от «узкого» на «широкое». Вероятно, в это время область рассеяния смещается и становится над точкой LOZ. В 21:33 UT распределение $p(\varphi)$ «сужается», причем его максимум указывает на восток. Происходит смещение области рассеяния к востоку.

3.3 Область рассеяния, вытянутая по долготе, и смешанный тип

На рисунке 2с представлены параметры поля во время регистрации на станциях KAN и LOZ всплесков аврорального хисса при существовании вытянутой по долготе области рассеяния. Событие зарегистрировано 5 января 2019 года в 20:06 — 20:12 UT. Всего отмечено шесть таких событий. Во время существования вытянутой области рассеяния индекс P_c и отношение E_z/H_i принимают близкие значения на обеих станциях (рис. 2с). Максимумы распределения $p(\varphi)$ указывают в направлении соседней станции. В рассматриваемом примере, по-видимому, центр симметрии области рассеивания несколько ближе к KAN, чем к LOZ. Этим можно объяснить различия мощности всплесков на обеих станциях.

Чаще всего (8 случаев из 22) появляются области рассеяния смешанного типа. В основном появляются несколько областей различных размеров. В работе [7] рассмотрен пример такого события. Также в работе проведена интерпретация данных наземных наблюдений с использованием модели распространения аврорального хисса от области генерации до наземного наблюдателя.

Выводы

В работе представлены результаты анализа данных наземных наблюдений аврорального хисса в двух точках - Ловозеро (Россия) и Каннуслахто (Финляндия). Используются данные, полученные за период с 7 ноября 2018 года по 9 февраля 2020 года. Регистрируемые всплески разделены на четыре типа по пространственной структуре области рассеяния: (1) область рассеяния имеет размеры, малые относительно расстояния между станциями; (2) область рассеяния перемещается по долготе; (3) область рассеяния вытянута по долготе; (4) смешанный тип.

Для каждого типа сформулированы отличительные особенности поведения спектральной плотности мощности горизонтальной компоненты магнитного поля, индекса круговой поляризации, отношения вертикальной компоненты электрического поля к горизонтальной компоненте магнитного и распределения плотности потока энергии по азимутальным углам вектора, обратного вектору Пойнтинга.

Литература

1. Sazhin S.S., Bullough K., Hayakawa M. Auroral hiss: a review // Planet. Space Sci. V. 41. P. 153–166. 1993. doi 10.1016/0032-0633(93)90045-4
2. Hoffman R.A., Laaspere T. Comparison of very-low-frequency auroral hiss with precipitating low-energy electrons by the use of simultaneous data from two OGO 4 experiments // J. Geophys. Res. V. 77. P. 640–650. 1972. doi 10.1029/JA077i004p00640
3. Laaspere T., Hoffman R.A. New results on the correlation between low-energy electrons and auroral hiss // J. Geophys. Res. V. 81. P. 524–530. 1976. doi 10.1029/JA081i004p00524
4. Sonwalkar V.S., Harikumar J. An explanation of ground observations of auroral hiss: Role of density depletions and meter-scale irregularities // J. Geophys. Res. V. 105. P. 18.867–18.884. 2000. doi 10.1029/1999JA000302
5. Никитенко А.С., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В. и др. Оценка положения и размера области рассеяния аврорального хисса по данным высокоширотных наблюдений в пространственно-разнесенных точках // Известия Российской академии наук. Серия физическая. Т.85. №3. С.398–403. 2021. doi 10.31857/s0367676521030200
6. Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В., Клейменова Н.Г. и др. Первые результаты ОНЧ-наблюдений во время полярной экспедиции “Трансарктика 2019” // Геомагнетизм и аэрномия. Т.60. №2. С.216–219. 2020. doi 10.31857/s0016794020020121
7. Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю. и др. Моделирование прохождения аврорального хисса от области генерации к земной поверхности // Геомагнетизм и аэрномия. Т.59. №5. С. 618–627. 2019. doi 10.1134/S0016794019050079
8. Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В. и др. Трехкомпонентный приемник сигналов очень низкого частотного диапазона с прецизионной привязкой данных к мировому времени // Приборы и техника эксперимента. №5. С.115–125. 2021. doi 10.31857/s0032816221040248
9. Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Лебедь О.М. и др. Устройство для калибровки регистраторов электромагнитного поля // Труды Кольского научного центра РАН. №3. С.75–80. 2017.
10. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1976.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.018

LONG-TERM TRENDS IN COSMIC RAYS AND GEOMAGNETIC FIELD SECULAR VARIATIONS

A.G. Elias^{1,2}, B.S. Zossi^{1,2}, A.R. Gutierrez Falcon³, E.S. Comedi³ and B.F. de Haro Barbas^{1,3}

¹Laboratorio de Ionosfera, Atmosfera Neutra y Magnetosfera - LIANM, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, Argentina

²INFINOA, CONICET-UNT, Tucumán, Argentina

³Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, Argentina

Abstract. Cosmic rays are modulated by solar and geomagnetic activity. In addition, the flux that arrives to the Earth is sensitive to the inner geomagnetic field through its effect on the geomagnetic cutoff rigidity, R_c . This field has been decaying globally at a rate of ~5% per century from at least 1840. However, due to its configuration and non-uniform trend around the globe, its secular variation during the last decades has induced negative and positive R_c trends depending on location. In the present work, the database from the World Data Center for Cosmic Rays (WDCCR) is used to analyze long-term trend variations linked to geomagnetic secular variations. This database includes more than 100 stations covering, some of them, almost seven decades since the 1950's. Those stations spanning more than 20 years of data are selected for the present study in order to adequately filter solar activity effects.

Introduction. The Earth's magnetic field of internal origin has been decaying at a rate of ~5% per century, at least since the 1840's, with evidences suggesting that this decay began much earlier. This behavior led us to think of an undergoing reversal or excursion, even though the possibility of a recovery without the occurrence of these extreme events is feasible as well (Panovska *et al.*, 2019; Brown *et al.*, 2018). Nevertheless, the intensity of the global field will most likely continue to decrease in the near future with consequent changes in our planet's magnetic shield (Tarduno, 2018).

The cutoff rigidity (R_c) can be thought of as a quantitative measure of this shielding since it corresponds to the minimum energy needed by a charged particle coming from outer space to reach a given location at the Earth. This parameter can be obtained calculating charged particle trajectories in the Earth's magnetic field, which requires numerical solutions of differential equations due to the field complexity. There are also analytical approximations considering that 80% of the field can be described by a pure dipolar component using Störmer theory (Störmer, 1955).

Considering R_c tabulated values by Gvozdevskii *et al.* (2016), obtained from trajectory calculations based on the equation of motion of charged particles in the geomagnetic field given by the IGRF (Thebault *et al.*, 2015), Comedi *et al.* (2020) obtained the secular variation spatial pattern of R_c for the period 1900-2020 in a $5^\circ \times 15^\circ$ latitude-longitude grid by estimating the linear trend α at each grid point from

$$R_c = \alpha t + \beta \quad (1)$$

where t is time, and regression coefficients α and β are estimated with least squares. Negative, as well as positive R_c trends are obtained according to location.

A decrease in R_c would imply that particles with energies that before were not enough to enter the atmosphere, now they do. This could suggest a flux increase, like for example in cosmic rays' case. With this assumption, cosmic ray time series are analyzed in order to detect long term trends and its possible association with the geomagnetic field secular variation effects on R_c .

Data and methodology. Cosmic ray flux (CR) from the World Data Center for Cosmic Rays (WDCCR, <http://cidas.isee.nagoya-u.ac.jp/WDCCR/>) database is used, which includes more than 120 stations covering, some of them, almost seven decades since the 1950's. 74 stations were selected according to their time span (2 to 3 solar cycles minimum, ~20 to 30-year), data completeness and homogeneity. These CR time series were checked for outliers, and even though their number in percentage was low they were eliminated.

CR is modulated by solar activity level being weaker for low levels and vice versa. Using the sunspot number, R_z , as a solar activity proxy, the linear correlation coefficient between CR and R_z results higher than -0.8 in almost all the cases. This means that most of CR variance is explained by solar activity, which turns necessary filtering its

effect before estimating the trends we are looking for. We do this by estimating the residuals from the linear regression between the 12-month running means of CR and Rz, through

$$CR_{\text{residual}} = CR - (a Rz + b) \quad (2)$$

where a and b are the least square coefficients of CR vs. Rz.

Finally, the linear trend α' of these residuals was assessed through the linear regression

$$CR_{\text{residual}} = \alpha' t + \beta' \quad (3)$$

where regression coefficients α' and β' are estimated with least squares as in the case of Rc in Equation (1).

Results. As a preliminary result we present the α' sign (positive or negative) in Figure 1 of all stations analyzed without discriminating the period over which each trend value is estimated. It should be noted that the period covered by each station included in this analysis is different and in many cases there is not even overlap. In addition, although we performed a linear estimate for the whole period 1900-2020 in the case of α (shown also in Figure 1) it is not strictly linear for all locations.

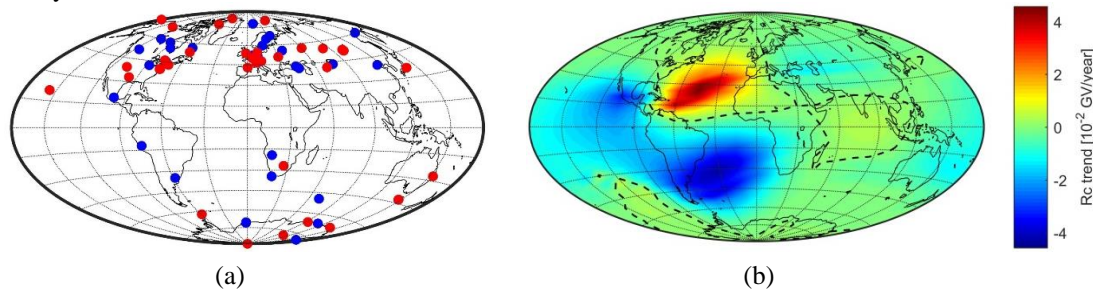


Figure 1. (a) Cosmic ray trends according to their sign: negative (red) and positive (blue) for 74 stations from the World Data Center for Cosmic Rays (WDCCR) database (<http://cidas.isee.nagoya-u.ac.jp/WDCRR/>). (b) Rc trends obtained from trajectory based estimations from *Gvozdevskii et al.* (2016) (black dashed line indicates $\alpha=0$) (figure from *Comedi et al.*, 2020).

Discussion. The expected result for α' is: positive values (blue dots in Figure 1a) in regions where α is negative (green-blue areas in Figure 1b), and negative values (red dots in Figure 1a) in regions where α is positive (yellow-red areas in Figure 1b). There seems to be limited global agreement between CR and Rc long-term trends. However, there is a hint of consistency around the strong positive and negative patches in the western hemisphere, which may be due to the actual rotation and displacement of the Earth's dipole axis with a stronger effect due to rotation (*Comedi et al.*, 2020).

Several reasons could be mentioned to explain our results, and the main are regarding our methodology, which will be considered in a future work: trends are not entirely linear and trend periods are not homogeneous in the first place, and secondly bad filtering of solar activity effect, taking into account that estimating the residuals from a linear regression with Rz for the whole period may not be enough. The effect of additional trend sources may be thought of as well.

Acknowledgements. We acknowledge the contribution of the WDC for Cosmic Rays, Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, for full and open access to cosmic ray data.

References

- Brown M., Korte M., Holme R., Wardinski I., Gunnarson S. (2018). Earth's magnetic field is probably not reversing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* PNAS, 115, 5111-5116. <https://doi.org/10.1073/pnas.1722110115>
- Comedi E.S., Elias A.G., Zossi B.S. (2020). Spatial features of geomagnetic cutoff rigidity secular variation using analytical approaches. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 211, 105475. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105475>
- Gvozdevsky B.B., Abunin A.A., Kobelev P.G., Gushchina R.T., Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. (2016). Magnetospheric effects of cosmic rays. 1. Long-term changes in the geomagnetic cutoff rigidities for the stations of the global network of neutron monitors. *Geomagn. Aeron.*, 56, 381–392. <https://doi.org/10.1134/S0016793216040046>
- Panovska S., Korte M., Constable C.G. (2019). One hundred thousand years of geomagnetic field evolution. *Reviews of Geophysics*, 57, 1289-1337. <https://doi.org/10.1029/2019RG000656>
- Störmer C. (1955). *The polar aurora*. Oxford Clarendon Press, London.
- Tarduno J.A. (2018). Subterranean clues to the future of our planetary magnetic shield. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* PNAS, 115, 13154–13156. <https://doi.org/10.1073/pnas.1819025116>
- Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D., et al. (2015). International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*, 67, 79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.019

EIGEN ENERGY EXCHANGE MODES OF MAGNETOSPHERE AT LONG-LASTING STOCHASTIC COUPLING WITH SOLAR WIND

A.V. Moldavanov

Belkin International Inc., Los Angeles, USA; e-mail: trandrei8@gmail.com

Abstract. Simulation of energy evolution for magnetosphere having infinite number of energy links with solar wind in assumption that all links are executed by energy continuity equation is conducted. Found closed form solution \mathcal{Y} is a function of magnetosphere's energy exchange rate y and in its physical meaning it is an integral efficiency of energy exchange. It is shown that quantity \mathcal{Y} is confined by the rate y . As a result, \mathcal{Y} and the total exchange energy E can take on certain discrete levels, as a result the spectrum for \mathcal{Y} and E is quantized.

1. Introduction

In terms of system science [1], a magnetosphere of the Earth (M_oE) is an open thermodynamic system (OTS) maintaining the permanent energy exchange with its environment where solar wind (SW) takes the main role. To highlight this fact, below we will call an environment of M_oE as SW.

Because the energy sources and sinks (energy agents) of M_oE are widely scattered in space and time, the research of an energy budget for M_oE causes serious issues. That is why usually the list of the accounted energy agents reduces to just a few ones which make the most significant contribution (based on experimental results and preliminary consideration) to M_oE dynamics.

Meanwhile, achievements of modern data science demonstrate an essential dependence of the obtained results on the quality of data [2]. In particular, it assumes consideration of contribution from all available data agents irrelevant of the prejudgement on its relative importance for the given problem. So, accounting of as many energy agents as possible becomes the necessity for accurate evaluation of energy budget of M_oE as well.

Also, considering the ever-changing character of agents it is scarcely possible to adequately describe M_oE in the terms of deterministic quantities. In this sense, use of a stochastic approach is regarded more warranted.

So, purpose of this report is to apply the model of energy evolution for stochastic system with infinite number of the random energy agents [3] to simulation of the energy spectrum of M_oE .

2. Approach substantiation

Follow [3], in the further text, we abstract from the real nature of the various energy fluxes between M_oE and SW. It is thought that the physical quantities involved into description of an energy exchange are not attributed to any specific process likewise electromagnetic, thermal, optical, mechanical and so on. Instead, as soon as any energy transportation which affects energy balance of M_oE upon arrival has occurred, it falls under our consideration.

Then, it is possible to unify all above energy exchange processes on the same mathematical basis. Use of an infinite number of energy links guarantees that every single exchange process will be accounted.

So, we take an energy continuity equation as a unified mathematical abstraction of a single energy link between M_oE and SW

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -Div \mathbf{J} \quad (1)$$

where ε is an energy volume density, t is time, \mathbf{J} is energy flux, Div is a divergence operator. We consider an infinite multitude of similar independent links as an energy image of M_oE . And SW is simulated by an energy bath of unlimited capacity.

Though at every moment, all energy links are available for an energy transfer inwards or outwards M_oE , however only one link will be picking up and this link will take a role of the instant energy agent. It is believed that the random energy transfers δQ_{in} (inward M_oE) and δQ_{out} (outward M_oE) cannot coexist at the same time, *i.e.*, general energy flow $\delta Q = \delta Q_{in} \oplus \delta Q_{out}$, where \oplus denotes exclusive disjunction.

3. Mathematical formalism

So, based on (1), concisely the mathematical model for energy evolution of M_oE is

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t} = -Div \mathbf{J}_i \end{array} \right. \quad (2)$$

which at counter $i \rightarrow \infty$ converts to

$$\frac{dU}{Q} = -\frac{dy}{y} x, \quad (3)$$

integration of (3) yields

$$\delta Y(x, y) = x \cdot \ln y \quad (4)$$

with the closed-form solution for an integral efficiency of energy exchange

$$Y(y) = -\iint_D \delta Y(x, y) = -\int_{-1}^1 dx \cdot \int_0^y \ln y dy$$

which after applying of boundary conditions is

$$Y(y) = y - y \ln y \quad (5)$$

and the total energy of exchange

$$E(y) = \int_0^y Y(z) dz = \frac{3y^2}{4} - \frac{y^2}{2} \ln y \quad (6)$$

where $x = \cos \beta$ is continuous random quantity, $y = J/J_0$ - unitless energy rate, U is internal system energy, normalizing constant $J_0 > 0$, $Q = J \cdot dS_A dt$, S_A is area, $\beta = d\mathbf{J} \wedge \mathbf{n}$, \mathbf{n} is a unit normal oriented in the direction of incoming energy flux, $D \subseteq \mathbf{R}^2$ is phase space for all microstates of δY .

Now, find y satisfying condition $Y(y) = 0$. Then, resolving (5) in respect of y

$$y_1 = \exp[1 + W_L(-1, -\frac{Y}{e})] = 0 \quad (7.a)$$

$$y_2 = \exp[1 + W_L(0, -\frac{Y}{e})] = e \quad (7.b)$$

where W_L is a Lambert function, $W_L(0)$ is the upper branch and $W_L(-1)$ is the lower one [4].

4. Boundary problem for function Y

Solution $Y(y)$ is bounded within the range $[0, e]$ (7.a,b) and, formally, we have a two-point boundary value problem on the finite interval $[0, e]$

$$Y(0) = Y(e) = 0 \quad (8)$$

For (5), to meet (8) should hold

$$1 = \pm n \ln y_n \quad (9)$$

so, at $|\ln y| \leq 1$, i.e., in the y -range $[1/e, e]$

$$y_n = \exp[\pm \frac{1}{n}] \quad (10)$$

with appropriate non-trivial harmonics

$$Y_n = y_n - y_n \ln y_n \quad (11)$$

where $n = 1, 2, \dots$

So, the y -points (10) are the nodes of the discrete spectrum (Fig. 1).

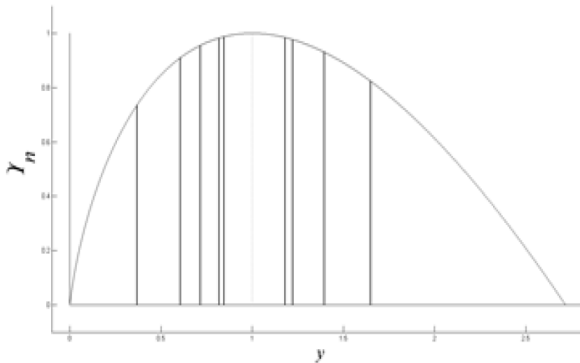


Figure 1. Discreteness of spectrum for integral efficiency of energy exchange Y .

The discrete spectrum for Y_n formed during evolution of MoE is shown. In the plot, by an abscissa axis, a unitless energy exchange rate $y = J/J_0$ is indicated, by an ordinate axis the integral efficiency of energy exchange Y (a). A few first harmonics of Y_n , are schematically shown by thick vertical segments in the range $1/e \leq y \leq e$. The harmonic $Y_n(y=e) = 0$, so it is not visible.

Note that formally, (6) allows to define its own discrete y -set for the total exchange energy E . However, that y -set does not have so remarkable features as the y -set for $\mathcal{Y}(10)$ does [3], so we do not consider discretization of (6) here.

5. Results and discussion

The first thing to highlight here is that the found y -discreteness of M_oE calls to the rate of an energy exchange y . We mean that it does not appeal to the well-known magnetospheric cavity modes and field-line resonances usually appearing in the Pc5 range [5] or the modes caused by the changes of dynamic pressure in SW [6]. Instead, it comes from the limitation imposed on the y -range with the positive value of energy efficiency \mathcal{Y} . Consequently, we could conclude that y -discreteness of M_oE emerges as a result of an energy scaling of an energy exchange process. The scaling norm is the one full lifetime cycle (positive \mathcal{Y}) with the y -length equal to e . In other words, scaling in [5] stems from the limitation of the *state* (for ex. magnetosphere cavity), but discovered scaling stems from the limitation of the *process* (energy exchange).

During the first y -segment with continuous spectrum ($y \leq OP$), M_oE accumulates an energy and all modes of an energy exchange have the same priority. However, if the rate y achieves OP , situation changes, and some (infinite but counted) energy exchange modes receive the higher priority. As an example of such high priority energy exchange mode could be a magnetosphere substorm which typically follows the time period of the less or more quiet (energy accumulation stage) magnetospheric conditions [7].

It is worth to note that the discrete spectrum at $OP < y < TS$ still keeps some noise-like background, *i.e.*, actually it is a *quasi-discrete* one. It looks reasonable as the bounds (7.a) and (7.b) are not tough. Actually, at these points, efficiency of energy exchange $\mathcal{Y}(y)$ changes its sign from negative to positive and vice versa. Hence, the bounds (7.a) and (7.b) are rather the singular points where the qualitative leap in M_oE functioning happens.

On the other hand, the quasi-discrete form of spectrum means that the backstage physical mechanism dominating while in the continuous spectrum does not totally disappear, it is still there but its influence has reduced. So, the discrete and continuous segments of spectrum overlap in some extent. As a result, all above said leads to the not perfect discrete pattern.

Note that the meaning of the y -segment with the continuous spectrum is twofold. Firstly ($0 < y < OP$), it is to supply energy of random variations in an amount sufficient to support the more advanced and complicate discrete segment on the qualitatively different level of M_oE operation. Secondly ($TS < y < TP$), is to provide suitable dissipation of the accumulated energy before completely flushing it out.

Compare the y -dependence of efficiency \mathcal{Y} (Fig. 1) and total exchange energy E (Fig. 2 (a)). We see that visually the discrete spectrum for \mathcal{Y} ends much earlier (at $y = e^{1/2}$) versus the spectrum for E (at $y = e$). However, it is accurate result as $\mathcal{Y}(y = e) = 0$ and the last visible harmonic is \mathcal{Y} (at $y = e^{1/2}$) in contrast to the total energy E as it is of zero only at the one point $y = 0$. So, we conclude that the quantization of disappears once \mathcal{Y} becomes negative.

Note that from (10) the “condensing” of the spectral lines E_n at $y \rightarrow 1$ should be observed (Fig. 2.a). It is agreed with the meaning of SP ($y = 1$) as a stationarity point where energy exchange acquires the smoother character without the drastic changes between individual energy harmonics.

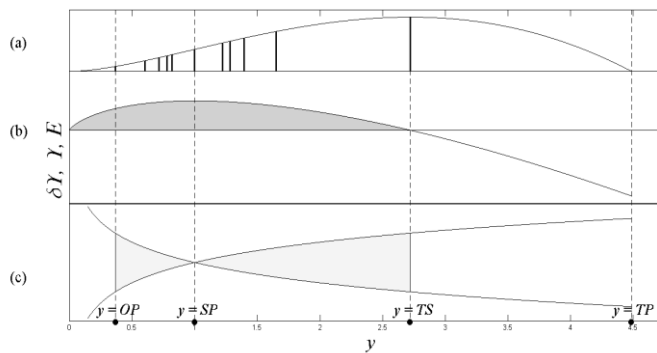


Figure 2. Solution for an energy evolution of the M_oE – total exchange energy E (a), integral efficiency of energy exchange \mathcal{Y} (b), instantaneous efficiency of an energy exchange $\delta\mathcal{Y}$ (c).

In the plot, by an abscissa axis a unitless energy rate $y = J/J_0$ is indicated. The quasi-quantized spectrum is between the points OP and TS , the range with positive \mathcal{Y} is between the points 0 and TS . The quasi-discrete energy levels E_n are shown by the thick vertical segments in the upper panel (a). It is seen that levels E_n tend to “condense” around the stationarity point SP . The point TS marks termination of the quasi-quantized spectrum, TP – termination of the whole M_oE ’s energy evolution. Phase space D for all possible microstates of $\delta\mathcal{Y}$ is shown in the light grey, area of positive \mathcal{Y} in the dark grey.

Summarizing, based on the model of *OTS* with an infinite number of energy agents, we investigated evolution of energy spectrum of *MoE* and discovered presence of an interleaving between the continuous and quasi-quantized form of a spectrum. Such theoretical effect could be useful in explanation of some global impulse-like processes in Earth magnetosphere.

This work is done within the project of MINOBRNAUKA RF “Development of mathematical model for simulation of coupling between diamagnetic structures of slow solar wind with the Earth magnetosphere”.

References

1. Mobus G.E., Kalton M.C. (2015). *Principles of Systems Science*. New York: Springer.
2. Goodfellow I., Bengio J., Courville A. (2016). *Deep learning*. Cambridge: MIT Press.
3. Moldavanov A.V. (2020). *Topology of organized chaos*. Moscow: Fizmatkniga.
4. Roy R., Olver F.W.J. (2010). *Lambert W function*. in F.W.J. Olver. D.M. Lozier, R.F.W. Boisvert, NIST Handbook of Mathematical Functions, Cambridge: Cambridge University Press.
5. Allan W., McDiarmid D.R. (1989). Magnetospheric cavity modes and field-line resonances: The effect of radial mass density variation. *Planet. Space Sci.* 37(4), 407-418.
6. Claudepierre S.G., Wiltberger M., Elkington S.R., Lotko W., Hudson M.K. (2010). Magnetospheric cavity modes driven by solar wind dynamic pressure fluctuations. <https://arxiv.org/abs/1010.3984>.
7. Stern D.P. (1984). Energetics of the magnetosphere. *Space Sci. Rev.* 39, 193-213.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.020

MEDIUM-TERM OSCILLATIONS OF THE SOLAR ACTIVITY

V.N. Obridko^{2,5}, D.D. Sokoloff^{1,2,4}, V.V. Pipin³, A.S. Shibalova^{1,2,4}

¹Physical Faculty, Lomonosov State University, Moscow

²IZMIRAN, Troitsk, Moscow

³Institute of Solar-Terrestrial Physics, Russian Academy of Sciences, Irkutsk

⁴Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow

⁵Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo, St.Petersburg, Russia

Abstract. In addition to the well-known 11-year cycle, longer and shorter characteristic periods can be isolated in variations of the parameters of helio-geophysical activity. Periods of about 36 and 60 years were revealed in variations of the geomagnetic activity and an approximately 60-year periodicity, in the evolution of correlation between the pressure in the lower atmosphere and the solar activity. Similar periods are observed in the cyclonic activity. Such periods in the parameters of the solar activity are difficult to identify because of a limited database available; however, they are clearly visible in variations of the asymmetry of the sunspot activity in the northern and southern solar hemispheres. In geomagnetic variations, one can also isolate oscillations with the characteristic periods of 5-6 years (QSO) and 2-3 years (QBO). We have considered 5-6-year periodicities (about half the main cycle) observed in variations of the sunspot numbers and the intensity of the dipole component of the solar magnetic field. A comparison with different magnetic dynamo models allowed us to determine the possible origin of these oscillations. A similar result can be reproduced in a dynamo model with nonlinear parameter variations. In this case, the activity cycle turns out to be anharmonic and contains other periodicities in addition to the main one. As a result of the study, we conclude that the 5-6-year activity variations are related to the processes of nonlinear saturation of the dynamo in the solar interior. Quasi-biennial oscillations are actually separate pulses related little to each other. Therefore, the methods of the spectral analysis do not reveal them over large time intervals. They are a direct product of local fields, are generated in the near-surface layers, and are reliably recorded only in the epochs of high solar activity.

1. Introduction

Solar activity is a complex of many processes. Therefore, even a well-established periodicity itself does not tell us much about the physical mechanism. In particular, there is no doubt that the main periodicities on the Sun are the rotation period and the 11-year cycle. However, these periods can change over time both in duration and in phase.

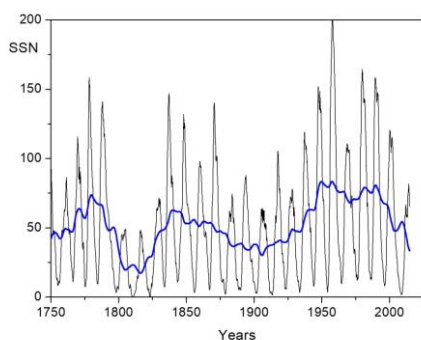


Figure 1. Monthly mean sunspot numbers SSN vs. time. The blue curve represents the smoothing with a 22-year window.

Solar activity is usually characterized by the so-called sunspot number (SSN). In fact, this is not the real number of spots on the solar disk, but a certain index calculated following a certain procedure. This procedure has been changed more than once, and the values have been revised. The version of the SSN index officially adopted today is available on the website of the Royal Observatory of Belgium <http://sidc.oma.be/silso/datafiles>.

Figure 1 represents the time dependence of the monthly mean sunspot numbers SSN. The blue curve shows smoothing by a 22-day window. One can see both the 11-year cycle and long-term variations. The grand minima were recorded during 1645-1710 (Maunder minimum, not shown in this figure), 1710-1830 (Dalton minimum), and a long-lasting decrease at the beginning of the XX century sometimes called the Gnevyshev grand minimum). There is some reason to believe that the next grand minimum (or several relatively low cycles) will be observed at the beginning of the XXI century.

The main cycle of activity with the magnetic-field sign variations taken into account is ~ 20 years. Accordingly, the SSN variations determined by the energy of the magnetic field (i.e., its square intensity) have a half period (about 10 years). These cycles are determined by a large-scale dynamo process.

In this brief review, we will focus on secondary variations. These are short-term (1-4 years) quasi-biennial oscillations (QBO), medium-term (4-8 years) quasi-sexennial oscillations (QSO), and long-term variations (over 50 years). The origin of these variations is not completely clear. They are apparently associated with the turbulent decay of large-scale magnetic structures, nonlinearity of the dynamo process, and fluctuations of parameters. We do not intend to provide here a comprehensive review of the data available. Rather we are going to outline some possibilities and difficulties of explaining the generation of such variations on the Sun.

A special note (which is appropriate at a geophysical conference) is that many variation periods of the solar activity were first established in variations of geophysical parameters. In this sense, the Earth turns out to be in itself an observational instrument for studying solar activity.

2. Quasi-sixty-year variations

In this Section, we will briefly describe the results obtained by *Veretenenko and Ogurtsov (2014)* and *Veretenenko et al. (2020)*.

Quasi-periodic fluctuations with periods of about 36 and 60 years are known to exist in geomagnetic activity. An approximately 60-year periodicity has been discovered in the evolution of correlations between the pressure in the lower atmosphere and characteristics of solar activity. Similar periods are observed in cyclonic activity.

In the epochs of a strong polar vortex, one can observe an enhancement of the arctic anticyclones and mid-latitude cyclones associated with an increase in GCR fluxes at the minima of the 11-year solar cycles. The results obtained indicate that the mechanism of the influence of solar activity and cosmic rays on the circulation of the lower atmosphere involves changes in the evolution of the stratospheric polar vortex.

The Northern Annular mode (NAM) in the stratosphere of the North hemisphere is the measure of the vortex. On the surface, this phenomenon manifests itself as the Arctic Oscillation (AO). The positive phase of AO is characterized by abnormally low pressure in the polar region and abnormally high pressure at subtropical and mid latitudes.

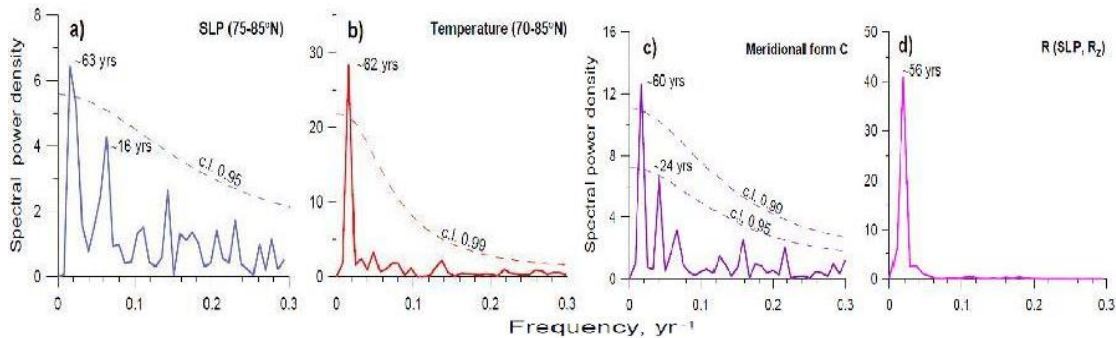


Figure 2. The Fourier spectra of the sea level pressure (a) and temperature (b) anomalies in the Arctic region, the frequency of occurrence of the C-type meridional circulation (c) and correlation coefficients $R(SLP, R_z)$ between SLP at high latitudes (60-85N) and relative sunspot numbers (d). Confidence levels are calculated for a red noise with AR(1) coefficient $a=0.3$ (a), 0.65 (b) and 0.4 (c).

Figure 2 represents the Fourier spectra of sea level pressure and temperature, anomalies in the Arctic region, the occurrence rate of the C-type meridional circulation, and the correlation coefficients $R(SLP, R_z)$ between SLP at high latitudes (60-85N) and relative sunspot numbers. The confidence levels are calculated for red noise with the AR(1) coefficient a equal to 0.3 (a), 0.65 (b), and 0.4 (c).

Long-term periods in the characteristics of solar activity are difficult to identify because of the limited set of data; however, they are clearly visible in the varying asymmetry of the sunspot production activity in the northern and southern solar hemispheres. Besides that, they are readily revealed in the characteristics of magnetic storms of different types, especially, in the occurrence rate of the storm gradual commencements, which are mainly determined by fluxes from solar coronal holes. Since the solar coronal holes are one of the indices characterizing the large-scale fields, the relationships obtained definitely indicate to generation of the large-scale dynamo. The possibility of simulating such generation processes is described below in Section 5.

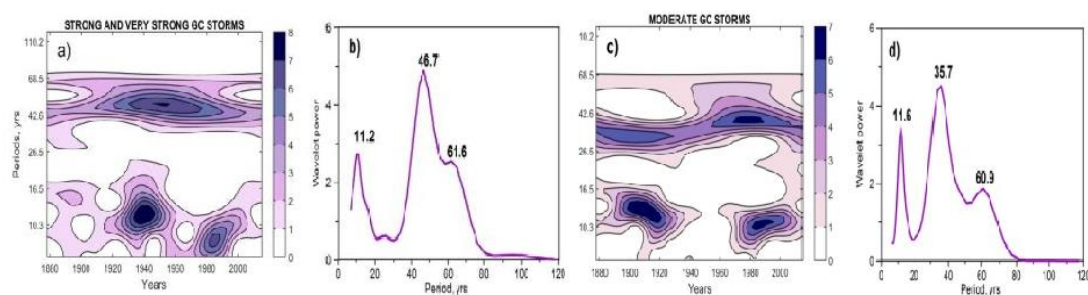


Figure 3. Local and global Morlet wavelet power spectra of annual occurrence frequencies for major (a, b) and moderate (c, d) magnetic storms with gradual commencements after the removal of polynomial trends. The spectra are normalized by variance.

3. Quasi-biennial oscillations (QBO)

Quasi-biennial oscillations are known almost as widely as the 11-year cycle. Some authors considered them even a more fundamental phenomenon than the 11-year cycle (*Ivanov-Kholodny et al., 2006; Ivanov-Kholodny and Chertoprud, 2009*). There is a vast bibliography devoted to QBO. Suffice it to mention a fundamental review by *Bazilevskaya et al. (2014)*, which contains about 170 references. We will focus here only on a few milestones in the history of the QBO studies.

3.1. The history of the discovery and study of QBO

Quasi-biennial oscillations were first reported by *Reed (1960)* as 26-month oscillations in the system of tropical atmospheric winds. All works published during seven years after that concerned QBO only in the Earth's atmosphere (references can be found in (*Maeda, 1967*)). It was Maeda who first, in 1967, drew attention to the fact that QBOs were also observed in cosmic rays. He showed that atmospheric variations had a reflection in cosmic ray variations; however, in that work, he did not discuss the existence of QBOs on the Sun. Moreover, there is still no certainty that QBOs on the Sun and Earth are directly related (*Baldwin et al., 2001; Petrick et al., 2012*).

The next important step was taken in the works by Karin Labitzke and Van Loon (*Labitzke, 1987; van Loon and Labitzke, 1988; Labitzke and van Loon, 1989*). They showed that there was a relationship between the polar stratospheric temperature in the northern winter and the solar cycle in the winters when equatorial 50 mb winds were blowing from the west: the fewer sunspots in such winters, the lower the temperature. During these winters, there were no major warmings in midwinter when the sunspot number was below 100. Such relationship is absent in the easterly phase of QBO. In this phase, the temperatures are usually higher than in the westerly phase, and significant warmings in midwinter occur regardless of the state of the solar cycle.

Only in the early 1990-ies it was suggested that similar quasi-biennial oscillations could also occur in the Sun (*Djurovic and Pâquet, 1990; Hoeksema, 1991; Obridko and Gaziev, 1992*).

In 1991, a National Symposium on Quasi-Biennial Solar Variations (From the Core of the Sun to the Earth's Magnetosphere) was held in the USSR (Pushchino Observatory). Unfortunately, the full Proceedings of this symposium were never published. Only extended abstracts in English are available in the Solar Data Bulletin, February 1991.

In 1995, Elena Benevolenskaya published a very important work, which is sometimes mistakenly referred to as the first work on solar QBOs (*Benevolenskaya, 1995*). In fact, the importance of this work is that she proposed interpretation of QBO as a manifestation of a double dynamo cycle. Later, *Benevolenskaya (1998)* formulated the concept of two spatially separated dynamos - at the base of the convection zone and immediately below the surface. The model of two dynamos was widely discussed subsequently, for example, in (*Beaudoin et al., 2016; Yushkov et al., 2018, 2019*) as the interaction of a mean-field dynamo at the tachocline level and a turbulent small-scale dynamo. The works by Benevolenskaya made a great impression. They were referred to hundreds of times and stimulated multiple attempts to detect QBO directly on the Sun.

3.2. So, what do we know about QBO today?

Quasi-biennial oscillations are actually separate impulses poorly related to each other. They are a directly produced by local fields in the near-surface layers and are reliably recorded only during the periods of high solar activity.

Figure 4 shows by way of example the squared magnetic field on the photosphere surface averaged over a Carrington rotation as a function of time. One can see that the pulses do not form a quasi-periodic process; individual pulses are not phase-related. The spectral methods do not detect them over large time intervals because of the chaotic nature of the phase shifts.

The analysis of sunspot areas carried out by *Wang and Sheeley (2003)* also revealed periods ranging from 0.2 to 2.6 years with none of the periods prevailing.

To understand the origin of quasi-biennial oscillations, it is important to find out what scale of the large-scale field they are associated with. Such an analysis was performed in (Obridko and Gaziev, 1992; Shelting and Obridko, 2001; Obridko and Shelting, 2003; Obridko et al., 2006). It turned out that QBOs are associated with structures that are even with respect to the equator. This was shown by constructing long-term synoptic maps based on direct measurements of the Wilcox Solar Observatory, WSO (Hoeksema, 1991) and on a long series of reconstructed solar magnetic data (Obridko and Gaziev, 1992). The amplitude of fluctuations in the range of the periods of 1.5-2.5 years was identified on the synoptic maps using the wavelet analysis (Obridko et al., 2006) (see Figure 5).

The magnetic field pattern on the latitude-time diagram looks like a set of bands running from the equator to the poles. The width of the bands is approximately 2 years. The bands drift towards the poles. The duration of the drift of each band is also several years. One can clearly see enhancements in the vicinity of the solar maxima.

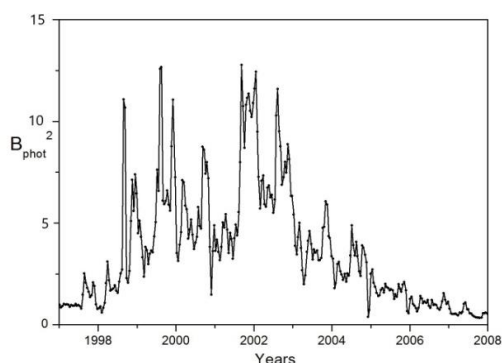


Figure 4. Squared magnetic field on the photosphere surface averaged over a Carrington rotation as a function of time.

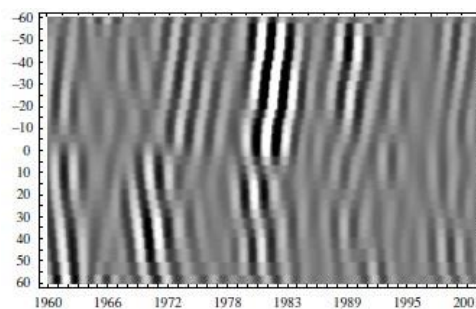


Figure 5. Synoptic diagram of the amplitude of the magnetic field component even with respect to the equator.

When expanding the photospheric magnetic field into Legendre polynomials, we naturally see the even harmonics in the QBO spectrum best of all. There is also another particularity: the QBO are revealed mainly in the relatively low-order harmonics with $l=2$ and $l=4$. This is visible on the wavelet diagram (Fig. 6). In addition, one can clearly see these oscillations intensify at the cycle maxima (Figs. 5 and 6). Since the 1980-ies, they have been gradually weakening in accordance with the general trend of decreasing solar activity.

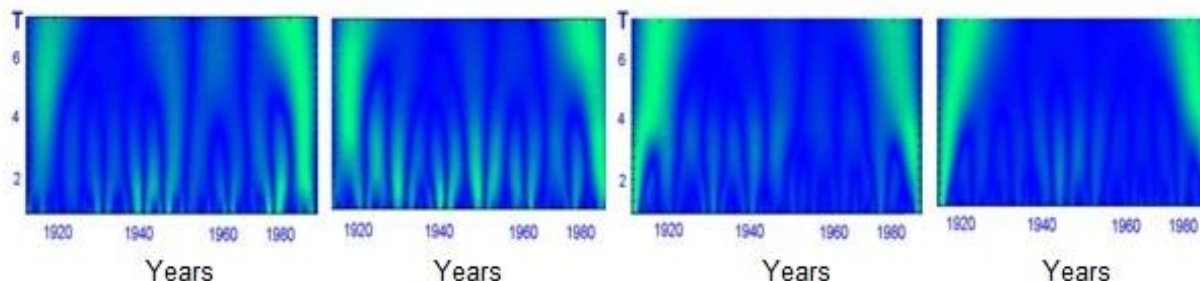


Figure 6. Wavelet diagram of the photospheric magnetic field in the range of 2-6 years. Shown are the harmonics with $l=2, 4, 6, 8$.

Besides that, Wang and Sheeley (2003) observed a periodicity in the range of 1-3 years in the photospheric parameters of the equatorial dipole. It had to be expected because the equatorial dipole with $l=m=1$ also forms an even structure relative to the equator.

Indeed, QBO are visible in the spectrum of the equatorial dipole (Fig. 7), while in the spectrum of the axial dipole, one can see oscillations of different type (QSO).

4. Quasi-sexennial oscillations(QSO)

The analysis of the global magnetic field carried out in these papers, revealed the existence of quasi-sexennial oscillations, i.e., variations with a period of about half an 11-year cycle.

A smoothed butterfly diagram for the spectral band of 5.5-7.5 yr is shown in the Fig. 8 (Obridko et al., 2006). Note that the stripes that represent amplitude oscillations in this band are anti-symmetric relative to the equator, i.e., they form an odd system.

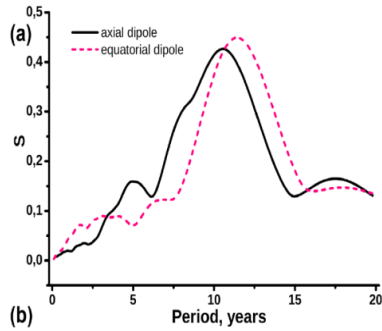


Figure 7. Wavelet spectrum of the axial ($l=1$, $m=0$) and equatorial ($l=1$, $m=1$) dipoles.

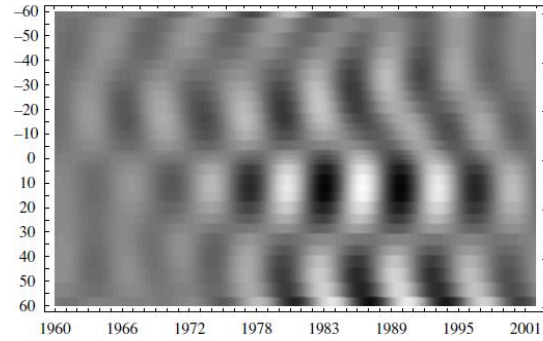


Figure 8. Smoothed butterfly diagram for a spectral band (5.5-7.5 yr).

The difficulty is that the wavelet analysis of sunspot data (Frick et al., 1997) does not recognize 7-year (and 2-year) fluctuations. Obridko et al. (2006) tried to overcome this difficulty by considering the presence of a subcritical dynamo with a period of about 7 years between the modes. This regime corresponds to a strong toroidal field emerging from the lower part of the convection zone.

The existence of QSO was confirmed in a number of subsequent publications. Gavryuseva (2006) isolated this period in the differential rotation of the photospheric magnetic field and Deng et al. (2020), in the rotation of the corona. Le Mouél et al. (2019) analyzed the periodicities of sunspots, polar plumes, aa and Dst geomagnetic indices and showed that only the periods of 22, 11, and 5.5 years were present in all realizations.

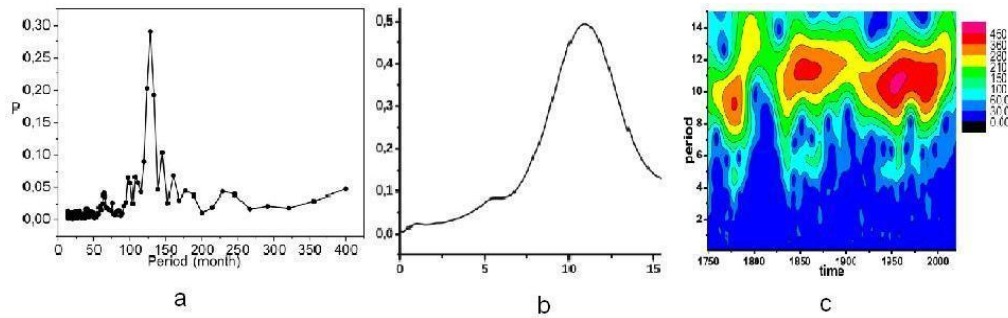


Figure 9. (a) Fourier spectrum for the monthly mean sunspot data for the time interval 1749–2019. P is the amplitudes of the Fourier harmonics normalized to the sum of their moduli. The harmonic of the maximal amplitude corresponds to the 25th harmonic, i.e. 126 months. The spectral resolution in the calculated spectrum is about five months. (b) Integral wavelet spectra for sunspot data. (c) The wavelet plane for the real part of the modulus of the sunspot wavelet coefficients (color version online).

Figure 9 is a result of the spectral analysis of sunspot numbers (SSN) for the period from 1750 to 2021. Fig. 9a illustrates the spectral Fourier analysis. One can readily see QSO, while QBO are virtually absent. Figs. 9b and 9c illustrate the results of the wavelet transform. Here, the QSO are clearly visible, too. Besides that, one can see that oscillations in the range of 5-7 years disappear completely in the epochs of the Dalton and Gnevyshev secular minima, as well as in the present time.

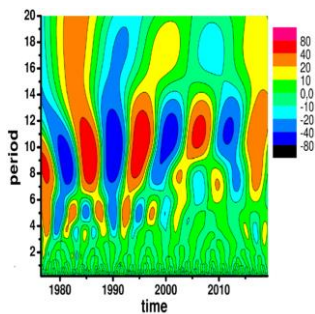


Figure 10. Wavelet plane for the real part of the modulus of the axial dipole wavelet coefficients based on WSO data.

The same is seen from the wavelet transform for the axial dipole based on WSO data for 1976-2020 represented in Fig. 10 (the equatorial dipole is not given here, because it does not show QSO). Since the late 1990-ies, the overall activity has been decreasing and, accordingly, QSOs disappear.

5. 2D dynamo model

Now, compare the results of the spectral analysis based on observational data with the data derived from the mean-field dynamo model. A preliminary analysis shows that QSO in the axial dipole can be reproduced in terms of different mean-field dynamo models, e.g. the 1D models proposed by *Brandenburg et al. (1991)* and *Moss et al. (2008)* and the recent 2D model proposed by *Pipin and Kosovichev (2020)*. We have found that the presence of the non-linear dynamo saturation effect is sufficient for the emergence of QSO, both in the parameters of the toroidal magnetic field and in the axial dipole. For our study, we need the parameters of both the axisymmetric and non-axisymmetric large-scale magnetic fields. For this reason, we use the simplified version of the non-axisymmetric dynamo model. The model simulates the dynamo process in a thin layer deep within the convection zone. The effect of magnetic buoyancy seeds the bipolar active region at a random position within the large-scale toroidal magnetic field. This effect accounts for the escape of magnetic energy from the dynamo region, as well. Magnetic buoyancy (*Kitchatinov and Pipin, 1993*) occurs at an arbitrary longitude, at a random time (correlation time of about 0.01 of the dynamo period), and in a randomly selected hemisphere (*Pipin and Kosovichev, 2018*).

To clarify the nature of QSO periodicity, we have followed the evolution of the magnetic field starting with a tiny seed magnetic field (*Sokoloff et al., 2020*). It is found out that the 11-year periodicity starts at the very beginning of the magnetic field evolution. Quasi-sexennial oscillations gain considerable power when the dynamo cycle becomes stationary as the magnetic energy reaches the nonlinear saturation state. This means that QSO can be considered a non-linear effect. Note that the non-linear saturation in the model is due to the magnetic buoyancy effect. The time evolution of the axial and equatorial dipoles is discussed. The latter looks like noise, while the time evolution of the axial dipole seems to be almost sinusoidal. Also, we have found out that the maximum power of the axial dipole QSO is observed at the rise and decline of the axial dipole cycle. This result of the dynamo-model agrees qualitatively with our observational findings. The integral wavelet spectra for the axial and equatorial dipole in our dynamo model are shown in Fig. 11 (compare with experimental graphs in the Fig. 7).

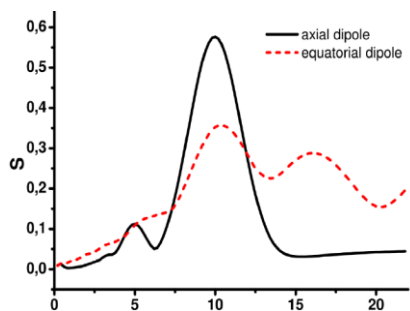


Figure 11. Dynamo model: the integral wavelet spectra for the axial (solid line) and equatorial dipole (dotted lines).

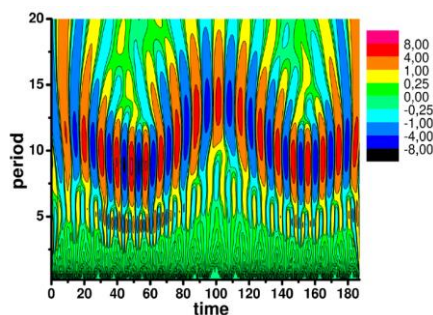


Figure 12. 2D wavelet spectra for the model with a variable α effect.

Variations in the period of the axial dipole cycle and QSO in the dynamo model output are shown in Fig. 12. We see that a shift of the cycle period results in a corresponding shift of the QSO period.

This agrees qualitatively with the results shown in Figs. 9c and 10 above. The model shows that the period of the dipole cycle increases to about 15 years during the grand minimum. The corresponding QSO almost disappear during this period. The model shows similar behavior of the long-term evolution of QSO in the mean flux density of the toroidal magnetic field. Bearing in mind our mechanism for QSO, we suggest that the analysis of longer observational time series of the axial dipole may reveal saturation of the QSO power in the case of strong variations in the axial dipole cycle.

The dynamo model suggests that QSO reflect the nonlinear shape of the cycles of the activity parameters. The model results are reproduced for different types of nonlinearity. The anharmonic form of the cycles of the toroidal field was discussed earlier in the context of variation mechanisms in stellar cycles (e.g., *Baliunas et al., 2006*). The nonlinear dynamo is generally used to explain the parity mode interactions. These mechanisms have a long relaxation time, in contrast to the B^2 anharmonicity effect. In the fast rotation mode, the distortion of the cycles becomes comparable to the amplitude of the cycle (*Pipin, 2021*); therefore the signals associated with magnetic energy have twice the frequency relative to the main period.

Acknowledgements

The authors are grateful to the WSO teams for a free access to their data. V. Obridko, D. Sokoloff and A. Shibalova thank RFBR for the support with grants nos. 20-02-00150, 18-02-00085, and 19-52-53045. The authors appreciate the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation: VVP subsidy no. 075-GZ/C3569/278; DDS and AAS agreement No. 075-15-2019-1621.No. 20-02-00150, 19-52-53045, as well as DDS and AAS support by BASIS foundation number 18-1-1-77-3.

References

- Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J., Hamilton K., Haynes P.H., Randel W.J., Holton J.R., Alexander M.J., Hirota I., Horinouchi T., Jones D.B.A., Kinnersley J.S., Marquardt C., Sato K., Takahashi M.: 2001, The quasi-biennial oscillation, *Rev. Geophys.*, v. 39, p. 179, doi:10.1029/1999RG000073.
- Baliunas S., Frick P., Moss D., Popova E., Sokoloff D., Soon W.: 2006, Anharmonic and standing dynamo waves: theory and observation of stellar magnetic activity *MNRAS*, v. 365, p. 181.
- Bazilevskaya G., Broomhall A.-M., Elsworth Y., Nakariakov V.M.: 2014, A Combined Analysis of the Observational Aspects of the Quasi-Biennial Oscillation in Solar Magnetic Activity, *Space Sci. Rev.*, v. 186, p. 35.
- Benevolenskaya E.E.: 1995, Double Magnetic Cycle of Solar Activity, *Solar Phys.*, v. 161, Issue 1, p. 1.
- Benevolenskaya E.E.: 1998, A model of the double magnetic cycle of the sun, *Astrophys. J. Lett.*, v. 509, p. 49, doi:10.1086/311755.
- Brandenburg A., Moss D., Tuominen I.: 1991, Hydromagnetic α -type dynamos with feedback from large scale motions, *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, v. 61, Issue 1, p. 179.
- Deng L.H., Zhang X.J., Deng H., Mei Y., Wang F.: 2020, Systematic regularity of solar coronal rotation during the time interval 1939-2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 491, Issue 1, p. 848.
- Djurovic D., Pâque P.: 1990, *A Publ. Dep. Astron., Univ. Beogr.*, No. 18, p. 5.
- Frick P., Baliunas S.L., Galyagin D., Sokoloff D., Soon W.: 1997, Wavelet analysis of stellar chromospheric activity variations, *Astrophys. J.*, v. 483, p. 426.
- Gavryuseva E.: 2006, Variability of the differential rotation of the photospheric magnetic field through solar cycles, 36th COSPAR Scientific Assembly. Held 16 - 23 July 2006, in Beijing, China. Meeting abstract from the CDROM, 112.
- Hoeksema J.T.: 1991, *J. Geomagn. Geoelectricity*, v. 43, p.59.
- Ivanov-Kholodny G.S., Mogilevsky E.I., Chertoprud V.Ye.: 2006, Fractal dimension of changes in the solar magnetic field energy and quasi-biennial solar activity variations, *Geomagnetism and Aeronomy*, v. 46, Issue 2, pp. 139-145.
- Ivanov-Kholodny G.S., Chertoprud V.E.: 2009, Quasi-biennial variations of the total solar flux: Their manifestation in variations of the stratospheric wind and the Earth's rotation velocity, *Geomagnetism and Aeronomy*, v. 49, Issue 8, pp.1283-1284.
- Kitchatinov L.L., Pipin V.V.: 1993, Mean-field buoyancy, *A&A*, v. 274, p. 647.
- Labitzke K., Loon van H.: 1989, Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part III: Aspects of the association, *J. Clim.*, v. 2, p. 554.
- Labitzke K.: 1987, Sunspots, the QBO, and the stratospheric temperature in the north-pole region, *Geophys. Res. Lett.*, v. 14, p. 535.
- Le Mouél J.L., Lopes F., Courtillot V.: 2019, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, v. 124, Issue 8, p. 6403.
- Loon van H., Labitzke K.: 1988, Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part III: Surface and 700 mb in the Northern hemisphere in winter, *J. Clim.*, v. 1, p. 905.
- Maeda K.: 1967, Quasi-Biennial Cycles in Cosmic Ray Intensity, *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 24, Issue 3, p.320.
- Moss D., Sokoloff D., Usoskin I., Tutubalin V.: 2008, Solar Grand Minima and Random Fluctuations in Dynamo Parameters, *Solar Phys.*, v. 250, p. 221.
- Obridko V.N., Gaziev G.: 1992, Some comments to the problem of extended cycles in large scale magnetic fields. The solar cycle. Proc. of the National Solar Observatory, Sacramento Peak 12 Summer Workshop, ed. K.L.Harvey, v. 27, p. 410.
- Obridko V.N., Shelting B.D.: 2003, Meridional drift of large-scale magnetic fields in the Sun, *Astron. Zh.*, v. 80, p. 364; 2003, *Astronomy Reports*, v. 47, No. 4, p. 333 (engl.).
- Obridko V.N., Sokoloff D.D., Kuzanyan K.M., Shelting B.D., Zakharov V.G.: 2006, Solar cycle according to mean magnetic field data, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Societies*, v. 365, p. 827.
- Petrick C., Matthes K., Dobslaw H., Thomas M.: 2012, Impact of the solar cycle and the QBO on the atmosphere and the ocean, *J. Geophys. Res., Atmos.*, v. 117, p. 17111, doi:10.1029/2011JD017390.
- Pipin V.V.: 2021, Solar dynamo cycle variations with a rotational period, *MNRAS*, v. 502, Issue 2, pp. 2565-2581.
- Pipin V.V., Kosovichev A.G.: 2018, Does Nonaxisymmetric Dynamo Operate in the Sun? *ApJ*, v. 867, p. 145.
- Pipin V.V., Kosovichev A.G.: 2020, Torsional Oscillations in Dynamo Models with Fluctuations and Potential for Helioseismic Predictions of the Solar Cycles, *ApJ*, v. 900, Issue 1, id.26.
- Reed R.J.: 1960, The circulation of the stratosphere. Paper presented at the 40th Anniversary Meeting of the Amer. Meteorol. Soc.
- Shelting B.D., Obridko V.N.: 2001, Quasi-biennial oscillations of the solar global magnetic field, *Astron. and Astrophys. Tr.*, v. 20, p. 491.
- Sokoloff D.D., Shibalova A.S., Obridko V.N., Pipin V.V.: 2020, Shape of solar cycles and mid-term solar activity oscillations, *MNRAS*, v. 497, p. 4376.
- Veretenenko S., Ogurtsov M.: 2014, Stratospheric polar vortex as a possible reason for temporal variations of solar activity and galactic cosmic ray effects on the lower atmosphere circulation, *Advances in Space Research*, v. 54, Issue 12, p. 2467.
- Veretenenko S., Ogurtsov M., Obridko V.: 2020, Long-term variability in occurrence frequencies of magnetic storms with sudden and gradual commencements, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 205, article id. 105295.
- Wang Y.-M., Sheeley N.R.: 2003, On the fluctuating component of the Sun's large-scale magnetic field, *Astrophys. J.* v. 590, p. 1111.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.021

CHOICE OF CONDITIONS FOR MHD SIMULATIONS ABOVE THE ACTIVE REGION, ALLOWING THE STUDY OF THE SOLAR FLARE MECHANISM

A.I. Podgorny¹, I.M. Podgorny², A.V. Borisenko¹, N.S. Meshalkina³

¹*Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia; e-mail: podgorny@lebedev.ru*

²*Institute of Astronomy RAS, Moscow, Russia*

³*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Russia*

Abstract. Primordial release of solar flare energy high in corona (at altitudes $1/40 - 1/20$ of the solar radius) is explained by release of the magnetic energy of the current sheet. The observed manifestations of the flare are explained by the electrodynamic model of a solar flare proposed by I. M. Podgorny. To study the flare mechanism is necessary to perform MHD simulations above a real active region (AR). MHD simulation in the solar corona in the real scale of time can only be carried out thanks to parallel calculations using CUDA technology. Methods have been developed for stabilizing numerical instabilities that arise near the boundary of the computational domain. Methods are applicable for low viscosities in the main part of the domain, for which the flare energy is effectively accumulated near the singularities of the magnetic field. Singular lines of the magnetic field, near which the field can have a rather complex configuration, coincide or are located near the observed positions of the flare.

Introduction

The primordial release of flare energy high in the solar corona (at heights of $1/40 - 1/20$ of the solar radius [1]) is explained by the mechanism of S.I. Syrovatsky [2], according to which the flare energy is accumulated in the magnetic field of the current sheet. In the course of quasistationary evolution, the current sheet transfer into an unstable state [3]. As a result of the instability of the current sheet, a rapid release of magnetic energy occurs with the observed manifestations, which are explained by the electrodynamic model of the flare proposed by I.M. Podgorny [4]. According to the electrodynamic model, the hard X-ray emission from the flare in the lower dense layers of the solar atmosphere is explained by the acceleration of electrons in field-aligned currents caused by the Hall electric field in the current sheet. An electrodynamic model of a solar flare is proposed on the basis of the results of numerical MHD simulation and observations; analogies are used with the electrodynamic model of a substorm proposed by the author based on measurements on the Intercosmos-Bulgaria-1300 spacecraft [5]. The study of the physical mechanism of a solar flare is impossible without MHD simulation of the flare situation above a real active region, in which the magnetic field measured in the photosphere is used to set the boundary conditions, and the calculation begins several days before the flare, when the flare energy has not yet been accumulated in the magnetic field of corona. When setting the problem, no assumptions were done about the flare mechanism.

Method for the numerical solution of MHD equations

An absolutely implicit upwind finite-difference scheme which is conservative relative to magnetic flux has been developed; it was implemented in the program PERESVET. Methods for approximating MHD equations by finite-difference equations are used to ensure that the scheme remains stable at the maximum possible time step in order to speed up the calculation. The scheme is solved by the iteration method. To obtain the correct development of physical processes in time, it is necessary to carry out MHD simulation in the real scale time. Despite the use of specially developed methods, the calculations are slow. **There is a need to use parallel computing.** Parallelization of computations was carried out using CUDA technology on modern graphics cards V100 (Volta-100), P100 (Pascal-100), Titan-100. The use of the modern language Fortran PGI (Portland Group - Fortran, created specifically for parallelization using GPU graphics cards) made it possible to apply the special methods of optimizing the parallelization. The time of calculation of evolution of the field and plasma in the solar corona above the active region is determined by the size of the time step (at which the scheme remains stable), by the number of iterations and by the time of calculation of one iteration.

Choice of parameters of MHD equations. Stabilization of instabilities arising near the boundary

Due to the difficulties in matching the solution in the computational domain with the values specified at the boundary, a calculation in the real scale time can lead to the development of a strong instability that has time to develop during a long time interval, both near the photosphere and non-photospheric boundaries. The strongest

instabilities arise at low viscosities. The problem of stabilization of instabilities arising at the boundaries of the computational domain was almost completely solved [6, 7], for which artificial limitation of the rate of plasma inflow into the computational domain through the non-photospheric boundary, the setting of artificial viscosity near the non-photospheric boundary, and other stabilization methods were used. The viscosities were set in accordance with the principle of limited modeling [8], according to which much larger or much smaller units, dimensionless parameters remain much larger or smaller than units when simulated without their exact preservation.

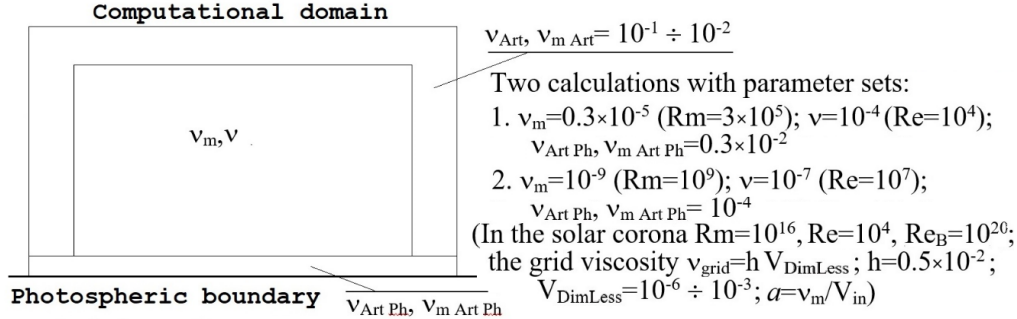


Figure 1. Viscosity and artificial viscosity for two calculation variants.

For the active region AR 10365, two calculations were carried out for two sets of parameters corresponding to relatively high and low viscosities within three days (see Fig. 1.). In both calculations near the non-photospheric boundary, to stabilize the numerical instability, sufficiently large artificial viscosities were taken, their dimensionless values (inverse to the Reynolds numbers) are $v_{Art} = v_{m Art} = 10^{-1} \div 10^{-2}$. In the first variant, the viscosities were taken equal to $v_m = 0.3 \times 10^{-5}$ ($Rm = 3 \times 10^5$); $v = 10^{-4}$ ($Re = 10^4$), the artificial viscosity near the boundary was taken relatively high $v_{Art Ph}, v_{m Art Ph} = 0.3 \times 10^{-2}$. With these parameters, due to the suppression of the perturbation propagating from the photosphere by the artificial viscosity, a sufficiently intense accumulation of the flare energy does not occur in the region; therefore, a calculation with the second set of parameters with significantly lower viscosities was required. The calculation results with these parameters are given in [6, 7]. In the second variant of the calculation, a set of parameters was selected $v_m = 10^{-9}$ ($Rm = 10^9$); $v = 10^{-7}$ ($Re = 10^7$); $v_{Art Ph}, v_{m Art Ph} = 10^{-4}$, the simulation results with these parameters are presented in the next chapter. If instabilities did not arise at the boundary, then, proceeding only from the need to obtain a stable solution inside the region, it is possible to make the following estimate of the computation time of one day of evolution in the solar corona above the active region. The time step from the Courant condition $\tau_K = h / (V_{MV} + V_{MA})$ in the calculations is $\tau_K = 10^{-8} \div 10^{-7}$ days. To estimate the computation time with a step τ_K : the computation time of one iteration on graphics cards using the CUDA technology is 2×10^{-2} sec, for 5 iterations the computation time of one step is 0.1 sec, so that (day $\sim 10^5$ sec) the computation time of one day of evolution in the solar corona is 10 - 100 days.

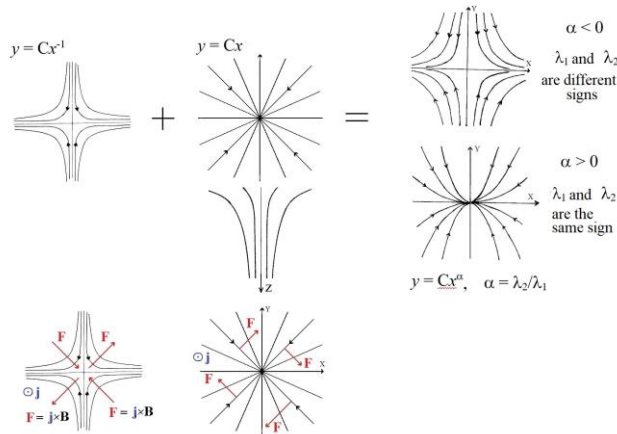


Figure 2. Superposition of X-type magnetic field and diverging magnetic field.

At low viscosities, strong disturbances arise in some places of the computational domain. These disturbances are propagating towards the boundary. The perturbations are so strong that, despite setting a large artificial viscosity near the boundary and using other special methods of stabilization, they cause numerical instability. For this set of parameters to stabilize the instabilities, it is also necessary to decrease the step (less than 10^{-8} days) and increase the number of iterations (in the calculations, their number reached 60 and more). As a result, the calculation time is greatly increased, reaching several months.

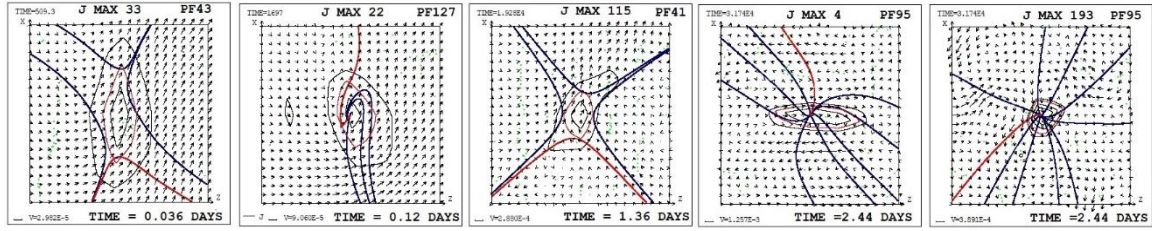


Figure 3. Examples of superposition of X-type and diverging magnetic field obtained from MHD simulation.

MHD simulation results. Complex singular line field configuration. Flare M1.4 27.05.2003 at 2:43

MHD simulation above AR 10365 showed the appearance of singular lines in which a diverging magnetic field is superimposed on the configuration of the X-type magnetic field (Fig. 2, 3, 4). Magnetic forces in X-type configuration collect disturbances into current sheet and for diverging magnetic field cause rotation of plasma around the singular line (Fig. 2). The diverging magnetic field can be large, it can dominate the X-type field, fundamentally distorting its configuration. However, even in this case, the presence of the X-type configuration leads to the accumulation of perturbations with the formation of a current sheet, in the magnetic field of which the flare energy is accumulated. In this case, even with a significant dominant diverging magnetic field, a sufficiently powerful current sheet may appear (Fig. 3, J Max 4), leading to the appearance of not only a weak flare, but also a flare of medium power.

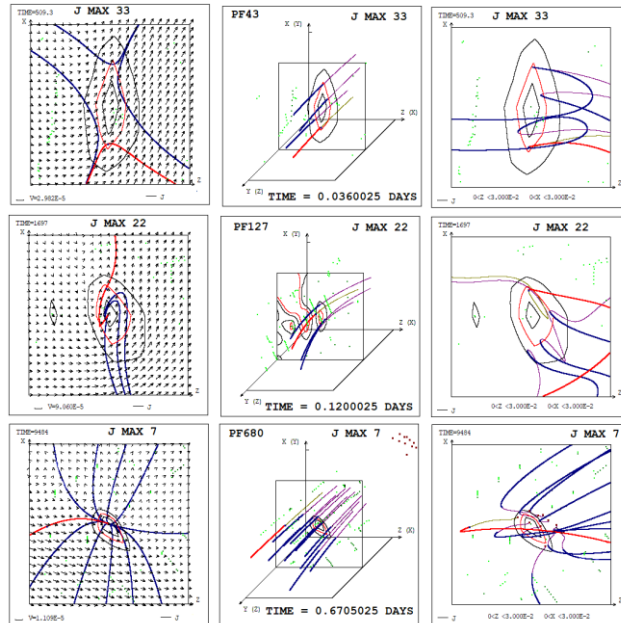


Figure 4. Field configurations near singular lines. Flat magnetic lines, three-dimensional configurations, projections of field lines on the plane of configuration.

When the X-type field and the diverging field are superimposed (Fig. 2), the magnetic lines of the resulting field have the form $y = Cx^\alpha$, where $\alpha = \lambda_2/\lambda_1$, λ_1 and λ_2 are the eigenvalues of the matrix $(\nabla \mathbf{B})$ [9]. If the X-type field dominates, then the magnetic lines have the form of hyperbolas ($\alpha < 0$, λ_1 and λ_2 have different signs). If the diverging field dominates, then the magnetic lines have the shape of parabolas ($\alpha > 0$, λ_1 and λ_2 of the same sign). Most often, the three-dimensional configuration of the magnetic field in the vicinity of the singular line is complex (examples are shown in Fig. 4), from this configuration it is impossible to determine that the line is singular. Therefore, a specially developed system for finding points through which singular line pass is required [10, 11].

In Fig. 5 shows the configuration of the magnetic field in the computational domain of corona at the time of the M 1.4 flare on May 27, 2003 at 2:43 am, which corresponds to 2.24 days from the beginning of the calculation. The current density maxima found by the graphical search system through which singular magnetic field lines can pass are indicated by green dots. The positions of the current density maxima in the region are shown, their projections onto the central plane, which passes through the central point of the computational region and is located perpendicular to the photosphere and parallel to the solar equator. Many of the current density maxima in the picture plane are the located close to the thermal X-ray source. The 193rd maximum of the current density is located in the central region of the source (all the maxima are numbered in decreasing order). The 4th maximum near the source of

thermal X-ray radiation has the most powerful current sheet. The field configurations near the 193rd and 4th current density maxima (Fig. 6) show the dominance of the diverging magnetic field over the X-type field. MHD simulation showed the coincidence of the positions of some current density maxima with the position of the source of the flare thermal X-ray radiation; the maximum of the current density with a sufficiently powerful current sheet is located at a distance of $\sim 10''$ from the source. In the future, it will be necessary to try to more accurately select the parameters for a more precise calculation.

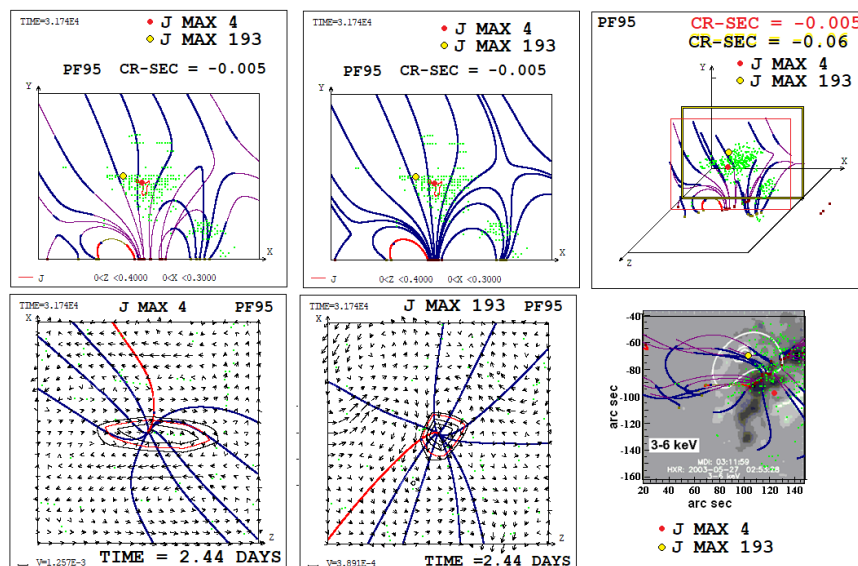


Figure 5. Three-dimensional configuration of the magnetic field in the computational domain, projection of magnetic lines on the central plane and flat magnetic lines at the time of the M 1.4 flare. The 4th and 193rd maxima of the current density are marked; other current density maxima are shown by green points. In the picture plane: magnetic field configuration, current density maxima and the distribution of soft X-ray emission of 3–6 keV, received by the RHESSI spacecraft during the M 1.4 flare on May 27, 2003 (<http://rhessidatacenter.ssl.berkeley.edu>) are superimposed. Magnetic field configurations and fields of velocity near the 193rd and 4th current density maxima.

Conclusion

1. To understand the physical processes causing the flare situation, simulation in the real scale of time is necessary, and the calculation should begin several days before the flare. An absolutely implicit upwind finite-difference scheme was developed, which is conservative with respect to the magnetic flux. A technique has been developed for the numerical solution of MHD equations in the solar corona in real scale of time, which is impossible without the use of parallel computations. Methods for stabilizing instabilities have been developed.
2. The simulation performed above AR 10365 showed the formation of local maxima of the current density on singular lines of the magnetic field. The field near some singular lines has complicated structure with superimposed diverging magnetic field, but even in such configuration sufficiently powerful current sheets appear. Coincidence of current sheet positions with positions of flare emission sources support the flare mechanism based on flare energy accumulation in the magnetic field of current sheet.

References

1. Lin R.P., Krucker S., Hurford G.J. et al. (2003). *Astrophys. J.*, 595, L69–L76.
2. Syrovatskii S.I. (1966). *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 50, 1133–1147.
3. Podgorny A.I. and Podgorny I.M. (2012). *Geomagn. Aeron. (Engl. Transl.)*, 52, 150–161.
4. Podgorny I.M., Balabin Yu.V., Vashenuk E.M., Podgorny A.I. (2010). *Astronomy Reports*, 54, 645–656.
5. Podgorny I.M., Dubinin E.M., Israilevich P.L., Nicolaeva N.S. (1988). *GRL*, 15, 1538–1540.
6. Podgorny A.I., Podgorny I.M., Borisenko A.V. (2020). *Proc. 43 Annual Seminar "Phys. of Auroral Phenomena"*, Apatity, 56–59.
7. Podgorny A.I., Podgorny I.M., Borisenko A.V. (2020). *Proc. 12-th Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere"*, Primorsko, Bulgaria, June, 2020, 93–98.
8. Podgorny I.M. (1978). *Simulation Studies of Space. Fundamentals of Cosmic Physics*, 1, №1. 1–72.
9. Podgorny A.I. (1989). *Solar Physics*, 123, 285–308.
10. Podgorny A.I., Podgorny I.M. (2013). *Sun and Geosphere*, 8(2), 71–76.
11. Podgorny A.I., Podgorny I.M. (2013). *Proc. 36 Annual Sem. "Phys. of Auroral Phenomena"*, Apatity, 117–120.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.022

SPECTRAL ANALYSIS AND FORECASTING OF THE 25TH SOLAR CYCLES

D.B. Rozhdestvensky, V.I. Rozhdestvenskaya, V.A. Telegin

*The Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Moscow, Troitsk*

Abstract. In the present work, we propose an extrapolation method, developed on the basis of spectral analysis, digital filtering, and the principle of demodulation of a complex signal, for predicting the beginning of cycle 25 of solar activity. The Wolf number and other measured characteristics of solar activity have a very complex spectral composition. The Sun, by the nature of its radiation, contributes a significant stochastic component to the observational data. The experimental data are known only up to the present, and the prediction is about bridging the gap in our data set. Mathematically, the prediction problem boils down to extrapolation of discontinuous functions, which leads to a Gibbs phenomenon that occurs at the point of discontinuity and makes prediction into the future impossible. To overcome this discontinuity, additional physical models describing a continuous process are most often used. This paper uses only the Wolf series of numbers from 1818 to 2020. The authors developed an original forecasting technique using Fourier series, digital filtering and representation of the complex process as modulated and subsequent demodulation. As a result of decomposing the complex signal by Fourier series into separate components, the spectral ranges characteristic of the Wolf number were singled out. Taylor's series was used for construction of prediction or extrapolation algorithms. The extraction of spectral ranges, characteristic for the investigated process, is carried out by means of sequential digital filtering methods and information compression in accordance with the cut-off frequency of the digital filter. For example, when selecting eleven-year cycles of solar activity, we have to compress the information by a factor of 160. With such a processing scheme, the forecasting starts with the ultralow-frequency component with a period of more than 11 years, successively moving to the ranges of higher frequencies. The use of spectral analysis and Chebyshev filtering showed the possibility to predict the low-frequency component for the full cycle period. The eleven-year component forecast obtained by the authors is in good agreement with the data of the Brussels Royal Center.

Keywords: solar activity, forecasting, Fourier series, spectral analysis, Gibbs phenomenon, Chebyshev filtration, Wolf number.

Based on spectral analysis and Chebyshev filters, a prediction of Wolf numbers for the years 2021-2022 is obtained. The results are consistent with those of the Brussels Royal Centre.

The prediction of solar activity is of natural interest to near-Earth space explorers. According to [1] the sun is moving into a new mode of minimum activity, which was observed more than 100 years ago. The reduced regime of solar activity is supposed to last several solar cycles.

According to [2] the next solar cycle is characterized by minimum, duration and form. There are 1-3 year variations of minima and maxima, which complicate the forecast of the form and main maximum. The tentative prediction of cycle 25 according to the characteristics of the large-scale interplanetary magnetic field 2-3 years before the cycle start and the emission intensity F10.7 cm suggest that the average number of sunspots does not exceed 50, F10.7 is expected to be about 87. At the maximum of cycle 25, F10.7 = 115. The cycle itself is expected to be extremely low. It is predicted in [7] that cycle 25 is 40% of cycle 24 and 26 is 60% of cycle 24. Long-term sunspot forecasts are very difficult due to stochasticity. Figure 1 shows the well-known solar cycles.

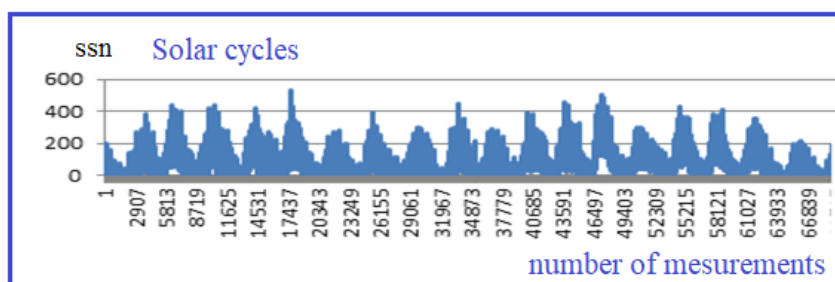


Figure 1. Measured values of Wolf number variations for 1818-2020.

It is not difficult to see what complex processes are reflected in these cycles of solar activity. It is known that periodic processes are better predicted. Use of spectral analysis [3-5] makes it possible to distinguish them from such complex processes. Using spectral analysis and Chebyshev filtering [3-5], we isolated individual components of the solar cycle and obtained smoothed variations of cycles from data up to the end of November 2020 (Fig. 2).

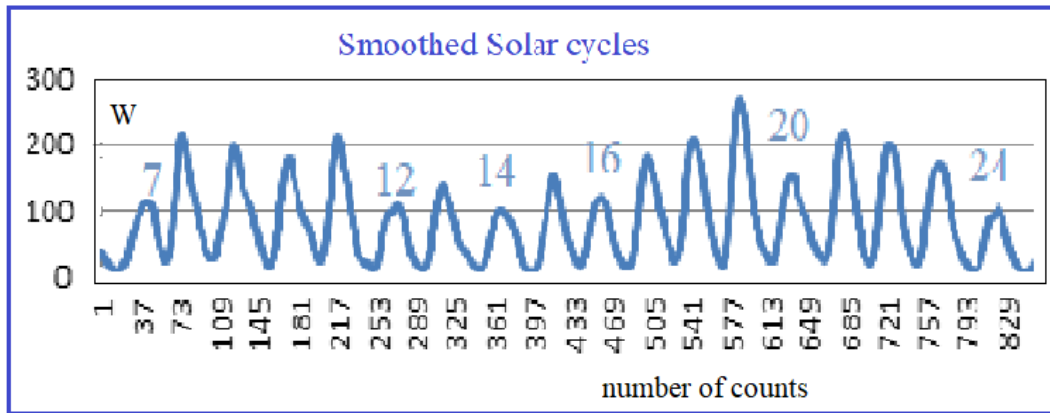


Figure 2. Smoothed solar cycles. The numbers denote the numbers of solar cycles.

Fig. 2 shows smoothed solar cycles with no daily variations. Here we can trace the height of the maximum and the duration of individual solar cycles. Further separation of the spectral components yielded the sum of the sinusoidal components. In Fig. 3 . we can clearly see the rapidly changing sinusoidal component, characteristic of individual cycles, and the slowly changing one, reflecting long variations in solar activity.

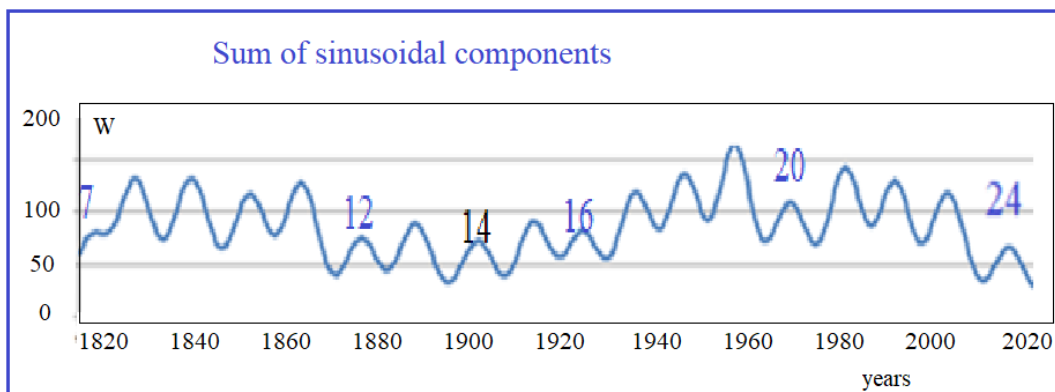


Figure 3. Sum of sinusoidal components in solar cycles.

Further separation of the solar spectra has yielded the secular variation of solar activity. The Sun's solar constant, or solar constant, where the 11-year component is no longer present.

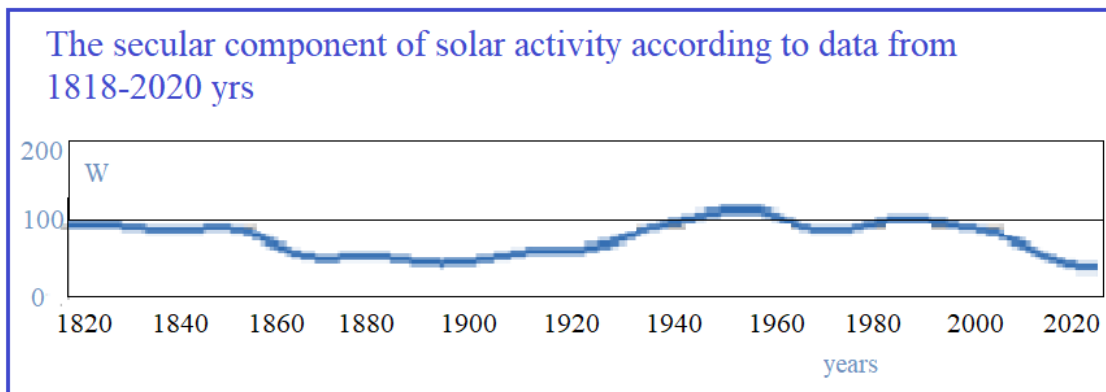


Figure 4. The secular component of solar activity over 200 years.

The prediction of such a complex signal as solar activity can only be made for the individual components. The prediction itself is currently an unsolved problem of approximating the discontinuous functions that are the series of measured data. At the ends of such a series fluctuations arise due to the discontinuity [5]. These fluctuations lead to errors which make the prediction meaningless. Researchers make various adjustments based on some a priori information about the process under study and on methods of mathematical statistics [2,6,7].

The following results are based on spectrum bounded forecasting. Prediction is most adequate when the process is represented as a sum of harmonic components and random noise. Thus, we should predict individual spectrum-limited components of the process for which spectral analysis is applicable [3-5]. Fig. 5 shows the forecast of the secular component of the solar activity for 25 cycles or for 13 years. In Fig. 5 on the abscissa axis the scale of readings with a division value of 160 days is plotted.

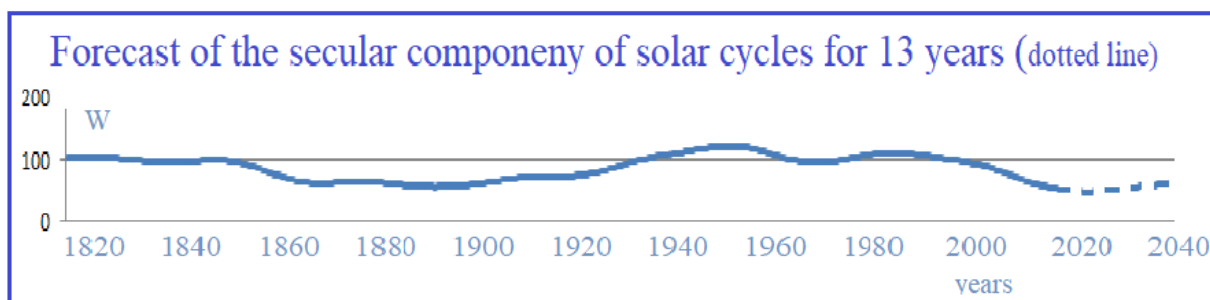


Figure 5. Forecast of the secular component of solar cycles for 13 years.

The current forecast of the low-frequency component obtained in this paper for the next 2 years and the current 13-month forecasts of solar activity provided by WDC-SILSO [6] based on the moving average methods and using the Kalman filter for extrapolation, are shown in Fig. 6.

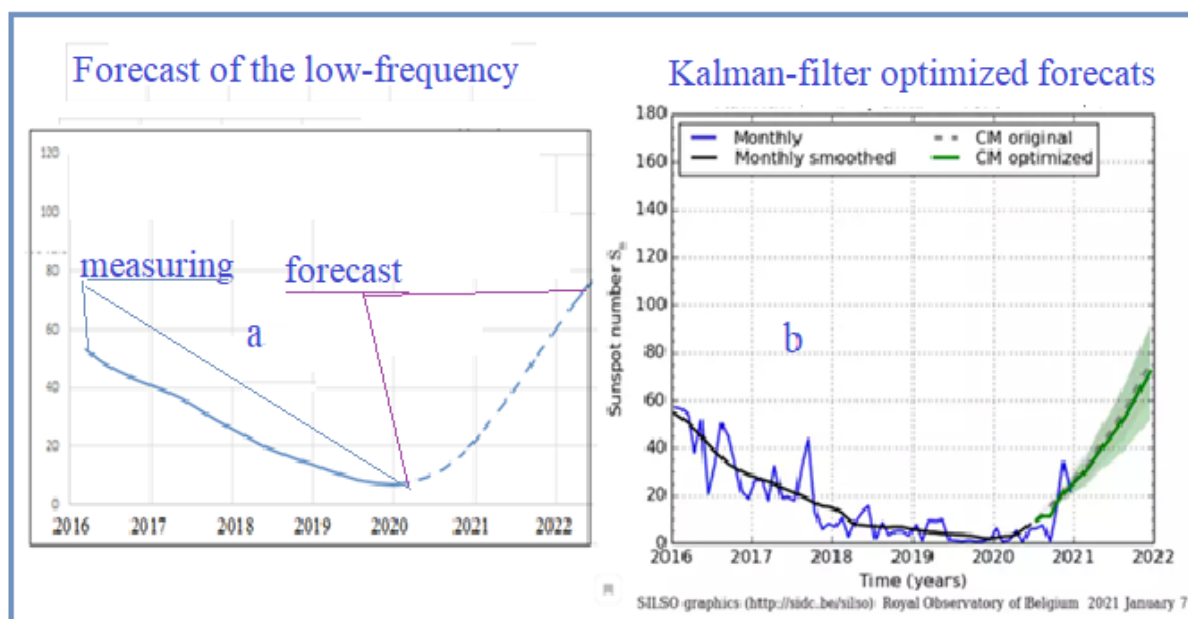


Figure 6. The assumed forecast in the time domain of the low-frequency component for the next 2 years (a) and the current 13-month forecast of solar activity according to the WDC-SILSO data [6].

The comparison shows that the projected curves coincide in terms of steepness and assumed maximum. However, the descending branch of cycle 24 obtained using weighted averaging methods (Fig. 6b) and Chebyshev filtering (Fig. 6a) differ in terms of the mean values and the 2020 minimum.

The Gaussian approximation of 25 solar cycles given in [2] shows that the increasing phase will last 5.3 years. The probability of F-scattering is expected to be maximizing, according to [8], since F-scattering is associated with ionospheric irregularities at different spatial scales.

Radio transmissions for frequencies above 10 MHz are expected to be difficult because the maximum critical frequency will not exceed 10 MHz, but the lifetime of orbiting satellites may be longer due to reduced atmospheric density and drag. Low electron concentrations will reduce the energy loss of radio waves as they pass through. All

this information was obtained long before Cycle 25 began. The use of spectral analysis and Chebyshev filtering allows us to predict the low-frequency component for 1-2 years and the secular component for several cycles. The data we obtained are in agreement with long-term studies and can be used for operational forecasting of solar activity. This forecast is also useful for solving problems of the ionosphere state [4,5].

The authors are grateful to the Chief Researcher, Professor M.G. Deminov for helpful advice and information that we used in our work.

Literature

1. Svalgaard L. and Hansen W.W., Solar activity - past, present, future // *J. Space Weather Space Clim.*, V.3, No.A24, 2013, doi: 10.1051/swsc/2013046
2. Deminov M.G., Nepomnyathshaya E.V., Obridko V.N., Solar and ionospheric properties for cycle 25 // *Geomagnetism and aeronomy*, V.56, №6, P.781-788, 2016.
3. Rozhdestvensrky D.B., Methodological foundations for digital control // *Devices and Systems. Control, monitoring, diagnostics*, No.7, P.9-16, 2011.
4. Alpatov V.V., Ordanovich V.E., Rozhdestvensrky D.B., Long-period variations of ionospheric parameters // *Heliogeophysical Research*, No.26, P.19-30, 2020.
5. Rozhdestvensrky D.B., Finite functions in digital signal processing // 1st All-Russian Conference "Modern Signal Processing Technologies" (STOS-2018), Moscow, P.174-179, 2018.
6. <http://sidc.oma.be/silso/ssngraphics>
7. Hathaway D.H., The Solar Cycle // *Liv. Rev. Solar Physic*, V.12, 2015, doi: 10.1007/lrsp-2015-4
8. Gershman et al., Scattering phenomenon in the ionosphere // Moscow, Nauka, 1984, p.141.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.023

ESTABLISHING SOLAR ACTIVITY TREND FOR SOLAR CYCLES 21 – 24

A.K. Singh* and A. Bhargawa

*Physics Department, University of Lucknow, Lucknow-226 007, India; e-mail: aksphys@gmail.com

Abstract. Solar-terrestrial environment is manifested primarily by the physical conditions of solar interior, solar atmosphere and eruptive solar plasma. Each parameter gives unique information about the Sun and its activity according to its defined characteristics. Hence the variability of solar parameters is of interest from the point of view of plasma dynamics on the Sun and in the interplanetary space as well as for the solar-terrestrial physics. In this study, we have analysed various solar transients and parameters to establish the recent trends of solar activity during solar cycles 21, 22, 23 and 24. The correlation coefficients of linear regression of F10.7 cm index, Lyman alpha index, Mg II index, cosmic ray intensity, number of M & X class flares and coronal mass ejections (CMEs) occurrence rate versus sunspot number was examined for last four solar cycles. A running cross-correlation method has been used to study the momentary relationship among the above mentioned solar activity parameters. Solar cycle 21 witnessed the highest value of correlation for F10.7 cm index, Lyman alpha index and number of M-class and X-class flares versus sunspot number among all the considered solar cycles which were 0.979, 0.935 and 0.964 respectively. Solar cycle 22 recorded the highest correlation in case of Mg II index, Ap index and CMEs occurrence rate versus sunspot number among all the considered solar cycles (0.964, 0.384 and 0.972 respectively). Solar cycle 23 and 24 did not witness any highest correlation compared to solar cycle 21 and 22. Further the record values (highest value compared to other solar three cycles) of each solar activity parameters for each of the four solar cycles have been studied. Here solar cycle 24 has no record text at all, this simply indicating that this cycle was a weakest cycle compared to the three previous ones. We have concluded that in every domain solar 24 was weaker to its three predecessors.

Keywords: Solar cycles; Solar activity; Sunspot numbers; Solar transients.

1. Introduction

In order to study the characteristic features of solar activity, we need to have some suitable parameters that can be used to depict the various forms of solar output. Several features of solar activity considering different indices have been studied on the basis of two major distinctions between them (White *et al.*, 1998; Goode and Pallé, 2007; Kopp and Lean, 2011; Singh and Tonk, 2014; Singh and Bhargawa, 2017; 2019; 2020; Bhargawa and Singh, 2021). First aspect deals with the frequency time aspect of solar activity involving the consideration of a set of time variation in different solar activity indices. The second one is spatial aspect which implies the study of spatial distribution of solar activity phenomena and degree of homogeneity or inhomogeneity in the characteristic features of solar activity indices according to their heliographical position (Goode and Pallé, 2007; Turner *et al.*, 2013).

Variety of solar activity phenomena represented by various indices is coded in a compact numerical form (DeLand and Cebula, 1994). These indices are classified in different ways and can be subdivided into basic physical indices and derived indices. Basic indices represent numerical characteristics of solar activity observed and measured directly such as; sunspot numbers, sunspot area, flare brightness etc (Egorova *et al.*, 2004). All other indices are derived from the processing of basic indices or their combinations, for example, Wolf number, flare indices, fluctuation indices, etc (Roekner *et al.*, 2006). Thus, the indices for which determination and computation of active region area, lifetime, and intensities that are considered will predominantly reflect the behaviour of these indices. Frequency indices represent the similar number of observed active region formations during specified period (Egorova *et al.*, 2004).

Space weather indices include sunspot number, geomagnetic indices, solar wind parameters (density and speed), flare index, solar x-ray flux and many more (Papaioannou *et al.*, 2016). As our knowledge of space weather progresses new indices will undoubtedly arise and old indices will be consolidated. Two of the most used space weather indices are smoothed sunspot number (SSN) and the geomagnetic planetary A index (Ap) (Menvielle *et al.*, 2011). The other most important solar index is solar ten centimetre radio flux (F10.7). This is closely related to SSN. Both SSN and F10.7 give an indication of the overall level of solar activity (Hanuise *et al.*, 2006). SSN ranges from zero to over 300. Although this value is said to indicate solar activity, it does not always mean activity with regard to flares and coronal mass ejections (Gaidash *et al.*, 2017). It might be regarded as similar to a space weather

temperature, but we must be careful with such analogies. The Ap index, and its logarithmic cousin Kp, give a measure of the storminess of the Earth's magnetic field (*Menvielle et al.*, 2011; *Gulyaeva and Gulyaev*, 2020).

In the present paper, we have attempted to study the relative merits of various solar indices (F10.7 cm flux, Lyman alpha index, Mg II index, cosmic ray intensity and Ap index) in relation to SSN and their interrelationship. The observed peculiarities/abnormalities, particularly in the relationship between SSN and solar flare / coronal mass ejection have also been discussed. It is quite new approach to analyze and correlate the characteristic features of different solar activity parameters in relation to sunspot numbers.

2. Data sources

The time series data for sunspot number (version 2), F10.7 cm flux (F10.7 index), Lyman alpha index, Dst index, proton events and Ap index are taken from NASA's Space Physics Data Facility website (<https://spdf.gsfc.nasa.gov>). Mg II index data are taken from LASP Interactive Solar Data centre (<http://lasp.colorado.edu>). The Cosmic ray intensity and Ground Level Enhancements (GLE) data has been adopted from Cosmic Ray Station of the University of Oulu (<https://cosmicrays oulu.fi>). The solar flare data are taken from the NOAA's website (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA) available in public domain and the CMEs occurrence data has been taken from ARTEMIS catalogue (<http://cesam.lam.fr/lascomission/ARTEMIS/>). All the considered time series data of different solar parameters covers the time period of four recently observed solar cycles 23&24.

3. Results and discussion

Solar cycle 24 has already approached its minimum and many studies have declared it the weakest cycle since past 100 years (*Singh and Bhargawa*, 2017, 2019; *Pesnell*, 2020). In the present study solar cycle 24 has been compared to the three previous cycles (solar cycle 21, 22 and 23) covering more than 40 year's data in total. The solar cycles are evaluated on the basis of highest and lowest activity periods, the correlation between the parameters and the record values of solar parameters. The parameters used in this analysis include the sunspot number, the 10.7 cm radio flux, the number of extreme solar flares (X-class flares), proton events (particle energy ≥ 10 MeV), Ground Level Enhancements (GLE), and geomagnetic indices such as Kp and Ap indices which are the measure of geomagnetism. To compare this poor performance of solar cycle 24 (SC24) to the previous solar cycles 21-23, we have used the famous NOAA-scales which link objective solar parameters such as the x-ray flux to all kinds of practical space weather effects such as on radio communication.

Table 1. Different level of solar events: radio blackouts (R-scale), solar radiation storms (S-scale) and geomagnetic storms (G-scale).

Level	Radio blackouts		Proton storms		Geomagnetic storms	
	Scale	X-ray	Scale	Pfu*	Scale	Kp
Extreme	R5	X20	S5	100000	G5	9
Severe	R4	X10	S4	10000	G4	8
Strong	R3	X1	S3	1000	G3	7
Moderate	R2	M5	S2	100	G2	6
Minor	R1	M1	S1	10	G1	5

The scales given in table 1 describe three types of environmental disturbances: radio blackouts (R-scale), solar radiation storms (S-scale) and geomagnetic storms (G-scale). For these, three physical parameters have been used respectively: solar flares (x-ray flux), proton storms (pfu: particle flux unit; number of protons with energies greater than 10 MeV), and the Kp-index. All scales consists of 5 levels (1 to 5), conveying the intensity of the event (minor to extreme). Table 1 provides a summary of scales and intensities. For example, an X 6.9 flare would be rated as an R3 event, a proton flare with a peak flux of e.g. 350 pfu would be rated as an S2 event (between 100 and 1000 pfu), and a severe geomagnetic storm (Kp=8) as a G4 event.

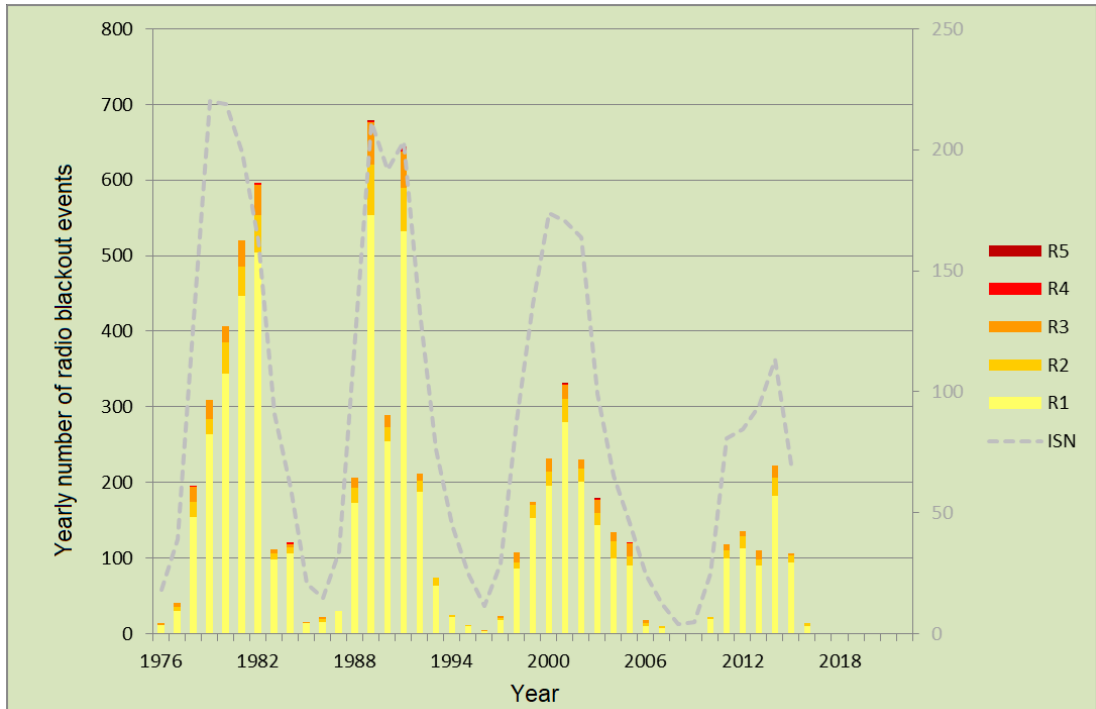


Figure 1. Number of radio blackout events during solar cycles 21 – 24.

Figure 1 shows the yearly accumulation of the radio blackout events, with the yearly International Sunspot Number ([SILSO](#)) superposed on it as the gray dashed line. For the year 2014 which was the year of SC24 maximum, the number of radio blackouts amounted to 222, consisting of 183 minor (R1), 23 moderate (R2), and 16 strong (R3) events as already shown in Table 1. This is clearly lesser in comparison to previous solar cycles. Figure 2 has showed the number of X-class flares, here solar cycle 24 produced only 49 extreme events, or about a third compared to solar cycle 21 and 22 (~150 extreme events). Also the strength of these flares was lower, with no flares above the X10 level during solar cycle 24. The X9 level flare on 6 September 2017 was the strongest flare of the solar cycle 24, standing in the shadow of the spectacular X28 that was observed during solar cycle 23 on 4 November 2003. A 6 X-class flares during the maxima of solar cycle 24 in October 2014 was observed, which was a good result but again a bit meagre compared to the 11 X-class flare event observed during solar cycle 22 in March 1989.

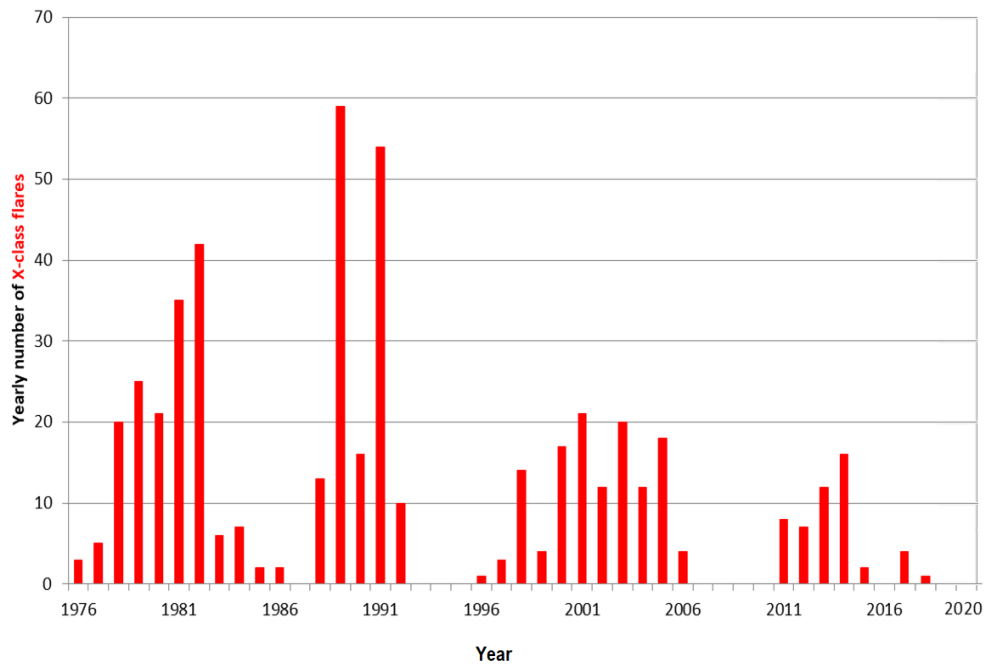


Figure 2. Yearly variation of X class solar flares from 1976 to 2020.

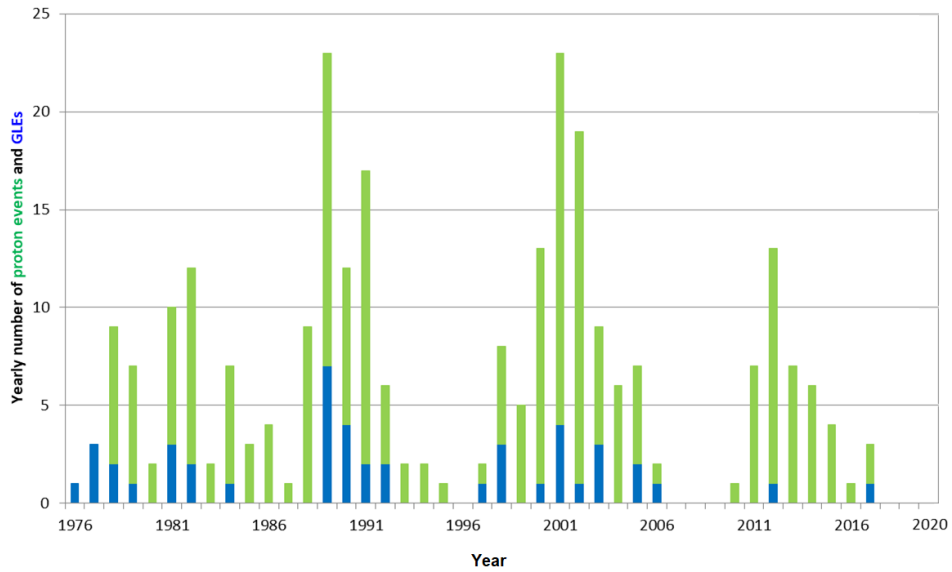


Figure 3. Yearly variation of number of proton events and ground level enhancements for cycles 21 to 24.

Figure 3 has shown the yearly variation of number of proton events for solar cycles 21 to 24. Here the solar cycle 24 has shown relatively well results. The number of events is not that much lower than solar cycle 21 (42 and 59 respectively), and it tops solar cycle 21 when it comes to the intensity (in particle flux units; 1 pfu = particles per square cm per second per steradian) of strongest proton events (6530 pfu vs. 2900 pfu). Solar cycle 22 holds the record of strongest proton event since 1976 (43000 pfu), and solar cycle 23 produced the most proton events in one solar cycle (94, or more than double of what we have seen during solar cycle 24). The solar cycle 24 shows very lower level observations when it comes to ground level enhancements (GLE). These occur during a proton event that is associated with particles having energy well above the regular 10 MeV, rather in the neighbourhood of around 1 GeV (Gopalswamy *et al.*, 2012; Asvestari *et al.*, 2017). When these particles collide with particles in the Earth's upper atmosphere, they can create a shower of secondary particles which can be detected by neutron monitors on ground (Gopalswamy *et al.*, 2012). Several conditions (number of stations, percentage increase above background) need to fulfill before an increase in the observed neutron counts is validated as a genuine GLE (Mishev and Velinov, 2018). Since the start of the measurements in the 1940s, only 72 such events have been recorded (Usoskin *et al.*, 2011). For solar cycle 21 to 23, about 13-16 events per solar cycle have been recorded. For solar 24, the count stops at 2: one on 17 May 2012, and the other on 10 September 2017 which was associated with the 2nd strongest flare of solar cycle 24 (X8 level).

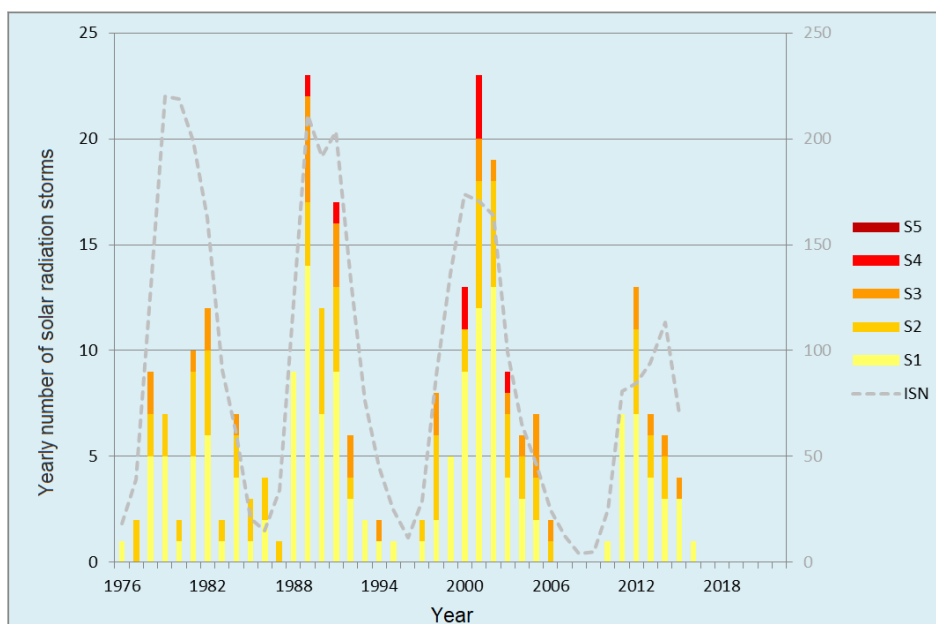


Figure 4. Number of solar radiation storms occurred during solar cycles 21 – 24.

Concerning the number of solar radiation storms (proton storms), it is no surprise that SC24 is again the least active (Figure 4). Interestingly, it is not that much lower in number (39 vs. 59) and intensity (max. S3 events) than SC21 despite the large difference in maximum yearly sunspot number (220 vs. 113). Also remarkable is that 2012 is the year with the most and most intense radiation storms during SC24, and not 2014, the year of solar cycle maximum.

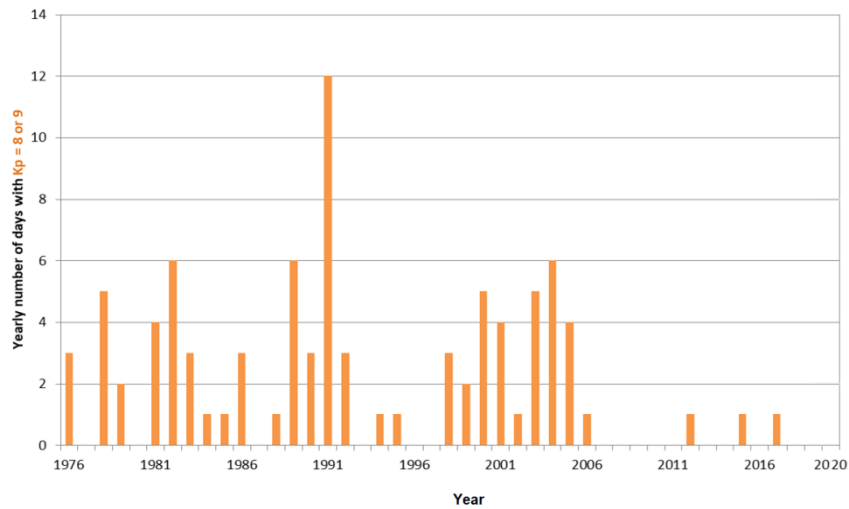


Figure 5. Yearly variation of number of days with Kp = 8 or 9 during 1976 to 2020.

We can see the depressing statistics continue also in case of geomagnetic disturbances. When counting the days with severe or extremely severe geomagnetic disturbances (Kp = 8 or 9), the counter for solar cycle 24 stops already at 3: 9 March 2012, 22 June 2015 and 8 September 2017. So far, no days with Kp= 9 have been recorded during solar cycle 24. For the 3 previous solar cycles, there were always between 27 and 31 days with (extremely) severe geomagnetic disturbances. Figure 5 clearly shows how absent strong geomagnetic activity has been during this solar cycle. Intensity wise, only during the geomagnetic storms of 17 March 2015 and 22 June 2015 reached the Dst index (Disturbance storm-time index) values below -200 nT. The Dst index is often used for gauging the intensity of a geomagnetic storm. Compared to the previous solar cycles, there have been much more intense cases such as on 13-14 March 1989 (Dst = -589 nT) when the province of Québec in Canada experienced a power grid failure that lasted for several hours (Stauning, 2013).

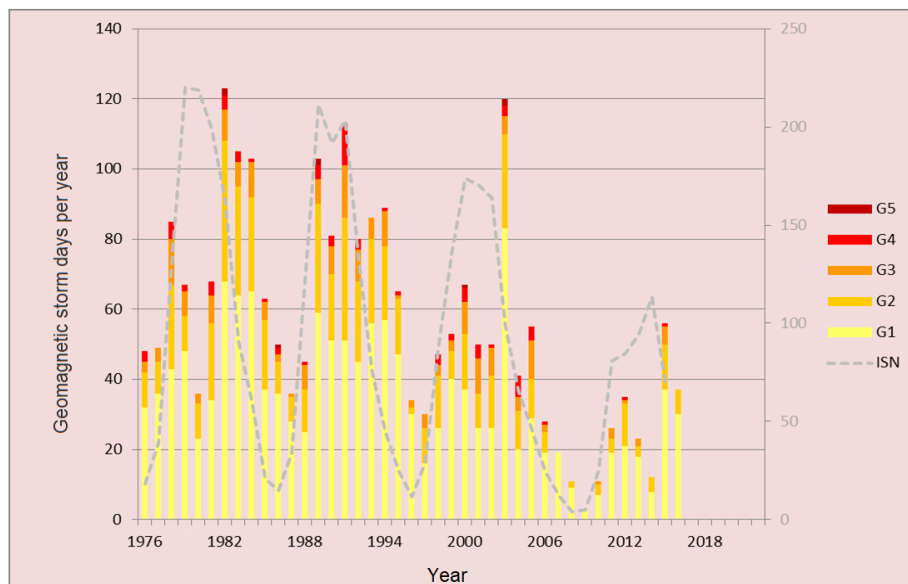


Figure 6. Number of geomagnetic storm days per year during solar cycles 21 – 24.

The plot of the geomagnetic storm days (Figure 6) bears much less resemblance with the evolution of the sunspot number than in the previous two charts given in figures 1 and 4. This is because minor to strong geomagnetic disturbances can also be caused by the high speed solar wind streams (HSS) from coronal holes, hence distorting the

familiar outlook of the sunspot cycle. Nonetheless, even then it is very clear that SC24 has been quite disappointing when it comes to the number and intensity of geomagnetic storms, with no extreme storms (G5) so far and precious few severe events (G4). Worse, the numbers even get depressingly low when one compares to other years such as e.g. the 120 storming days in 2003. Interestingly, the number of geomagnetic storm days is peaking in 2015-2016, so after the SC24 maximum in 2014. This is particularly due to the HSS from numerous coronal holes, and is a well-known aspect of this stage of a solar cycle.

Considering the highest solar activity phenomena involving different parameters for each of the four solar cycles 21-24, the highest value of monthly sunspot number was recorded in Jun 1989 (SC 22) which was about 284.5. The highest monthly sunspot area was observed in Feb 1982 (SC 21), which was about 3719.0 MH. The highest monthly 10.7 cm radio flux value (~ 247.2) was recorded during SC 22 in Jun 1989. The strongest solar flare of type X28 was observed on 4 Nov 2003 (SC 23) while solar cycle 21 have largest number of total number of X class flares. Strongest proton event (43000 MeV; in pfu) was occurred on 24 March 1991 (SC 22) while solar cycle 23 recorded the largest number of such proton events (~ 94). Here solar cycle 24 has no largest record values at all, this simply indicating that this cycle was a weakest cycle compared to the three previous ones. So, in every domain solar 24 has been outperformed by its three predecessors. The solar cycle 24 activity is most likely comparable to the solar cycles in the late 19th and early 20th century, but most of the above mentioned parameters were not available at that time, preventing definite conclusions.

The correlation coefficients for various solar activity parameters from solar cycle 21 to 24 have been calculated in the study. The statistical analysis and numerical calculated values presented in study implies that the SSN and F 10.7 cm solar index, Lyman alpha index and Mg II index was highly correlated and the correlation coefficient is high (≥ 0.9) for solar cycles 21 to 23 and was ~ 0.7 , 0.8 and 0.9 for solar cycle 24 respectively. Therefore for any comparative study any one of these parameters can be used for finding the solar terrestrial relationship. The correlation coefficient between SSN and Ap index was not as high as found between the SSN and F 10.7 cm index. The correlation coefficient is ~ 0.384 (highest) for solar cycle 22 and the lowest (~ 0.112) for solar cycle 24. Anti-correlation between SSN and cosmic ray intensity were almost similar for solar cycles 21 and 24 (-0.810 and -0.895) and -0.639 (lowest) for solar cycle 23. The correlation coefficients between SSN and number of solar flares (M+X) were high during the period of solar cycles 21, 22 and 23 (≥ 0.90) and ~ 0.845 for solar cycle 24 yields the lowest correlation coefficient. We have found that the peak values of CMEs rate were large for odd cycles (21 and 23) in comparison to even cycles (22 and 24). The correlation coefficient between SSN and CMEs occurrence rate were maximum for solar cycle 21 and 22 (0.945 and 0.972). For solar cycle 24 this correlation was weakest (0.871).

4. Conclusions

Understanding the complex nature of solar cycle remains one of the most important issues in solar physics. In this study several key parameters of the solar cycles have been analysed. Summary of highest solar activity phenomena involving various parameters for each of the four solar cycles (21 to 24) have been presented. The highest value of sunspot number among all the solar cycles was observed during solar cycle 22 and the largest monthly sunspot area was witnessed during solar cycle 21. Highest monthly value of 10.7 cm radio flux (1 AU; in sfu) was recorded during solar cycle 22. The most extreme solar flare of the level of X 28 was occurred in solar cycle 23 and the largest number of such extreme flares was observed during solar cycle 21. The Strongest proton event (>10 MeV) was witnessed in solar cycle 22 and largest sun of these strongest proton events was recorded in solar cycle 23. Solar cycle 23 witnessed the largest number of ground level enhancements (GLE) while solar cycle 21 witnessed the strongest geomagnetic storm.

We found out the correlation coefficients of linear regression for F 10.7 cm index, Lyman alpha index, Mg II index, cosmic ray intensity, number of extreme flares and CMEs rate versus SSN during solar activity cycles 21, 22, 23 and 24. We showed that correlation sunspot number and F 10.7 cm index was highest during solar cycle 21 and during solar cycle 24 its value was lowest. The correction of sunspot number and Lyman alpha index was also highest during solar cycle 21 and lowest during solar cycle 24. In case of the correlation of sunspot number versus Mg II index solar cycle 22 got the highest value of correlation coefficient while solar cycle 24 was assigned lowest value. The correlation between sunspot number and cosmic ray showed some interesting results, here the value of anti-correlation was highest for solar cycle 24 and it was lowest for solar cycle 23. Perhaps the correlation coefficient between sunspot number and Ap index was small for each of the four solar cycles but it was highest in case of solar cycle 22 and lowest in case of cycle 24. The correlation between Sunspot Number and number of M-class and X-class flares was highest during solar cycle 21 and it was lowest in case of solar cycle 24. The CMEs occurrence rate showed high correlation with sunspot number in solar cycle 23 and it was lowest in case of solar cycle 24. From discussions, we can observe that solar cycle 24 has no red text at all, this simply indicating that this solar cycle was a weakest in every domain compared to the three previous solar cycles. The solar cycle 24 activity is most likely comparable to the solar cycles 12 and solar cycle 14 observed in the late 19th and early 20th century. This may be an indication that, in particular, all observed indices are approaching to the "Quiet Sun Level".

References

- Asvestari E., Willamo T., Gil A., Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., Mikhailov V.V., Mayorov A., 2017. Analysis of Ground Level Enhancements (GLE): Extreme solar energetic particle events have hard spectra. *Adv. Space Res.*, 60, 781-787.
- Bhargawa A., Singh A.K., 2021. Elucidation of some solar parameters observed during solar cycles 21 – 24. *Adv. Space Res.*, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.037>
- DeLand M.T., Cebula R.P., 1994. Comparisons of the Mg II index products from the NOAA- 9 and NOAA-11 SBUV/2 instruments. *Sol. Phys.*, 152, 61–68.
- Egorova T., Rozanov E., Manzini E., Haberreiter M., Schmutz W., Zubov V., Peter T., 2004. Chemical and dynamical response to the 11-year variability of the solar irradiance simulated with a chemistry-climate model. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L06119.
- Gaidash S.P., Belov A.V., Abunina M.A., et al., 2017. Space Weather Forecasting at IZMIRAN. *Geomagn. Aeron.*, 57, 869–876.
- Goode P.R., Pallé E., 2007. Shortwave Forcing of the Earth's Climate: Modern and Historical Variations in the Sun's Irradiance and the Earth's Reflectance. *J. Atmospheric Sol. Terr. Phys.*, 69, 1556-1568.
- Gopalswamy N., Xie H., Yashiro S., Akiyama S., Makela P., Usoskin I.G., 2012. Properties of ground level enhancement events and the associated solar eruptions during solar cycle 23. *Space Sci. Rev.*, 171, 23–60.
- Gulyaeva T.L., Gulyaev R.A., 2020. Chain of responses of geomagnetic and ionospheric storms to a bunch of central coronal hole and high speed stream of solar wind. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 208, 105380.
- Hanuise C., Cerisier J.C., Auchère F., Bocchialini K., et al., 2006. From the Sun to the Earth: impact of the 27–28 May 2003 solar events on the magnetosphere, ionosphere and thermosphere. *Ann. Geophys.*, 24, 129–151.
- Kopp G., Lean J.L., 2011. A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01706.
- Menvielle M., Iyemori T., Marchaudon A., Nosé M., 2011. Geomagnetic Indices. In: Manda M., Korte M. (eds) *Geomagnetic Observations and Models*. IAGA Special Sopron Book Series, vol. 5. Springer, Dordrecht.
- Mishev A.L., Velinov P.I.Y., 2018. Ion production and ionization effect in the atmosphere during the Bastille day GLE 59 due to high energy SEPs. *Adv. Space Res.*, 61, 316–25.
- Papaioannou A., Sandberg I., Anastasiadis A., et al., 2016. Solar flares, coronal mass ejections and solar energetic particle event characteristics. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 6, A42.
- Pesnell D.W., 2020. Lessons learned from predictions of Solar Cycle 24. *J. Space Weather & Space Clim.*, 10, 60.
- Roeckner E., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M.A., Hagemann S., Kornblueh L., Manzini E., Schlese U., Schulzweida U., 2006. Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J. Clim.*, 19, 3771– 3791.
- Singh A.K., Tonk A., 2014. Solar activity during first six years of solar cycle 24 and 23: a comparative study. *Astrophys. Space Sci.*, 353, 367-371.
- Singh A.K., Bhargawa A., 2017. An early prediction of 25th solar cycle using Hurst exponent. *Astrophys. Space Sci.*, 362, 199.
- Singh A.K., Bhargawa A., 2019. Prediction of declining solar activity trends during solar cycles 25 and 26 and indication of other solar minimum. *Astrophys. Space Sci.*, 364, 12.
- Singh A.K., Bhargawa A., 2020. Ascendancy of Solar Variability on Terrestrial Climate: A Review. *Journal of Basic & Applied Sciences*, 16, 105-130.
- Stauning P., 2013. Power grid disturbances and polar cap index during geomagnetic storms. *J. Space Weather Space Clim.*, 03, A22.
- Turner J., Hosking J.S., Phillips T., Marshall G.J., 2013. Temporal and spatial evolution of the Antarctic sea ice prior to the September 2012 record maximum extent. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5894–5898.
- Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., Mironova I.A., Tylka A.J., Dietrich W.F., 2011. Ionization effect of solar particle GLE events in low and middle atmosphere. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 1979–1988.
- White O.R., de Toma G., Rottman G.J., Woods T.N., Knapp B.G., 1998. Effects of spectral resolution on the Mg II index as a measure of solar variability. *Sol. Phys.*, 177, 89–103.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.024

СВЯЗЬ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА ФРОНТА МЕЖПЛАНЕТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ СО ВРЕМЕНЕМ SSC ПО АНАЛИЗУ ОТДЕЛЬНЫХ КВМ-СОБЫТИЙ

С.В. Громов, Ю.С. Загайнова, Л.И. Громова

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, г. Москва,
Троицк; e-mail: sgromov@izmiran.ru*

Аннотация. При взаимодействии межпланетных корональных выбросов массы (КВМ), сопровождающиеся ударными волнами, с земной магнитосферой в магнитном поле Земли могут быть зарегистрированы скачки разной интенсивности, которые в некоторых случаях могут инициировать развитие магнитных бурь, представляя собой ее внезапное начало (*Storm Sudden Commencement - SSC*). В работе представлен первые результаты оценки зависимости времени появления SSC как функции широты/долготы и мирового времени, с целью дальнейшего исследования связи направления прихода фронта ударной волны со временем появления SSC. Для анализа были выбраны два КВМ с источниками формирования в Северном (21.06.2015, 02:36 UT) и Южном (14.07.2017, 01:25 UT) полушарии Солнца. При подходе к Земле они вызвали SSC 22.06.2015 в 18:33 UT и 16.07.2017 в 05:59 UT с последовавшими за ними магнитными бурями. Время старта SSC определялась по секундным данным, доступным в сети INTERMAGNET (около 40 обсерваторий северного и 20 обсерваторий южного полушарий). Для этих событий выполнена оценка появления SSC как функция геомагнитной широты и долготы от всемирного времени. Показано, что с приходом КВМ к Земле старт SSC на наземных магнитных обсерваториях, расположенных на широтах, от высоких до экваториальных, не является одновременным - время старта SSC на разных широтах отличаются на десятки секунд. Кроме этого, в рассмотренных событиях SSC сначала регистрируется на обсерваториях полушария Земли, освещенного Солнцем, и, в среднем, появляется раньше в нижних широтах, чем в высоких.

Введение

Взаимодействие с магнитосферой Земли межпланетных корональных выбросов массы, сопровождающиеся межпланетными ударными волнами, приводит к возмущению магнитного поля Земли. Этот процесс отражается в резком скачке изменении геомагнитного поля (*Sudden Commencement - SC*) разной интенсивности, который в некоторых случаях может привести к развитию магнитной бури, представляя собой ее внезапное начало (*Storm Sudden Commencement - SSC*). Направление прихода фронта межпланетной ударной волны [5], так же, как и ее скорость и динамическое давление солнечного ветра, оказывает влияние на амплитуду и время нарастания SC. Внезапное начало бурь (SSC) фиксируется в каталоге SC, представляемом международной службой геомагнитных индексов (International Service of Geomagnetic Indices - <http://isgi.unistra.fr>).

Проблемы оценки времени нарастания, амплитуды SSC и одновременности SSC на разных наземных геомагнитных обсерваториях, а также зависимость времени начала SSC от широты и долготы станций наблюдения, рассматривались достаточно давно [2, 4, 6]. Но результаты «страдали» из-за неточности регистрации данных и погрешности их привязки к мировому времени [1]. Появление огромного массива секундных данных, доступных в сети INTERMAGNET, дает возможность вернуться к работам прошлых лет и провести исследования на более современном уровне.

Цель представляемой работы - на примере отдельных КВМ оценить зависимость времени появления SSC как функции широты/долготы и мирового времени, с целью дальнейшего исследования связи направления прихода фронта ударной волны со временем появления SSC.

Описание данных

На первом этапе наших исследований в каталоге КВМ (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/HALO/), составленном по данным коронографов LASCO обсерватории SOHO за период наблюдений 2011 – 2017 гг., нами была отобрана пара КВМ, удовлетворяющая следующим критериям:

- (i) являются быстрыми КВМ, т.е. их линейная скорость $V_{lin} > 1500$ км/с,
- (ii) относятся к типу «гало»,
- (iii) источники формирования должны быть в разных полушариях Солнца,
- (iv) инициирование на Земле магнитных бурь с внезапным началом.

К таким событиям относятся:

(1) KBM от 21.06.2015 с источником в Северном полушарии Солнца, который впервые наблюдался в поле зрения коронографов LASCO в 02:36 UT, координаты области-источника формирования KBM на диске Солнца - N12E16, скорость на орбите Земли - 610 км/с,

(2) KBM от 14.07.2017 с источником в Южном полушарии Солнца с выходом в поле зрения коронографов LASCO в 01:25 UT, координаты области-источника формирования KBM на диске Солнца - S06W29, скорость на орбите Земли - 520 км/с.

Время появления SSC фиксировалось по магнитным данным с секундным временным разрешением, предоставляемым сетью INTERMAGNET (<https://www.intermagnet.org>). При взаимодействии с магнитосферой Земли они вызвали SSC 22.06.2015 в 18:33 UT и 16.07.2017 в 05:59 UT с последовавшими за ними магнитными бурями соответственно. Внезапное начало бури (SSC) определяется по резкому увеличению H -компоненты геомагнитного поля, которое происходит на всей Земле и отражается резким скачком в индексе буревой активности $SymH$ [3]. Это время определяется по импульсу SC на нескольких приэкваториальных станциях (Honolulu - HON, San Juan - SJG, Tamanrasset - TAM, Alibag - ABG, Kanoya - KNY) и фиксируется в каталоге SC (<http://isgi.unistra.fr>). Однако, известно, что импульс SC часто появляется в высоких географических широтах на одну или несколько минут (или секунд) раньше, чем на низких широтах. Нарастание поля начинается внезапно, но его время может составлять от 150 с до 300 с и зависит от местного времени наблюдения, его амплитуда может быть различной и зависит от условий в солнечном ветре. Для каждого события были обработаны данные обсерваторий, как северного, так и южного полушарий Земли. Ниже представлены результаты оценки зависимости времени появления SSC как функции широты/долготы и мирового времени для этих двух отобранных событий.

Обсуждение результатов

На Рис. 1 представлены условия в межпланетном магнитном поле (ММП) и в солнечном ветре, а также буревая активность на Земле, выраженная индексом $SymH$, который является минутным аналогом часового индекса Dst . (База данных параметров ММП и солнечного ветра с одноминутным разрешением - <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>) для 22.06.2015(a) и 16.07.2017(б), когда на земной поверхности наблюдались SSC, вызванные приходом межпланетной ударной волны. Время прихода ударной волны, отмеченное красными стрелочками, так же, как и границы области сжатия (SHEATH) и магнитных облаков (MC), последовавших за KBM, указаны согласно классификации событий в солнечном ветре в каталоге [2], находящегося в свободном доступе на сайте <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog>. Внезапное начало бури отражено резким скачком в индексе буревой активности $SymH$ (см. панель $SymH$).

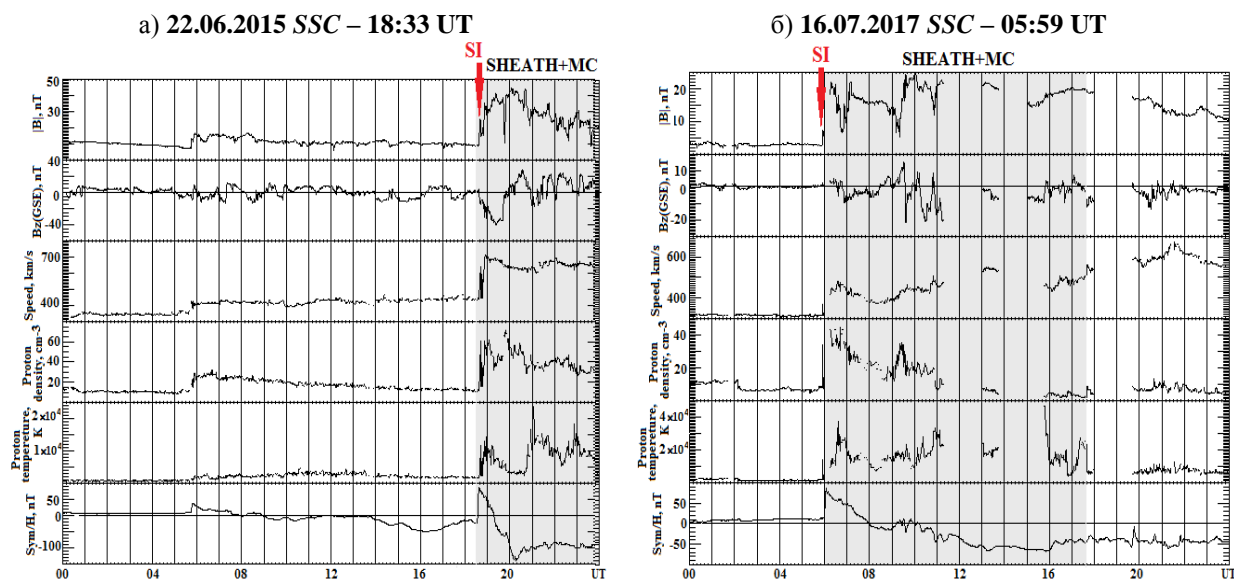


Рисунок 1. Характеристики межпланетного магнитного поля (модуль поля $|B|$, компонента $Bz(GSE)$) и солнечного ветра (скорость – Speed, плотность – Proton density, протонная температура - Proton temperature) и буревой активности на Земле ($SymH$ - одноминутный аналог индекса Dst) для событий 22.06.2015 (a) и 16.07.2017 (б).

В исследуемых случаях амплитуда SC достигала ~ 80 -90 нТл, что соответствует высокому уровню плотности солнечного ветра (см. Рис. 1).

Для выбранных событий были проанализированы, взятые из сети INTERMAGNET, секундные данные 58 станций для события от 22.06.2015, и 68 станций для события от 16.07.2017. По этим данным для каждой

обсерватории было определено время (в секундах) начала внезапного нарастания геомагнитного поля, как время начала SSC.

На Рис. 2 (SSC-событие от 22.06.2015) и Рис. 3 (SSC-событие от 16.07.2017) показаны: (а) распределение времени начала SSC как функций широты – мирового времени; (б) долготы - мирового времени, где ϕ – геомагнитная широта станции, λ – значение долготы станции, отсчитываемой от долготы, на которой в момент прихода *КВМ* (начало SSC) был полдень по местному времени, $\lambda = 0$ соответствует «полуденной» долготы, на которой в момент прихода *КВМ* наблюдался полдень по местному времени (12:00 LT). В представляемом случае - станция KOU. Диапазон $\lambda = [-90^\circ; 90^\circ]$ соответствуют значениям долготы λ для станций, расположенных на освещенном Солнцем полушарии Земли. Отрицательные значения долготы λ относятся к станциям, где момент появления SSC наблюдался в 00:00-12:00 LT местного времени (восточнее полуденного меридиана); положительный - в период 12:00-24:00 LT (западнее полуденного меридиана).

22.06.2015

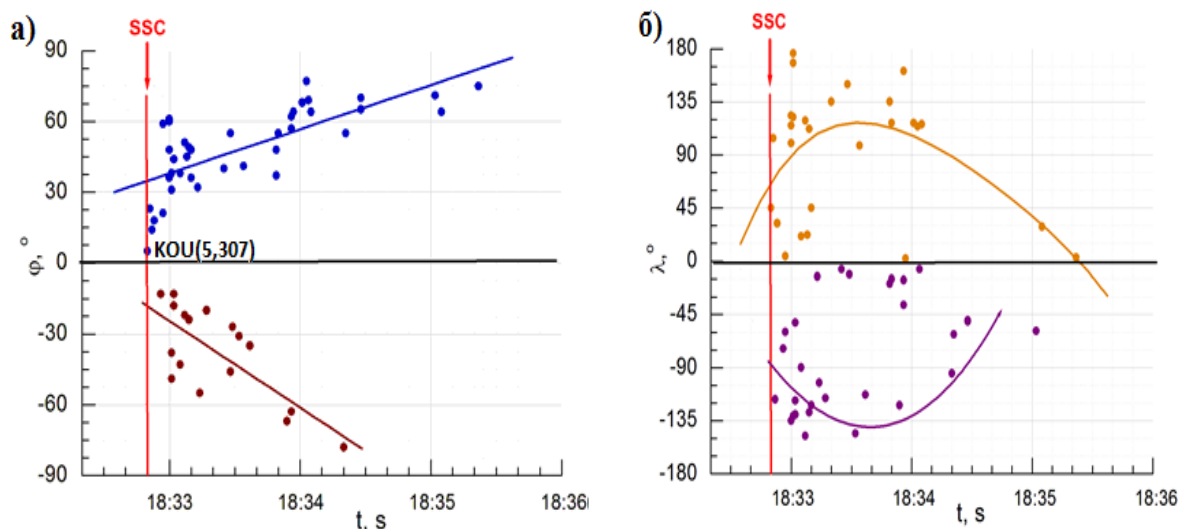


Рисунок 2. SSC-событие от 22.06.2015 (*КВМ* от 21.06.2015), (а) - зависимость времени начала SSC как функция широты и всемирного времени, (б) - зависимость времени начала SSC как функция долготы и всемирного времени.

Во время SSC-события от 22.06.2015, инициированного приходом к орбите Земли *КВМ* от 21.06.2015 с источником в Северном полушарии Солнца, на приход ударной волны первой отреагировала станция в Северном полушарии Земли - Kougoou (KOU, широта/долгота $5^\circ/307^\circ$), расположенная в долготном секторе от -135° до 0° .

16.07.2017

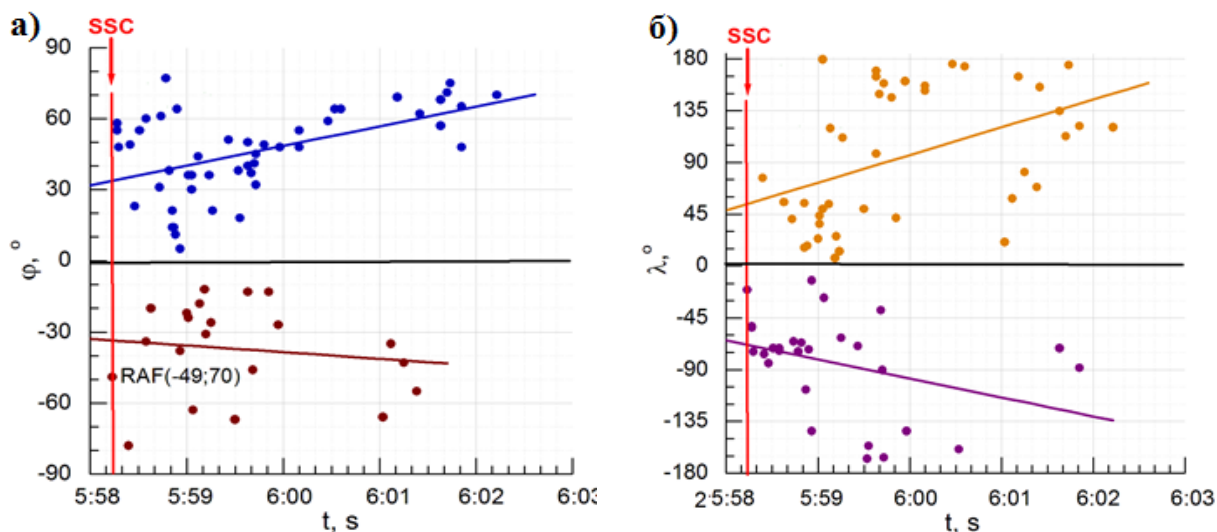


Рисунок 3. Тоже, что и на Рис.2, но для SSC-события от 16.07.2017 (*КВМ* от 14.07.2017).

Во время SSC-события от 22.06.2015, зафиксированного в результате прихода к орбите Земли KBM от 16.07.2017 с источником в Южном полушарии Солнца, первой отреагировала станция в Южном полушарии Земли - станция Port-aux-Francais (PAF: широта/долгота $-49^{\circ}/70^{\circ}$) в долготном секторе от 0° до 90° .

Заключение

Анализ времени начала SSC как функции широты/долготы и всемирного времени по данным с секундным временным разрешением для двух SSC-событий (22.06.2015 в 18:33 UT и 16.07.2017 в 05:59 UT), вызванным приходом межпланетных KBM с ударной волной, области-источники которых зафиксированы в разных полушариях Солнца (для KBM от 21.06.2015 в 02:36 UT – в Северном полушарии, а для KBM от 14.07.2017 в 01:25 UT - в Южном полушарии) показал:

- (i) с приходом KBM к орбите Земли начало SSC на наземных магнитных обсерваториях, расположенных на разных широтах, от высоких до экваториальных, не является одновременным;
- (ii) время регистрации появления SSC на разных широтах отличаются на десятки секунд;
- (iii) в рассмотренных событиях SSC регистрируется сначала на обсерваториях полушария Земли, осященного Солнцем, и появляется раньше в нижних широтах, чем в высоких.

Далее планируется продолжить исследование зависимости времени начала SSC в связи приходом гало-KBM как функции широты/долготы и всемирного времени с целью дальнейшего исследования связи направления прихода фронта ударной волны со временем появления SSC на большей выборке событий.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственного задания № 012009488, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-02-00150.

Список литературы

1. Акасофу С.И., Чепмен С. (1974). Солнечно-земная физика. Перевод с англ., Москва, Изд-во Мир, 384 с.
2. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. (2009). Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед.. Т. 47. № 2. С. 99–113. <https://doi.org/10.1134/S0010952509020014>
3. Curto J.-J., Araki T., Alberca L.F. (2007). Evolution of the concept of Sudden Storm Commencements and their operative identification // Earth Planets Space. V. 59. I-XII. <https://doi.org/10.1186/BF03352059>
4. Sato T. (1961). Sudden commencement of geomagnetic storms in high latitudes // Rep. Ionosph. Space Res. Japan. 15. 215.
5. Selvakumaran R., Veenadhari B., Ebihara Y., Kumar S., Prasad D.S.V.V.D. (2017). The role of interplanetary shock orientation on SC/SI rise time and geoeffectiveness // Advances in Space Research. V. 59. N. 5. P. 1425–1438. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.12.010>
6. Williams V.L. (1960). The simultaneity of sudden commencements of magnetic storms // J. Geophys. Res.. V. 65. N. 1. P. 85–92.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.025

КОНТРОЛЬ ЖЕСТКОСТИ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПАРАМЕТРАМИ МАГНИТОСФЕРЫ И СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ В НАЧАЛЕ СЕНТЯБРЯ 2017 Г.

О.А. Данилова¹, Н.Г. Птицына¹, М.И. Тясто¹, В.Е. Сдобнов²

¹Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН; e-mail: md1555@mail.ru

²Институт Солнечно-земной физики СО РАН

Аннотация. Космические лучи являются одним из важных факторов, определяющих космическую погоду. Их жесткости обрезания сильно изменяются под воздействием состояния магнитосферы Земли и межпланетного космического пространства. В данной работе представлены изменения геомагнитных порогов, рассчитанные для периода сильной геомагнитной бури 7–8 сентября 2017 г.. Модельные вертикальные эффективные геомагнитные пороги были получены методом траекторных расчетов в магнитном поле возмущенной магнитосферы (Цыганенко $Ts01$) для ряда станций. Проведено сравнение их с жесткостями обрезания, полученными методом спектрографической глобальной съемки по данным мировой сети нейтронных мониторов. Проведен анализ временных вариаций геомагнитных порогов ΔR и корреляции их с параметрами межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ), которая различна на разных фазах бури и отличается от корреляции, посчитанной на масштабе всей бури. На главной фазе преобладает влияние ММП, в частности B_z компоненты, а на восстановительной фазе – динамических параметров СВ, а именно, давления P и плотности N . Это связано с тем, что во время бури в ответ на изменения параметров СВ и ММП развиваются глобальные токовые системы, которые эволюционируют во времени. При этом формирование, интенсификация и дальнейший распад этих токовых систем происходит не одновременно, а на различных временных масштабах.

1. Введение

Жесткость геомагнитного обрезания, или пороговая жесткость (R) космических лучей (КЛ), т.е. самая низкая жесткость, которой должна обладать частица, чтобы проникнуть в заданную точку в магнитосфере, определяется магнитосферным магнитным полем. Свойства геомагнитного экрана меняются во времени в зависимости от динамического взаимодействия магнитных и электрических полей солнечного ветра (СВ) с внутримангнитосферными полями и токами. Результаты предыдущих исследований зависимости порогов от межпланетных параметров и геомагнитной активности достаточно противоречивы.

Цель работы: Выявить параметры гелио- и магнитосферы, которые контролируют вариации пороговых жесткостей (ΔR) во время мощной бури 7 – 8 сентября 2017 г. при помощи расчета соответствующих корреляций.

Особое внимание мы уделили анализу корреляций изменений пороговых жесткостей с межпланетными параметрами и индексами геомагнитной активности во время каждой из трех фаз развития анализируемой бури: на предварительном этапе (перед бурей), в главной и восстановительной фазах бури, имея в виду, что контроль вариаций параметрами гелио- и магнитосферы на разных фазах магнитной бури очень мало изучен.

2. Данные и методы

Жесткости геомагнитного обрезания (ЖГО) вычислялись с использованием двух методов:

(1) Методом спектрографической глобальной съемки [1], при которой определение ЖГО ($R_{\text{гс}}$) базируется на наблюдательных данных сети нейтронных мониторов;

(2) и методом, при котором для определения ЖГО ($R_{\text{эф}}$) численно рассчитываются траектории частиц в модельном магнитном поле магнитосферы [2]. В качестве модели выбрана эмпирическая модель магнитосферы Цыганенко $Ts01$ [3–5]. Выбор модели $Ts01$ для расчетов основан на том, что модель $Ts01$ хорошо описывает среднюю магнитосферу во время сильных возмущений.

Расчеты проводились для станций, расположенных на разных широтах: ESOI (33°.30 N, 35°.80 E), Алматы (43°.20 N, 76°.94 E), Рим (41°.90 N, 12°.52 E), Иркутск (52°.47 N, 104°.03 E), Москва (55°.47 N, 37°.32 E) и Кингстон (42°.99 S, 147°.29 E), пороговые жесткости которых в спокойное время охватывают область от ~10 до 2 ГВ. Вариации жесткости геомагнитного обрезания $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{гс}}$ определялись как разности между

рассчитанными значениями жесткости обрезания (теоретическими и экспериментальными) и жесткостями в спокойный период перед бурей (6 сентября 2017 г.).

Мы рассчитали корреляции вариаций пороговых жесткостей с изменениями общего межпланетного магнитного поля ММП B и его компонентами B_z и B_y , E_y — компонентой электрического поля, параметрами СВ: плотностью N , скоростью V и динамическим давлением P , а также с Kp и Dst индексами геомагнитной активности, значения которых были взяты из базы OMNI на сайте <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>.

3. Результаты и их обсуждение

Результаты расчетов приведены на рисунках 1–3.

1) Понижение жесткостей обрезания во время бури 7–8 сентября 2017 г.

На рисунке 1 приведены некоторые параметры гео- и гелиосферы, а также $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ для двух высокоширотных станций Кингстон и Москва для 7–8 сентября 2017 г.

Как видно из рисунка 1, максимальное понижение геомагнитных порогов $\Delta R_{эф}$, полученных на основе модели, наблюдается на главной фазе, в максимуме бури, в то время как для $\Delta R_{сгс}$, полученных на основе данных наблюдений, — на восстановительной фазе.

Максимальное снижение геомагнитных порогов $\Delta R_{сгс}$ существенно меньше для наиболее высокоширотной станции Кингстон (~0.5 ГВ), чем для Москвы (~0.7 ГВ).

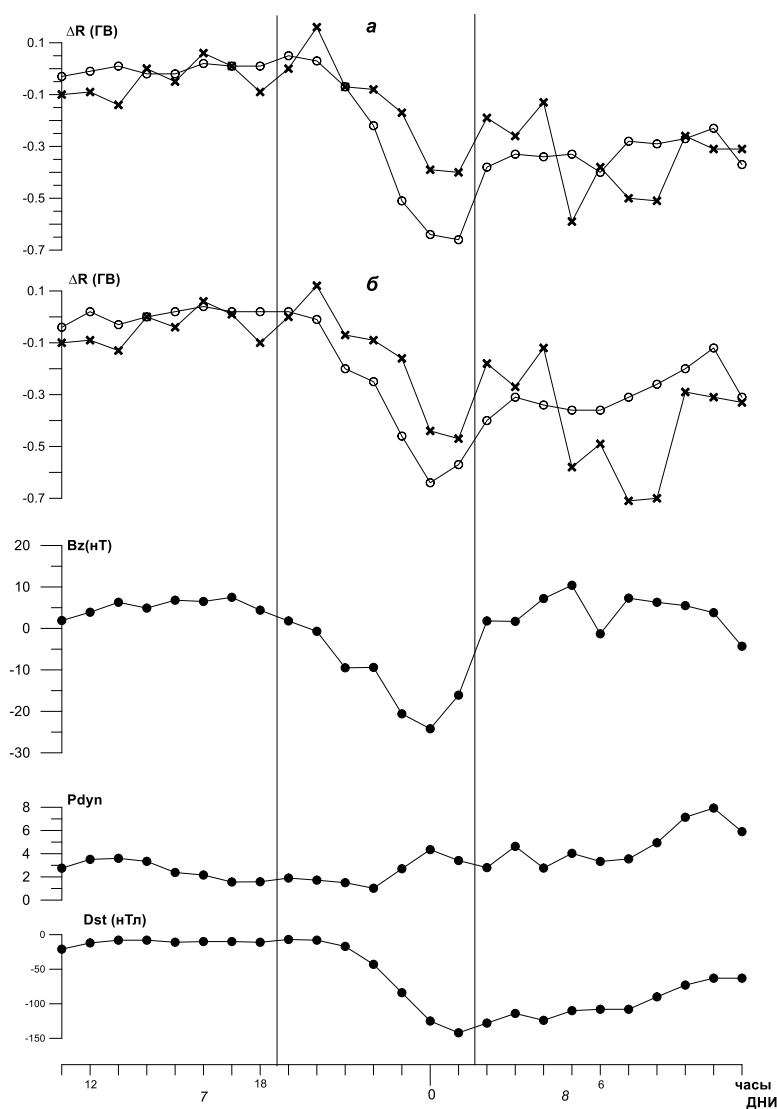


Рисунок 1. Временные изменения $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ ($\Delta R_{эф}$ — \circ , $\Delta R_{сгс}$ — \times ; а — Кингстон, б — Москва) и параметров B_z , P и Dst в течение бури.

2) Коэффициенты корреляции на масштабе всей бури. Сравнение результатов, полученных двумя методами.

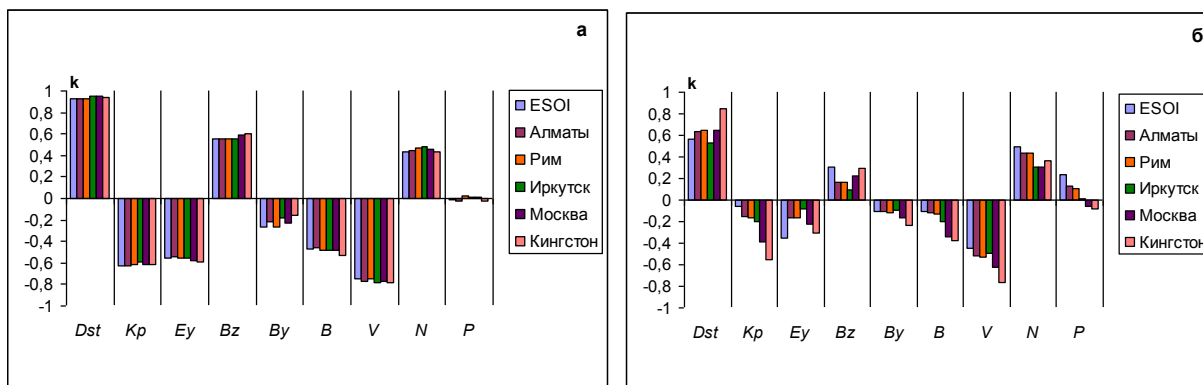


Рисунок 2. Корреляция параметров солнечного ветра и геомагнитной активности с вариациями модельной $\Delta R_{эф}$ (а) и наблюдательной $\Delta R_{сгс}$ (б) жесткости обрезания для 6 разноширотных станций КЛ.

Из рассмотрения рисунка 2 можно сделать следующие выводы:

а) Корреляция $\Delta R_{сгс}$ с параметрами СВ и магнитосферы сильно зависит от широты, в то время как для $\Delta R_{эф}$ широтный эффект практически не наблюдается.

б) Коэффициенты корреляции k для наблюдательных $\Delta R_{сгс}$ значительно меньше, чем для модельных $\Delta R_{эф}$.

в) Наиболее тесная связь как для $\Delta R_{эф}$, так и для $\Delta R_{сгс}$ обнаружена с Dst -индексом, для которого k лежит в пределах 0.80–0.95. Кроме того, для $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ видна существенная связь со скоростью СВ V .

г) Некоторая корреляция ΔR с магнитным и электрическим полем (B , Bz и Ey) видна только для $\Delta R_{эф}$.

По-видимому, модель $Ts01$, которая опирается на описание магнитосферных токовых систем, основанное на статистических данных о ~ 70 сильных бурях, недостаточно хорошо отражает пространственную конфигурацию возмущенной магнитосферы во время магнитной бури, в частности зависимости от широты для индивидуальных событий, по крайней мере, для бури 7–8 сентября 2017 г. [6].

3) Корреляции для $\Delta R_{эф}$ на разных фазах (ст. Москва).

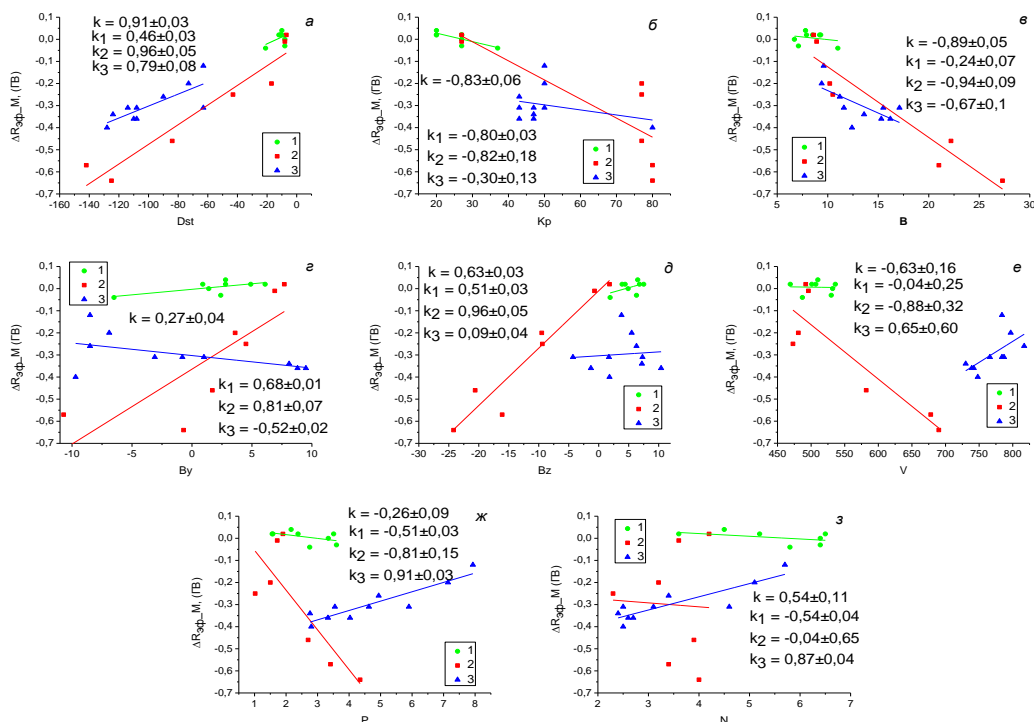


Рисунок 3. Коэффициенты корреляции между $\Delta R_{эф}$ и параметрами геомагнитной активности, ММП и СВ.

В этом параграфе мы провели анализ корреляций ΔR с межпланетными параметрами и индексами геомагнитной активности во время каждой из трех фаз бури — на предварительном этапе (1) (перед бурей — 7 сентября с 11:00 до 18:00 UT), в главной (2) (с 19:00 7 сентября до 01:00 8 сентября) и восстановительной (3) (с 02:00 до 11:00 UT 8 сентября) фазах.

Видно, что ситуация существенно меняется, если рассматривать корреляцию не на масштабе всей бури, а отдельно для разных фаз ее развития. Рисунок 3 демонстрирует, что для большинства панелей корреляционные тренды имеют противоположный знак на разных фазах, из-за чего коэффициент корреляции k на масштабе всей бури может быть очень низким. В частности, на рис. 3ж видно, что давление P , оказывает большое влияние на $\Delta R_{\text{эф}}$ на восстановительной ($k_3=0.91$) и главной ($k_2=-0.81$) фазах, но поскольку корреляция имеет противоположный знак, то для всей бури это влияние отсутствовало. На всех фазах бури Dst существенным образом контролирует вариации $\Delta R_{\text{эф}}$: $k_2=0.94$, и $k_3=0.79$. Это свидетельствует о том, что вариации геомагнитных порогов во время исследуемой очень интенсивной бури контролируются в основном кольцевым током. Кроме Dst наибольший вклад в $\Delta R_{\text{эф}}$ на главной фазе вносит ММП, а именно отрицательная компонента B_z ($k_2=0.96$) и общее поле B ($k_2=-0.94$), а на восстановительной — динамические параметры солнечного ветра P ($k_3=0.91$) и N ($k_3=0.87$). Вопрос о том, какая именно токовая система вносит преимущественный вклад в корреляционные соотношения между ΔR и исследуемыми параметрами в каждом конкретном периоде бури, требует дальнейших исследований.

4. Выводы и заключение

В данной работе двумя независимыми методами рассчитаны геомагнитные пороги $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{гс}}$ в период интенсивной геомагнитной бури 7–8 сентября 2017 г. и проведен анализ зависимости их изменений от параметров межпланетной среды и геомагнитосферы. Наш анализ позволил сделать следующие выводы:

1. Корреляция $\Delta R_{\text{гс}}$ с параметрами СВ и магнитосферы сильно зависит от широты, в то время как для $\Delta R_{\text{эф}}$ широтный эффект практически не наблюдается. Коэффициенты корреляции k для наблюдательных $\Delta R_{\text{гс}}$ значительно меньше, чем для модельных $\Delta R_{\text{эф}}$.

2. Наиболее сильная корреляция наблюдается между ΔR и Dst -индексом геомагнитной активности, что свидетельствует о том, что кольцевой ток играет главную роль в контроле вариаций жесткостей обрезания космических лучей во время этого сильного возмущения.

3. Чувствительность ΔR к динамическим и магнитным параметрам межпланетной среды различна на разных фазах бури и отличается от чувствительности, посчитанной на масштабе всей бури. На главной фазе превалирует влияние ММП, в частности B_z компоненты, а на восстановительной фазе преобладает влияние динамических параметров СВ, а именно, давления P и плотности N .

4. Специфический отклик жесткости геомагнитного обрезания на изменения параметров гелиосферы и магнитосферы на разных фазах магнитной бури, по-видимому, определяется различным относительным вкладом магнитосферных глобальных токовых систем в эти периоды. Различная чувствительность ΔR к параметрам СВ, ММП и геомагнитной активности на разных этапах магнитной бури связана с тем, что во время бури в ответ на изменения параметров СВ и ММП развиваются глобальные токовые системы (кольцевой ток вокруг Земли, токи на магнитопаузе, токи хвоста магнитосферы, токи в высоких широтах), которые эволюционируют во времени. При этом формирование, интенсификация и дальнейший распад этих токовых систем происходит не одномоментно, а на различных временных масштабах.

Знание корреляционных соотношений между вариациями жесткостей обрезания и параметрами СВ и геомагнитной активности во время сильных магнитных возмущений важно для учета последствий «плохой» космической погоды, для космонавтики и для бурно развивающихся в последние 15 лет высокоширотных авиаперевозок.

Литература

1. *Dvornikov V.M. and Sdobnov V.E.* Variations in the rigidity spectrum and anisotropy of cosmic rays at the period of Forbush effect on 12–25 July. // *Int. J. Geomagn. Aeron.* V. 3. No. 3. P. 217–227. 2002.
2. *Тясто М.И., Данилова О.А., Дворников В.М., Сдобнов В.Е.* Отражение параметров солнечного ветра в жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в период сильной магнитной бури в ноябре 2003г. // *Геомагнетизм и аэронавтика.* Т. 48. № 6. С. 723–740. 2008.
3. *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure. // *J. Geophys. Res.* V. 107. No. A8. P. 1179. 2002.
4. *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 2. Parameterization and fitting to observations. // *J. Geophys. Res.* V. 107. No. A8. P. 1176. 2002.
5. *Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C.* Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? // *J. Geophys. Res.* V. 108. No. A5. P. 1209. 2003.
6. *Данилова О.А., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Сдобнов В.Е.* Возмущенная магнитосфера 7–8 ноября 2004 г. и вариации жесткости обрезания космических лучей: широтные эффекты. // *Солнечно-земная физика.* Т. 6. № 3. С. 40–47. 2020.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.026

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ 2D И 3D ПОДХОДОВ К УРАВНЕНИЮ МОДУЛЯЦИИ ГКЛ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

М.С. Калинин, М.Б. Крайнев, А.К. Свиржевская, Н.С. Свиржевский

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия; e-mail: kalininms@lebedev.ru

Абстракт

В работе получено 2D уравнение путём редуцированного по долготе 3D уравнения модуляции для галактических космических лучей, которое, вследствие наличия дрейфового механизма, не сводится к обычному осесимметричному уравнению. В результате сформулировано осесимметричное уравнение со средней по долготе скоростью дрейфа, дополненное слагаемым, имеющим форму источника и пропорциональным дрейфовому коэффициенту.

На примере численного решения 3D уравнения модуляции для галактических протонов делается оценка точности источника 2D уравнения. Проводится обсуждение результатов и перспективы более адекватного учёта в 2D уравнении вклада дрейфов вдоль гелиосферного токового слоя в 3D уравнении.

Введение

Вопрос сравнительного анализа 2D и 3D решений уравнения модуляции (ТРЕ) для случая долгопериодических вариаций, когда решение рассматривается на временах, больших периода солнечного вращения, когда можно использовать средние по долготе за оборот модуляционные параметры, представляет интерес по двум причинам:

- 1) вследствие возможности разделения сложной 3D задачи на более простую с точки зрения решения и анализа 2D уравнения и уравнения первого порядка для трёхмерной добавки, решение которого также проще;
- 2) вторая причина заключается в сравнительной сложности численного решения 3D задачи, требующего большого объёма памяти и расчётного времени (расчётное время 3D задачи как минимум на порядок превосходит время решения 2D задачи). К этому следует добавить малость амплитуды долготных вариаций при коэффициентах ТРЕ не зависящих от долготы.

Всё вышесказанное в сильной степени нивелирует преимущества 3D подходов, когда все механизмы модуляции, включённые в ТРЕ работают «в полную силу».

Несмотря на то, что коэффициенты ТРЕ в 3D модельных задачах описания долгопериодических вариаций не зависят от долготы, вследствие наличия пространственного гелиосферного токового слоя (ГТС) его решение будет зависеть от всех пространственных переменных.

В этой работе приводятся результаты редукции 3D ТРЕ в 2D уравнение в частном случае осесимметричных коэффициентов. Результаты редукции проверяются на примере решения модельного 3D уравнения. Тема редукции 3D ТРЕ в 2D была впервые затронута в работе [1].

1. Уравнение модуляции

3D уравнение модуляции ГКЛ в современном представлении имеет вид [2]:

$$\partial N / \partial t - \nabla \cdot (\mathbf{K}^{(s)} \cdot \nabla N) + (\mathbf{V} + \mathbf{V}_d) \cdot \nabla N - (\nabla \cdot \mathbf{V} / 3) (\partial N / \partial \ln p) = 0, \quad (1)$$

где $N(\mathbf{r}, p, t)$ является дифференциальной плотностью числа частиц с величиной импульса p , а интенсивность частиц $J(\mathbf{r}, T, t) = N(\mathbf{r}, p, t) p^2$, T – кинетическая энергия частиц. Все другие переменные мы определим кратко. $\mathbf{K}^{(s)}$ симметричный тензор диффузии в локальной системе координат (ЛСК) с осью $\mathbf{n}_1 = \pm \mathbf{B} / B$, где \mathbf{B} – вектор напряжённости ГМП, представляется двумя независимыми коэффициентами $K_{11} = K_{\parallel}$, $K_{22} = K_{33} = K_{\perp}$, скорость солнечного ветра (СВ) $\mathbf{V} = V(r, \theta, t) \mathbf{e}_r$, скорость дрейфа $\mathbf{V}_d = [\nabla, \mathfrak{S}(S) K_T \mathbf{n}_1]$, где $\mathfrak{S}(S)$ – знаковая функция, принимающая значение 1 при положительном аргументе и -1 при отрицательном, $K_T = \text{sign}(qA) \cdot (pv / 3qB)$ – дрейфовый коэффициент, $A = \pm 1$ – знак ГМП в северном полушарии гелиосферы, q – её заряд. Аргумент знаковой функции можно взять уравнение поверхности $S(\mathbf{r}, t) = 0$ ГТС, которая в гелиосфере определяет поверхность, на которой ГМП меняет знак. В простейшей модели, получившей название «модель наклонного токового слоя» (НТС) форма ГМП задаётся уравнением

$$\cos \alpha \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta \sin \tilde{\varphi} = 0, \quad \tilde{\varphi} = \varphi - \varphi_0 - \omega \left(t - \frac{r - r_s}{V} \right),$$

ω – угловая скорость солнечного вращения, r_s – радиус поверхности источника гелиосферного магнитного поля ($r_s = 2.5-3$ солнечных радиуса).

В некоторых случаях используется более лаконичная форма записи уравнения (1), особенно удобная при анализе относительных вкладов разных механизмов модуляции ГКЛ:

$$\partial N / \partial t - \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla N) + \mathbf{V} \cdot \nabla N - (\nabla \cdot \mathbf{V} / 3) (\partial N / \partial \ln p) = 0, \quad \mathbf{K} = \mathbf{K}^{(s)} + \mathbf{K}^{(a)}, \quad (1.1)$$

где $\mathbf{K}^{(a)}$ – антисимметричный тензор с ненулевыми компонентами $K_{23} = -K_{32} = K_T$.

Эквивалентность форм (1) и (1.1) следует из известных векторных тождеств

$$-\nabla(\mathbf{K}^{(a)} \nabla N) = \nabla(K_T [\mathbf{n}_1, \nabla N]) = ([\nabla, K_T \mathbf{n}_1], \nabla N) = (\mathbf{V}_d, \nabla N).$$

2. Редуцированное уравнение модуляции

Представив трёхмерное решение в виде

$$N(r, \theta, \varphi, t) = U(r, \theta, t) + u(r, \theta, \varphi, t), \quad \nabla N = \nabla U + \nabla u$$

и усреднив уравнение (1) по полному периоду переменной φ приходим к равенству

$$\partial U / \partial t - \nabla \cdot (\mathbf{K}^{(s)} \cdot \nabla U) + (\mathbf{V} + \mathbf{V}_d^{(a)}) \cdot \nabla U - (\nabla \cdot \mathbf{V} / 3) (\partial U / \partial \ln p) + Q(r, \theta, p, t) = 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{V}_d^{(a)} = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+2\pi} [[\nabla, \mathfrak{S}(S(\mathbf{r}, t)) K_T \mathbf{n}_1] d\varphi] = [\nabla, F K_T \mathbf{n}_1]$ – полная средняя скорость дрейфа, включающая

среднюю скорость дрейфа в ГТС [3,4] $F = (1/2\pi) \int_{\varphi}^{\varphi+2\pi} \mathfrak{S}(S(\mathbf{r}, t)) d\varphi = \frac{2}{\pi} \arctan(\text{ctg} \alpha \text{ctg} \theta)$,

$$\mathfrak{S}(S(\mathbf{r}, t)) = \begin{cases} 1, & S(\mathbf{r}) > 0 \\ 0, & S(\mathbf{r}) = 0, \quad Q(r, \theta, p, t) = \nabla \cdot [K_T \mathbf{n}_1, \mathbf{f}^+], \quad \mathbf{f}_i^+ = \frac{\varphi_1+2\pi}{\varphi_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \nabla_i u d\varphi / \pi, \quad \mathbf{f}_i^- = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \nabla_i u d\varphi / \pi. \\ -1, & S(\mathbf{r}) < 0 \end{cases}$$

К уравнению (2) следует добавить равенство

$$((\mathbf{K}, \nabla N)^+ - (\mathbf{K}, \nabla N)^-, \mathbf{n}_2)_{\varphi_k} = 0, \quad k = 1, 2, \quad (2.1)$$

$\mathbf{K} = \mathbf{K}_S + \mathbf{K}_A$ – полный тензор диффузии, \mathbf{n}_2 – нормаль к поверхности ГТС в точке φ_k . Равенство (2.1) возникает из-за разрывности на ГТС диффузионно – дрейфовых потоков под знаком дивергенции в уравнении 1.1. Наиболее распространённая формулировка равенства (2.1): разность нормальных к ГТС диффузионных потоков в любой точке φ_k равна дрейфовому потоку вдоль ГТС.

$$(\mathbf{K}_S \cdot [(\nabla u)^+ - (\nabla u)^-]) \cdot \mathbf{n}_2 = -2 K_T (\nabla U + (\nabla u)^+ + (\nabla u)^-) \cdot \mathbf{n}_3. \quad (2.2)$$

Выражение (2.1) используется для определения неизвестной функции \mathbf{f}^+ в выражении для источника в уравнении (2). Сложив выражения (2.2) для точек пересечения ГТС 1 и 2 и проинтегрировав по секторам с делением на интервал интегрирования, приходим к уравнению для \mathbf{f}^+ :

$$\mathbf{f}^+ + \eta_i F [\mathbf{n}_1 \times \mathbf{f}^+] = (1 - F^2) \eta_i [\mathbf{n}_1 \times \nabla U], \quad \eta_i = K_T \mathbf{K}_S^{-1}, \quad i = 1 - 3. \quad (2.3)$$

Решение этого уравнения, полученное методом итераций до второго порядка точности, даётся выражением

$$\mathbf{f}^+ = (1 - F^2) \eta_i \{1 - \eta_i F [\mathbf{n}_1, \cdot]\} [\mathbf{n}_1, \nabla U], \quad \mathbf{f}^- = -\mathbf{f}^+. \quad (2.4)$$

В заключении этого раздела отметим, что как исходное равенство (2.1), так и уравнение (2.3) могут быть записаны в эквивалентной форме, если воспользоваться представлением вектора \mathbf{f}^+ , следующем из его определения

$$\mathbf{f}^+ = \nabla \phi + [(u_1 \mathbf{n}_2)_{\varphi_1} + (u_2 \mathbf{n}_2)_{\varphi_2}] |\nabla S|, \quad \phi = \phi(r, \theta, p, t) = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi_2}^{\varphi_1+2\pi} u d\varphi,$$

где u_1 и u_2 значения вариации u на ГТС:

$$\mathbf{f}^+ \cdot \nabla F = (1 - F^2) \eta_i \{[\mathbf{n}_1, \nabla U] \cdot \nabla F + \mathbf{n}_1 \cdot [\nabla, \mathbf{f}^+]\}. \quad (2.5)$$

Уравнением (2.5) мы воспользуемся в следующем разделе при оценке источника $Q(r, \theta, p, t)$.

3. Оценка источника на примере решения 3D уравнения

Знание решения для вектора \mathbf{f}^+ позволяет выразить источник Q в уравнении (2) через усреднённую функцию распределения U и замкнуть уравнение (2). Расписав выражение для источника в виде

$Q = \nabla \cdot (K_T \mathbf{n}_1 \times \mathbf{f}^+) = \mathbf{V}_d^{(r)} \cdot \mathbf{f}^+ - K_T \mathbf{n}_1 \cdot [\nabla, \mathbf{f}^+]$ и, выразив $K_T \mathbf{n}_1 \cdot [\nabla, \mathbf{f}^+]$ из соотношения (2.5), запишем результат в виде: $\mathbf{V}_d^{(r)} \cdot \mathbf{f}^+ + \{K_S^{(ii)} \mathbf{f}^+ - (1 - F^2) K_T [\mathbf{n}_1, \nabla U]\} \cdot \nabla F$. Для наших целей достаточно первого приближения для \mathbf{f}^+ . Тогда

$$Q = (1 - F^2) \eta_i \{ \mathbf{V}_d^{(r)} - \nabla F \cdot (K_S^{(ii)} - K_T) \} [\mathbf{n}_1, \nabla U]. \quad (3.1)$$

Если исходить из определения источника в процедуре усреднения ТРЕ, то $Q' = \langle [\mathbf{V}_d - \mathbf{V}_d^{(a)}] [\nabla N - \nabla U] \rangle_\varphi$, где квадратные скобки обозначают усреднение по долготе. Другой, подходящей для проверки величиной, является $\Pi' = \langle \mathbf{V}_d \nabla N \rangle_\varphi$, которая может сравниваться с величиной $\Pi = Q + \mathbf{V}_d^{(a)} \cdot \nabla U$, где $U = \langle N \rangle_\varphi$. В работе [5] на основе 3D модели, представленной в статье [6] с модифицированным согласно [7] гелиосферным магнитным полем. Обе эти величины сравнивались с их теоретическими значениями на всей расчётной сетке. Поскольку Π' и Π представляют сумму средних скалярных произведений r и θ компонент, которые считались отдельно, то их значения для первой координаты только качественно согласуются друг с другом, для θ – компоненты нет не только количественного, но и качественного согласия.

[Примечание. Вектор \mathbf{f}^+ в работе [5] отличался от содержащегося в выражении (4) и задавался в виде $\mathbf{f}^+ = \sqrt{1 - F^2} \arcsin F \cdot \nabla U$. Это выражение было получено из решения уравнения (2.5) при дополнительном условии $\mathbf{K} \cdot \mathbf{f}^\pm = 0$, где \mathbf{K} – полный тензор диффузии.]

Сравнение выражения для Q , задаваемого в (3.1), с Q' , полученным из решения 3D задачи пока не проводилось вследствие несоответствия величины K_T в (3.1) и соответствующего коэффициента в 3D модели (см. следующий раздел).

4. Обсуждение и заключение

Расхождение вкладов в дрейфы в 2D модели и усреднённом по долготе вкладом 3D модели можно объяснить (возможно частично) тем, что при усреднении уравнения (1) знаковая функция \mathfrak{Z} выбиралась в виде «ступеньки», она скачком изменялась от 1 до -1 и наоборот (см. в разд. 2). При расчётах в 3D модели вследствие конечности ларморовского радиуса R_L дрейф частиц вдоль ГТС начинается на расстоянии $2R_L$ по обе стороны от него, и скорость дрейфа возрастает при приближении к ГТС (на котором \mathfrak{Z} равно нулю). Это придаёт гелиосферному токовому слою конечную толщину, зависящую от жёсткости частиц. Поэтому знаковая функция, стоящая перед дрейфовым коэффициентом K_T и задающая скорость дрейфа в ГТС, $\mathbf{V}_d^{(cs)} = [\nabla \mathfrak{Z}, K_T \mathbf{n}_1]$, выбирается в виде плавной функции $\sim \tanh(x_2 / 2R_L)$, где x_2 – нормальная к ГТС координата. Значит, в полосе шириной $4R_L$ знаковая функция \mathfrak{Z} будет зависеть от долготы, и в левой части равенства (2.1) при усреднении по долготе перед K_T будет стоять множитель $\sim \tanh(x_2 / 2R_L)$, что серьёзно усложняет процедуру усреднения (3.1). Интегрирование по любому сектору даст кроме \mathbf{f}^\pm сумму интегралов:

$$\int_{\varphi_k}^{\varphi'_k} [\tanh(x_2(\varphi) / 2R_L) - 1] (\nabla_i u)^\pm d\varphi + \int_{\varphi_{k+1} - \varphi'_{k+1}}^{\varphi_{k+1}} [\tanh(x_2(\varphi) / 2R_L) - 1] (\nabla_i u)^\pm d\varphi,$$

где φ'_k и φ_{k+1} , $k=1,2$ – значения долгот, при которых $\tanh(x_2(\varphi) / 2R_L)$ принимает значение 1. Каждый из этих интегралов необходимо представить в виде $[C(r, \theta, p) - (\varphi'_k - \varphi_k)] f_i^-$. В 3D моделях интегралы такого рода оцениваются численно в процессе решения, а для наших целей они должны быть известны на этапе усреднения ТРЕ и в данной работе полностью игнорировались.

Отметим также, что более общий случай долготной зависимости коэффициентов ТРЕ, ориентированный на описание 27-дневных вариаций космических лучей, также поддаётся решению в рамках кратко описанного выше формализма. В этом случае усреднение уравнения (1) не может быть проведено точно, однако равенство (2.2) и соответствующее ему после усреднения уравнение (2.5) остаются в силе. Однако параметр $\eta_i = K_T \mathbf{K}_S^{-1}$ теперь должен быть заменён на средние по секторам значения.

Литература

- [1] Kalinin M.S. and Krainev M.B., Geomag. & Aeron., Pleiades Publishing, Ltd. 54, 4, 423, 2014.
- [2] Parker E.N., Planet. Space Sci., 13, 9, 1965.
- [3] Hattingh M. and Burger R.A., Adv. Space Res., 16, 213, 1995.
- [4] Kalinin M.S. and Krainev M.B., Proc. 24th ICRC (Rome), 4, 688, 1995.
- [5] Kalinin M.S., Gvozdevsky B.B., Krainev M.B., et al., On the transition from 3D to 2D transport equations for a study of long-term cosmic-ray intensity variations in the heliosphere. Proc. 37th ICRC (Berlin), 2021, in print.
- [6] Bisschoff D., Potgieter M.S., and Aslam O.P.M., Astrophys. J., 878:59, 2019.
- [7] Smith C.W. and Bieber J.W., Astrophys. J., 370, 435, 1991.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.027

THE FEATURES OF PRECIPITATING ELECTRON SPECTRA IN THE RAYED AURORAS

Zh.V. Dashkevich, V.E. Ivanov, B.V. Kozelov

Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

Abstract. The features of auroral electron fluxes, which form rayed structures in auroras, are investigated. The experimental study was the results of triangulation measurements with equipment recording radiation in a wide wavelength range (380–580 nm). It is shown that the spectra of the precipitating electron flux can be approximated by the sum of two electron fluxes having a power-law energy spectrum and a Maxwellian energy distribution.

Introduction

One of the approaches to studying the mechanisms leading to the formation of structured forms of auroras is to study the energy spectra of precipitating electrons. And, while the nature of the energy spectra of auroral electrons, which cause auroras in the form of arcs and stripes, is well known, the spectral characteristics of the electron fluxes that form particular rayed structures have not been practically studied.

Fast spatial dynamics and fluctuations of auroral rayed structures make them difficult to access for direct research on spacecraft. An alternative approach to the study of rayed structures can be ground-based recording of auroras with simultaneous observation from separated points. Such observations make it possible to obtain height profiles of dissipation energy in auroral structures, the nature of which is determined by the form of the energy spectrum of the precipitating electron flux.

Experimental data

Two identical cameras Guppy-1 and Guppy-2 of the MAIN system recorded auroras in Apatity during the 2011–2020 seasons. [Kozelov *et al.*, 2012]. Distance between cameras 4.12 km, angular resolution 0.038 degrees per pixel. The chambers are equipped with the same glass filters to suppress the red part of the optical spectrum. As a result, the spectral bandwidth of the cameras is limited to the range of 380 - 580 nm.

Eight pairs of images of auroral rayed structures forms were selected for processing. These images are presented in Figure 1. The positions of the magnetic zenith in the images are marked with crosses and connected by dotted lines with the corresponding epipolar line. Solid lines mark the images of the auroral ray.

Auroral intensity

The processing of selected pairs of images using epipolar geometry is described in detail in [Kozelov *et al.*, 2021]. At the first stage, the altitude distribution of the integral intensity along the line of sight of the camera was restored. The obtained altitude profiles were recalculated into the altitude distribution of the volume emission rate using the formula:

$$I_v = \frac{I}{L} = \frac{k_{eff} I_c}{\frac{2d}{\sin v}} = \frac{k_{eff} I_c \sin \left(f \sqrt{x^2 + y^2} \right)}{2d} \quad (1)$$

where: I - surface intensity $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$; I_c - recorded intensity, count s^{-1} ; k_{eff} - effective calibration coefficient, $\text{cm}^{-2} \text{count}^{-1}$; L - the effective length of the path of the line of sight; d - half-width of the cross-section of the auroral ray, cm; v - the angle between the line of sight and the direction to the magnetic zenith; x, y - position of the pixel on the image relative to the projection of the magnetic zenith; $f=0.038$ degrees - angular resolution of cameras.

In formula (1) the effective calibration coefficient k_{eff} determines the relationship between units of the CCD matrix and the value of the surface intensity: $I = k_{eff} I_c$.

When calculating k_{eff} , the spectral components included in the recording range of the device are taken into account. In the general case, it can depend on the parameters of the precipitating electron flux. In [Kozelov *et al.*, 2021], the behavior of k_{eff} was investigated for a wide range of parameters of the precipitating electron flux. It was shown that for Guppy chambers k_{eff} can be considered a constant equal to $9 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{count}^{-1}$.

The obtained height profiles of the volume emission rates for selected eight cases of auroral rayed structures are shown in Fig. 2. The solid and dashed lines correspond to the profiles reconstructed from the data of the Guppy1 and

Guppy2 cameras. As can be seen, the profiles reconstructed from the data of both cameras coincide both in shape and in absolute values with the error not exceeding 10%.

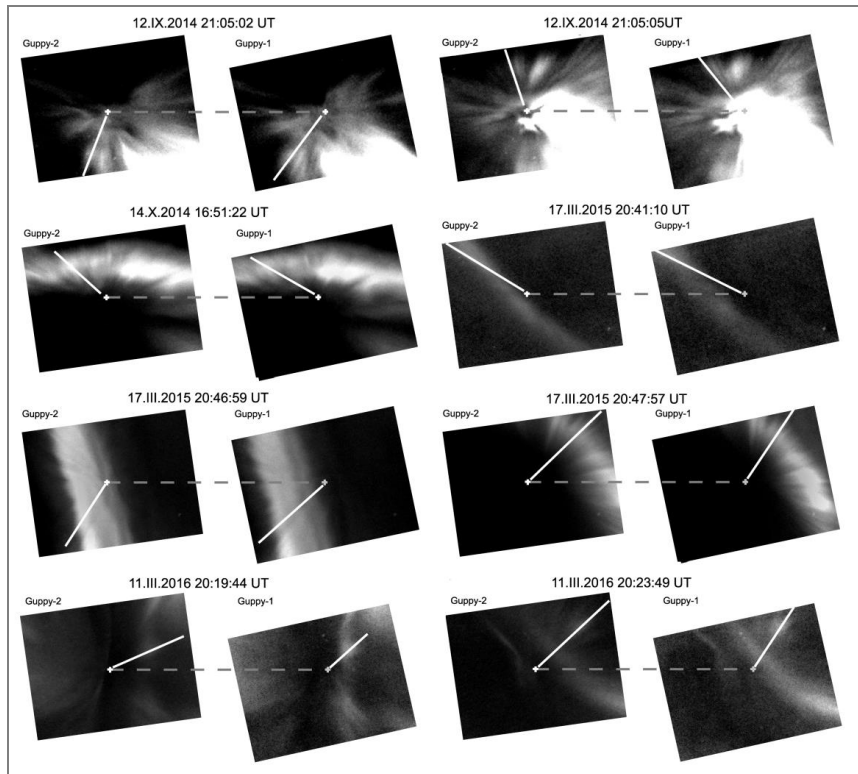


Figure 1. The images recorded by the MAIN cameras for eight cases of rayed forms of auroras.

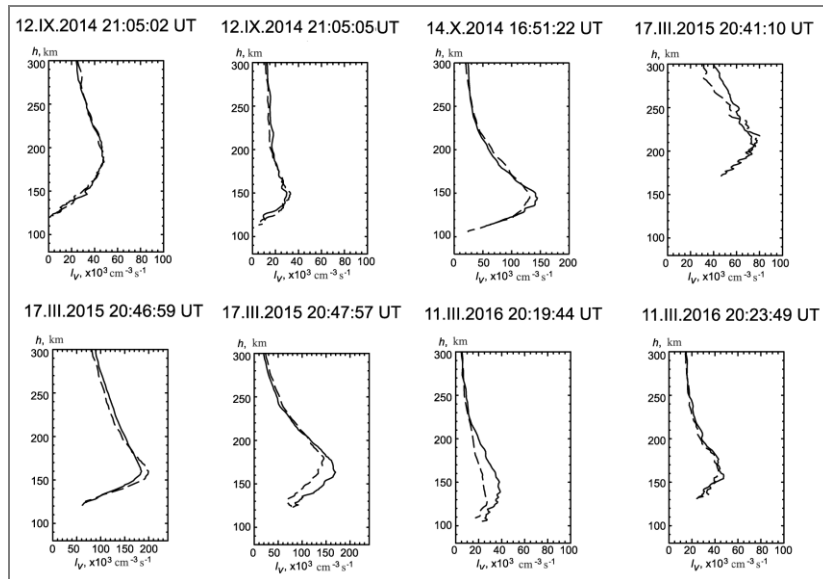


Figure 2. The obtained height profiles of the volume emission rate for eight selected cases of rayed structures.

Estimation of the energy spectra parameters

The energy spectra of flux electric $f(E)$ can be found from the equations for the altitude distribution of the energy released in the atmosphere [Ivanov, Kozelov, 2001]:

$$W(h) = \rho(h) \int \frac{E}{R(E)} \lambda(h, E) f(E) dE, \quad (2)$$

where: $W(h)$ - the deposition energy released at the height h , $\text{erg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; $\rho(h)$ - the density of the atmosphere at a height of h , $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; E - the energy of an electron, eV; $R(E)$ - integral path length, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$; $\lambda(h, E)$ - dimensionless

energy dissipation function describing the fraction of the electron energy released at the height h ; $f(E)$ is the energy spectrum of precipitating electrons, $\text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1} \text{s}^{-1}$.

The relationship between the volume emission rate and the deposition energy released at the height h

$$W(h) = k(h) \cdot I_v(h) \quad (3)$$

where: $W(h)$ is the energy released at height h , $I_v(h)$ is the volume emission rate, $k(h)$ is the coupling coefficient.

Calculations of $k(h)$ carried out in [Dashkevich et al., 2021] showed that $k(h)$ has a very weak dependence on both parameters of energy spectrum of precipitating electrons and the concentration of nitric oxide. Figure 3 shows the height dependence of the coefficient $k(h)$. It also shows the standard deviations of this parameter at several heights. It can be seen that the error for the coefficient $k(h)$ less than 10%. Thus, the use of this coefficient opens up the possibility of using the observations of auroras by cameras with a wide spectral interval to reconstruct the altitude profiles of energy release.

Using formula (3) the height profiles of volume emission rates $I_v(h)$ were transformed into the height profiles of the deposition energy release $W(h)$. In Figure 4 these profiles are shown in the right panel with a thick line. By solving equation (2) with the energy spectra of precipitating electron fluxes were reconstructed. The obtained energy spectra $f(E)$ are shown in Figure 4 on the left panel with a thick line. Two characteristic features can be noted in the behavior of the energy spectrum $f(E)$. In the energy range $E = 500 \div 1000$ eV, a local maximum is observed, while in the energy range $E < 200$ eV the value of the differential electron flux demonstrates a sharp increase with decreasing energy, close to the power-law dependence $E^{-\alpha}$.

This behavior of the $f(E)$ curve allows one to approximate the reconstructed energy spectra by the sum of the following functions:

$$F(E) = N_1 E^{-\alpha} + N_2 E_0 \exp(-E/E_0)/E_0^2, \quad (4)$$

where: E_0 is the characteristic energy.

Figure 4 shows an illustration of the results of approximation of the reconstructed energy spectra by the functional (4) with a thin line. Direct calculations of the deposition energy $W(h)$ using the approximation formula show thin line. These calculated deposition energies demonstrate good agreement with the deposition energies reconstructed from the experimental data (thick line).

Figure 5 shows the partial contributions to the deposition energy $W(h)$ of electron fluxes with a power-law energy spectrum and Maxwellian energy distribution for selected cases of rayed. It can be seen that at altitudes above 250 km the electron fluxes with a power-law energy distribution forms a significant vertical extent of the deposition energy, and, therefore, the vertical extent of rayed structure intensity. This is a fundamental difference from the altitude distribution of deposition energy in quiet arcs and bands of auroras.

Conclusion

Based on the data of triangulation observations, the features of the energy spectra of precipitating electrons $f(E)$, which form rayed structures in auroras, have been reconstructed and studied. Eight events are considered in the work. It is shown that the behavior of $f(E)$ exhibits two characteristic features. In the energy range $E = 500 \div 1000$ eV, local maximum is observed, while in the energy range $E < 200$ eV, a the value of the differential electron flux demonstrates a sharp increase with decreasing energy close to the power-law dependence $E^{-\alpha}$.

It is shown that the obtained distributions $f(E)$ are well approximated by the sum of two functions having a power-law character and a Maxwellian energy distribution.

Reference

1. Dashkevich Zh.V., Ivanov V.E., Kozelov B.V. Studying rayed structures in auroras by triangulation methods: 2. Energy spectra of precipitating electrons // Cosmic Research, V.59. P.307-311. 2021. DOI:10.1134/S0010952521050038
2. Ivanov V.E., Kozelov B.V. Transport of electron and proton-hydrogen fluxes in the Earth atmosphere // Apatity. Kola Science Centre. 2001. 260 p.
3. Kozelov B.V., Dashkevich Zh.V., Ivanov V.E. Study rayed structures in auroras by triangulation methods: 1. Height profiles of volume emission rate // Cosmic Research, V.59. P.223-230. 2021. DOI:10.1134/S0010952521040031
4. Kozelov B.V., Pilgaev S.V., Borovkov L.P., and Yurov V.E. Multi-scale auroral observations in Apatity: winter 2010–2011 // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. V.1. P.1-6. 2012.

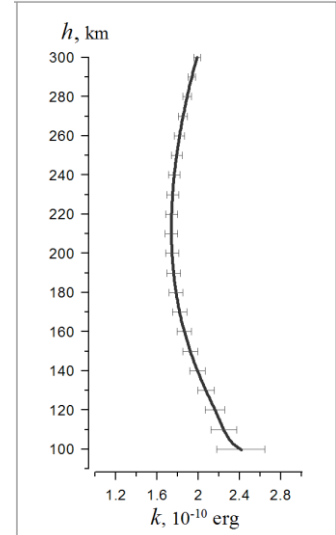


Fig. 3. Height profile $k(h)$

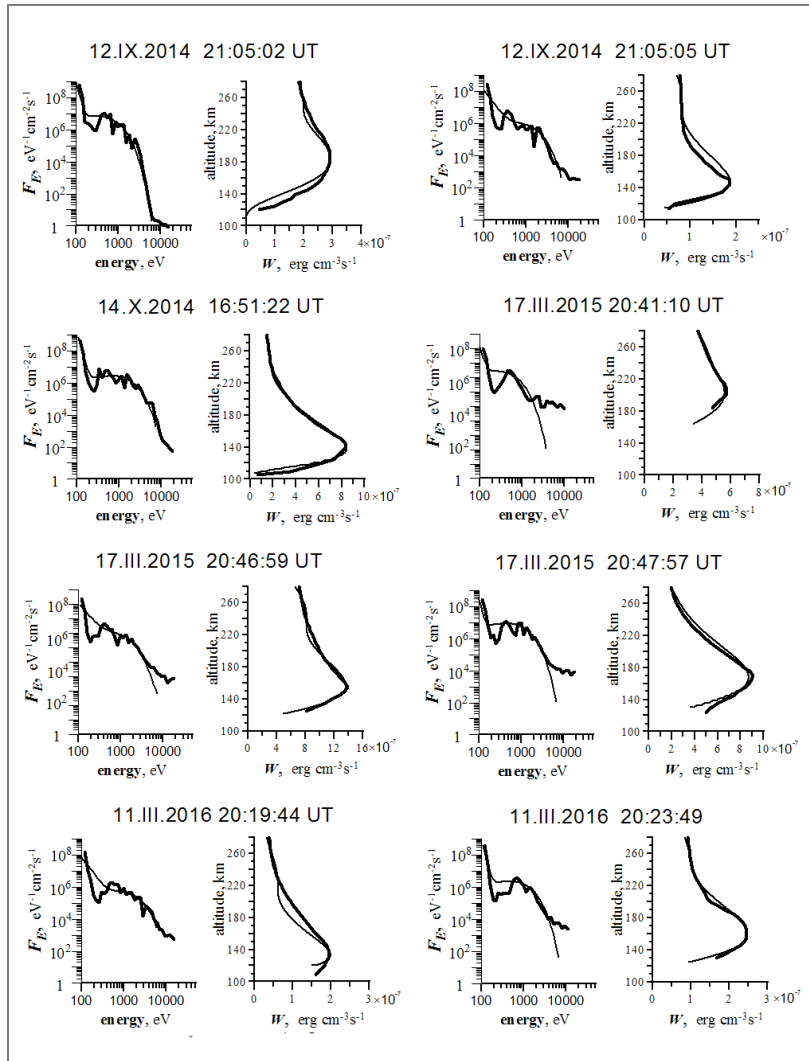


Figure 4. Left panel - reconstructed energy spectra $f(E)$ (thick line), approximation of reconstructed energy spectra by the formula (4) (thin line). Right panel - reconstructed height profiles of the deposition energy $W(h)$ (thick line); calculated altitude profiles $W(h)$ for fluxes described by an approximation formula (4) (thin line).

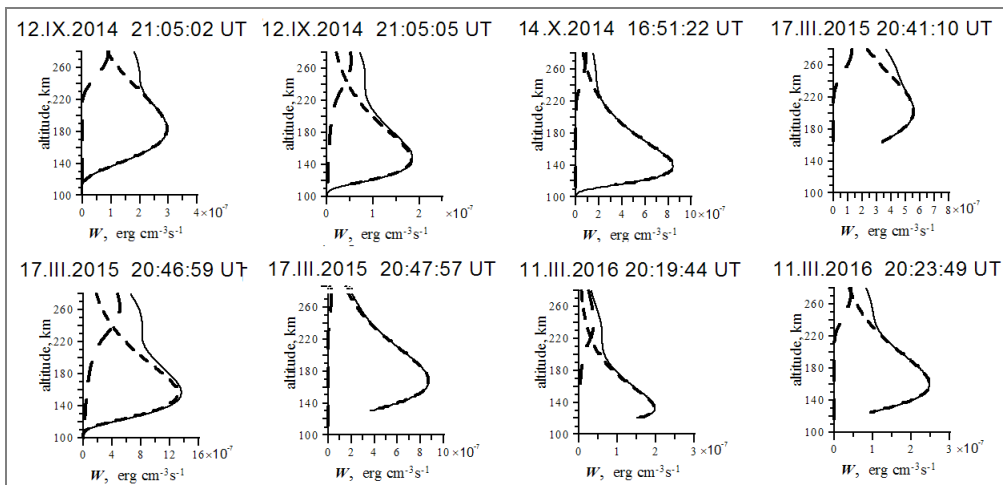


Figure 5. The partial contributions to the height profiles of the deposition energy $W(h)$ (solid line) of the electron fluxes with a Maxwellian energy distribution (shot dashed line) and a power-law distribution (long dashed line).

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.028

THE SIMULATION OF VIBRATIONAL POPULATIONS OF ELECTRONICALLY EXCITED N₂ IN TITAN'S UPPER ATMOSPHERE DURING PRECIPITATIONS OF HIGH-ENERGETIC PARTICLES

A.S. Kirillov¹, R. Werner², V. Guineva²

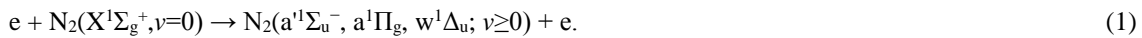
¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Murmansk region, Russia*

²*Space Research and Technology Institute of Bulgarian Academy of Sciences, Stara Zagora, Bulgaria*

Abstract. We study the electronic kinetics of singlet molecular nitrogen in Titan's upper atmosphere during precipitations of high-energetic particles. Both radiative processes and processes of electron excitation energy transfer during inelastic collisions with N₂ and CH₄ molecules were considered in the calculation of vibrational populations of electronically excited singlet states a¹Σ_u⁻, a¹Π_g, w¹Δ_u of molecular nitrogen in the upper atmosphere of Titan. It is shown that the calculated volume emission intensities of the Lyman-Birge-Hopfield bands correlate with the profiles of the ion production rate in the atmosphere of Titan during the considered cases of electron precipitation for considered interval of the energies 30-1000 eV of magnetospheric electrons. This fact is explained by the negligible contribution of collisional processes to the vibrational populations a¹Π_g(v'=0-6) in the considered range of heights above 900 km.

Introduction

Molecular nitrogen N₂ is the major molecular gas in the atmospheres of Titan, Triton and Pluto. The interaction of high-energetic solar UV photons, magnetospheric particles and cosmic rays with atmospheric molecules causes the production of fluxes of free electrons in their atmospheres during processes of ionisation [Campbell and Brunger, 2016]. Produced free electrons excite different singlet states of N₂ in the inelastic collisions:



Spontaneous radiative transitions from the excited state a¹Π_g to the ground state X¹Σ_g⁺ in the nitrogen molecule



cause the emission of the Lyman-Birge-Hopfield (LBH) bands, which are located in the far ultraviolet region (120-200 nm) of the emission spectrum of Titan's atmosphere. Experimental measurements of the emission spectra of the upper atmosphere of Titan [Ajello *et al.*, 2008; Stevens *et al.*, 2011; Ajello *et al.*, 2012; Weat *et al.*, 2012] have shown the presence of Lyman-Birge-Hopfield bands in the far ultraviolet region.

The main aim of this work is to study the main processes related with the kinetics of singlet electronically excited states a¹Σ_u⁻, a¹Π_g, w¹Δ_u of molecular nitrogen in the upper atmosphere of Titan, as well as to calculate the volume and column intensities of the Lyman-Birge-Hopfield bands 146.4, 138.4, 135.4, 132.5 nm of molecular nitrogen during the precipitation of electrons with energies of 30-1000 eV from the magnetosphere of Saturn into the atmosphere of Titan.

The electronic kinetics of singlet electronically excited N₂ in Titan's atmosphere

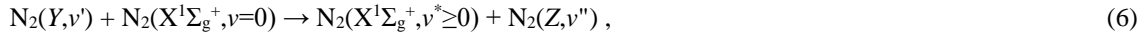
In addition to spontaneous transitions (2) with emission of LBH bands it is also necessary to take into account the emission of infrared bands of two McFarlane (McF) systems [Gilmore *et al.*, 1992]



as well as spontaneous transitions (with the emissions of the Ogawa-Tanaka-Wilkinson-Mulliken (OTWM) bands) [Casassa and Golde, 1979]



When we calculate the vibrational populations of electronically excited singlet states of molecular nitrogen in the atmosphere of Titan at altitudes where the radiative and collisional lifetimes of the states are comparable, it is necessary to take into account both intramolecular and intermolecular processes of the transfer of electronic excitation energy in inelastic molecular collisions with N₂ molecules:



where Y and Z mean any singlet state from the $a^1\Sigma_u^-$, $a^1\Pi_g$, $w^1\Delta_u$ states. The results of the calculation of the quenching constants for different vibrational levels of the singlet states in inelastic interactions with N_2 molecules (5a, 5b, 6) was presented in [Kirillov, 2011a; Kirillov, 2011b] where Landau-Zener and Rosen-Zener quantum chemical approximations were applied.

In addition to the collisions with nitrogen molecules (5a, 5b, 6), it is necessary to take into account the inelastic interaction with CH_4 methane molecules, since the relative concentrations of methane at altitudes in the upper and middle atmosphere of Titan is about 1.5% [Vuitton et al., 2019]. Therefore, when we consider the electronic kinetics of the singlet states, it is necessary to take into account the quenching in collisions with CH_4 molecules



Moreover, as shown by measurements in [Umemoto et al., 2002], the dominant channel of inelastic interaction (7) is the process of dissociation of the CH_4 molecule with the formation of H atoms. In this case, the rates of interaction of singlet molecular nitrogen with methane molecules are close to gas kinetic values. In the calculations, we assume for an even (“gerade”) state the constant $k_7(a^1\Pi_g)=5.2\cdot 10^{-10}$ cm^3s^{-1} , measured in [Marinelli et al., 1989] for $N_2(a^1\Pi_g;v'=0)$, for odd (“ungerade”) states $a^1\Sigma_u^-$ and $w^1\Delta_u$ constants $k_7(a^1\Sigma_u^-)=k_7(w^1\Delta_u)=2.4\cdot 10^{-10}$ cm^3s^{-1} , similarly measured in [Umemoto et al., 2002] for $N_2(a^1\Sigma_u^-,v'=0)$ and consistent with the results of measurements in [Piper, 1987] $3.0\cdot 10^{-10}$ cm^3s^{-1} . Interaction with other small components as H_2 and CO can be neglected, since their concentrations are much lower than the concentrations of methane CH_4 . Moreover, the rates of the interaction of the minor components are less than gas-kinetic values.

The calculation of the emission intensities of the Lyman-Birge-Hopfield bands

To calculate the emission intensities of the Lyman-Birge-Hopfield bands in the Titan’s atmosphere, we apply the solution of the system of equations:

$$Q^Y q_{0v'}^{XY} + \sum_{v''} A_{v''v'}^{aY} N_{v''}^a + \sum_{v''} k_{v''v'}^{*aY} N_{v''}^a [N_2] + \sum_{Z,v''} k_{v''v'}^{**ZY} N_{v''}^Z [N_2] + \sum_{v''} k_{v''v'}^{**aY} N_{v''}^a [N_2] = \left\{ \sum_{v''} A_{v''v'}^{Ya} + A_{v''v'}^{*Y} + \sum_{v''} k_{v''v'}^{*Ya} [N_2] + \sum_{Z,v''} k_{v''v'}^{**YZ} [N_2] + \sum_{v''} k_{v''v'}^{**Ya} [N_2] + 2.8\cdot 10^{-10} [CH_4] \right\} N_{v'}^Y, \quad (8a)$$

$$Q^a q_{0v'}^{Xa} + \sum_{Y,v''} A_{v''v'}^{Ya} N_{v''}^Y + \sum_{Y,v''} k_{v''v'}^{*Ya} N_{v''}^Y [N_2] + \sum_{Y,v''} k_{v''v'}^{**Ya} N_{v''}^Y [N_2] + \sum_{v''} k_{v''v'}^{**aa} N_{v''}^a [N_2] = \left\{ \sum_{Y,v''} A_{v''v'}^{aY} + \sum_{Y,v''} k_{v''v'}^{*aY} [N_2] + \sum_{Y,v''} k_{v''v'}^{**aY} [N_2] + \sum_{v''} k_{v''v'}^{**aa} [N_2] + 5.2\cdot 10^{-10} [CH_4] \right\} N_{v'}^a, \quad (8b)$$

where Y and Z mean the odd states $a^1\Sigma_u^-$ and $w^1\Delta_u$; Q^Y , Q^a are the rates of the excitation of Y , $a^1\Pi_g$ states, respectively; A is the Einstein coefficient for all mentioned spontaneous transitions; k^* and k^{**} mean the rate constants of intramolecular (5a, 5b) and intermolecular (6) energy transfer processes, respectively; $A_{v''v'}^{*Y}$ is equal to the emission probability for transitions with emission of the Ogawa-Tanaka-Wilkinson-Mulliken bands in the case of the $a^1\Sigma_u^-$ state [Casassa and Golde, 1979] and $A_{v''v'}^{*Y}=0$ for the $w^1\Delta_u$ state. In addition, for the lower vibrational level $v'=0$ of the $a^1\Sigma_u^-$ state, it is necessary to take into account the quenching in collisions with N_2 molecules with the formation of the $B^3\Pi_g$ triplet state and the interaction rate constant equal to $2.0\cdot 10^{-13}$ cm^3s^{-1} [Kirillov, 2011b; Umemoto et al., 2002].

The data of the Titan’s ionosphere obtained from the Cassini spacecraft on October 26, 2004 and April 16, 2005 are analyzed in [Cravens et al., 2005; Agren et al., 2007]. The authors of [Cravens et al., 2005; Agren et al., 2007] have presented the rates of ion production in the atmosphere of Titan during the precipitation of electrons from the Saturn’s magnetosphere. We use the data from [Cravens et al., 2005; Agren et al., 2007] for electron energies of 30 eV - 1000 eV. To calculate the rates of the excitation of electronically excited states of molecular nitrogen during the precipitation of high-energy electrons from the magnetosphere of Saturn, we will use the method of degradation spectra of electrons in molecular nitrogen N_2 [Konovalov, 1993].

Figure 1 shows profiles of volume emission intensities of the Lyman-Birge-Hopfield bands at 146.4, 138.4, 135.4, and 132.5 nm calculated according to (8b) for electrons with energies $E=30$ eV and flux $F=7.9\cdot 10^5$ $\text{el}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$. The emission of these four bands is associated with spontaneous radiative transitions (2) $v'=1\rightarrow v''=1$, $v'=2\rightarrow v''=0$, $v'=3\rightarrow v''=0$ and $v'=4\rightarrow v''=0$, respectively. The results of similar calculations for $E=200$ eV, $F=1.3\cdot 10^5$ $\text{el}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ and $E=1000$ eV, $F=2.4\cdot 10^4$ $\text{el}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ are shown in Figures 2 and 3, respectively.

It is seen from the presented figures, the energy losses of electrons precipitating into the Titan's atmosphere are mainly at altitudes above 900 km, where concentrations of molecular nitrogen $[N_2] < 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. Since the radiative lifetimes of all vibrational levels $v'=0-6$ of the $a^1\Pi_g$ state are of the order of 60 microseconds [Gilmore *et al.*, 1992], collisional processes can be neglected at the altitudes of the upper atmosphere of Titan in the calculations of the concentrations $a^1\Pi_g(v'=0-6)$. Similarly, for all the considered levels of the $w^1\Delta_u$ state, the radiative lifetimes are less than 1 millisecond [Gilmore *et al.*, 1992]. Therefore, collisional processes in the considered interval of heights can also be neglected for the $w^1\Delta_u$ state. For the lower two vibrational levels $v'=0,1$ of the $a^1\Sigma_u^-$ state, the radiative lifetimes are of the order of 20 milliseconds [Casassa and Golde, 1979; Gilmore *et al.*, 1992], but the quenching rate constants have low values [Kirillov, 2011a, 2011b]. Therefore, the quenching processes become effective at altitudes less than 800 km, this means for the precipitation of more energetic electrons or other charged particles. It is seen from Figures 1-3, the profiles of volume emission intensities of all four Lyman-Birge-Hopfield bands practically correlate with the profiles of the ion production rate in the atmosphere of Titan for all considered cases of electron precipitation [Cravens *et al.*, 2005; Agren *et al.*, 2007].

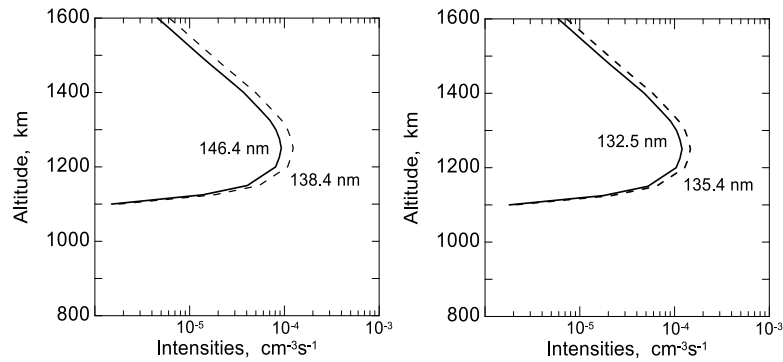


Figure 1. Profiles of volume emission intensities of the Lyman-Birge-Hopfield bands at 146.4, 138.4, 135.4, 132.5 nm calculated according to (8b) for electrons with energies $E=30 \text{ eV}$ and flux $F=7.9 \cdot 10^5 \text{ el/cm}^2 \cdot \text{s}$.

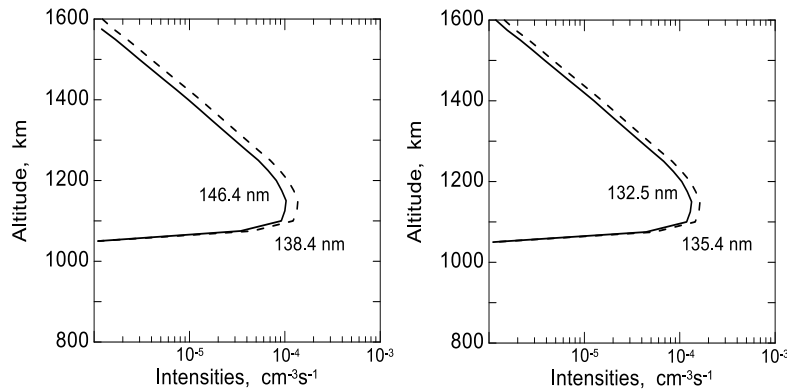


Figure 2. Profiles of volume emission intensities of the Lyman-Birge-Hopfield bands at 146.4, 138.4, 135.4, 132.5 nm calculated according to (8b) for electrons with energies $E=200 \text{ eV}$ and flux $F=1.3 \cdot 10^5 \text{ el/cm}^2 \cdot \text{s}$.

Conclusions

Calculations of the volume and integral emission intensities of the Lyman-Birge-Hopfield bands at 146.4, 138.4, 135.4, and 132.5 nm of molecular nitrogen in the upper atmosphere of Titan during the precipitation of electrons with an energy of 30-1000 eV from the magnetosphere of Saturn have been made. Both radiative processes and processes of electron excitation energy transfer during inelastic collisions with N_2 and CH_4 molecules were considered in the calculation of vibrational populations of electronically excited singlet states $a^1\Sigma_u^-$, $a^1\Pi_g$, $w^1\Delta_u$ of molecular nitrogen in the upper atmosphere of Titan. It is shown that the calculated volume emission intensities of the Lyman-Birge-Hopfield bands correlate with the profiles of the ion production rate in the atmosphere of Titan during the considered cases of electron precipitation [Cravens *et al.*, 2005; Agren *et al.*, 2007] for considered interval of the energies 30-1000 eV of magnetospheric electrons. This fact is explained by the negligible contribution of collisional processes to the vibrational populations $a^1\Pi_g(v'=0-6)$ in the considered range of heights above 900 km.

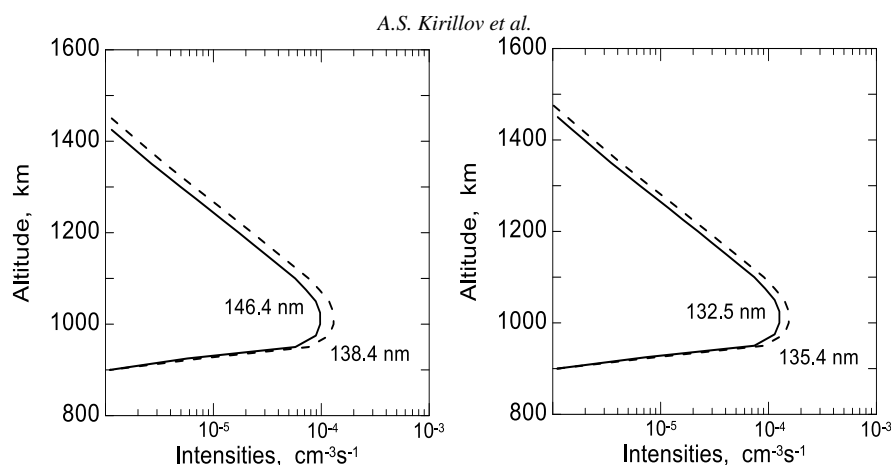


Figure 3. Profiles of volume emission intensities of the Lyman-Birge-Hopfield bands at 146.4, 138.4, 135.4, 132.5 nm calculated according to (8b) for electrons with energies $E=1000$ eV and flux $F=2.4 \cdot 10^4$ el/cm²·s.

References

- Agren K., Wahlund J.-E., Modolo R. et al.** On magnetospheric electron impact ionisation and dynamics in Titan's ram-side and polar ionosphere – a Cassini case study // *Ann. Geophys.*, **2007**, v.25, №11, p.2359-2369.
- Ajello J.M., Gustin J., Stewart I. et al.** Titan airglow spectra from the Cassini Ultraviolet Imaging Spectrograph: FUV disk analysis // *Geophys. Res. Lett.*, **2008**, v.35, №6, L06102.
- Ajello J.M., West R.A., Gustin J. et al.** Cassini UVIS observations of Titan nightglow spectra // *J. Geophys. Res.*, **2012**, v.117, №12, A12315.
- Campbell L., Brunger M.J.** Electron collisions in atmospheres // *Inter. Rev. Phys. Chem.*, **2016**, v.35, №2, p.297-351.
- Casassa M.P., Golde M.P.** Vacuum UV emission by electronically-excited N₂: The radiative lifetime of the N₂(a¹Σ_u⁻) state // *Chem. Phys. Lett.*, **1979**, v.60, №2, p.281-285.
- Cravens T.E., Robertson I.P., Clark J. et al.** Titan's ionosphere: Model comparisons with Cassini Ta data // *Geophys. Res. Lett.*, **2005**, v.32, №12, L12108.
- Gilmore F.R., Laher R.R., Espy P.J.** Franck-Condon factors, r-centroids, electronic transition moments, and Einstein coefficients for many nitrogen and oxygen band systems // *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **1992**, v.21, №5, p.1005-1107.
- Kirillov A.S.** Calculation of the quenching rate constants for electronically excited singlet molecular nitrogen // *Tech. Phys.*, **2011a**, v.56, №12, p.1731-1736
- Kirillov A.S.** Excitation and quenching of ultraviolet nitrogen bands in the mixture of N₂ and O₂ molecules // *J. Quant. Spec. Rad. Trans.*, **2011b**, v.112, №13, p.2164-2174.
- Konovalov V.P.** Degradation electron spectrum in nitrogen, oxygen and air // *Tech. Phys.*, **1993**, v.63, №3, p.23-33.
- Marinelli W.J., Kessler W.J., Green B.D., Blumberg W.A.M.** Quenching of N₂(a¹Π_g, v'=0) by N₂, O₂, CO, CO₂, CH₄, H₂, and Ar // *J. Chem. Phys.*, **1989**, v.90, №4, p.2167-2173.
- Piper L.G.** Quenching rate coefficients for N₂(a¹Σ_u⁻) // *J. Chem. Phys.*, **1987**, v.87, №3, p.1625-1629.
- Stevens M.H., Gustin J., Ajello J.M. et al.** The production of Titan's ultraviolet nitrogen airglow // *J. Geophys. Res.*, **2011**, v.116, №5, A05304.
- Umemoto H., Ozeki R., Ueda M., Oku M.** Reactions of N₂(a¹Σ_u⁻) with H₂, CH₄, and their isotopic variants: Rate constants and the production yields of H(D) atoms // *J. Chem. Phys.*, **2002**, v.117, №12, p.5654-5659.
- Vuitton V., Yelle R.V., Klippenstein S.J. et al.** Simulating the density of organic species in the atmosphere of Titan with a coupled ion-neutral photochemical model // *Icarus*, **2019**, v.324, p.120-197.
- West R.A., Ajello J.M., Stevens M.H. et al.** Titan airglow during eclipse // *Geophys. Res. Lett.*, **2012**, v.39, №18, L18204.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.029

ON THE POSSIBLE ORIGIN OF INTERNAL (2-3 HZ) MODULATION OF PULSATING AURORAS

V. Safargaleev^{1,2}, T. Sergienko³, K. Hosokawa⁴, Y. Ogawa⁵,
Y. Miyoshi⁶, S.-I. Oyama^{6,4}, S. Kurita⁷, R. Fujii⁸

¹Polar Geophysical Institute RAS, Apatity, Russia

²Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, St. Petersburg, Russia

³Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden

⁴University of Electro-Communications, Tokyo, Japan

⁵National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan

⁶Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan

⁷Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Kyoto, Japan

⁸Research Organization of Information and Systems, Toranomon, Minato-ku, Tokyo, Japan

Abstract. Data of three all-sky cameras in Kiruna and Tjautjas (Sweden) were used for estimation of altitude of pulsating arc-like forms and investigation of so-called internal modulation (2-3 Hz) during the ON-phase of a few second pulsations. It is found that for two closely spaced arcs, internal modulation took place only in the lowest arc. Based on this finding, an explanation is proposed due to the pulsations of anomalous resistance in the field-aligned current associated with a pulsating structure apart to the traditional mechanism of particle scattering by VLF waves.

1. Introduction

Pulsating aurora (PsA) is referred to as a kind of diffuse aurora that appears, in general, as irregular patches or more regular arc/segment structures with quasi-periodic on-off switching of its intensity. One of the types of PsA is characterized by a mixture of two distinct periodicities that coexist hierarchically. One periodicity is the “main pulsations” which is the primary periodicity component ranging from a few to a few tens of seconds. The other is the so-called “internal modulation” which is quicker luminosity scintillation (a few Hz) embedded in a single pulse of the main pulsations (Fig.1,b). *Royrvik and Davis (1977)* showed that internal modulation appears in more than 50% of all PsA events.

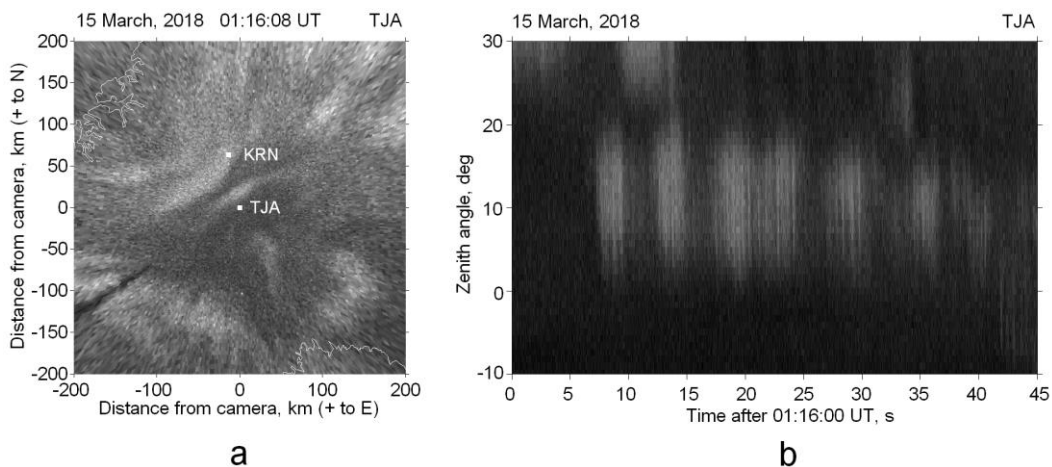


Figure 1. (a) Location of pulsating arc relatively Kiruna (KRN) and Tjautjas (TJA) observatories shown with white squares. (b) keogram showing the temporal variation in auroral brightness sampled along south to north cross section. Series of bright patches reveals the main pulsations, vertical strips inside the patches are the signature of internal modulation.

Pulsating aurora has been studied for decades (see review by *Lessard, 2012*), but its generation and modulation mechanisms are still open issues. The still-existing different approaches to the mechanism of pulsating aurora seem to be conditioned by a lack of *in-situ* observations. Indeed, the rocket and satellite studies represent a case study. Beside of this, it is noteworthy that in many studies there is no direct indication of exactly what auroral form is

under consideration either the difference of pulsating forms is not emphasized. The morphology and nature of different pulsating forms may be different. In this study we focus on the measurements of internal pulsations in the arc-like structure as well as the estimation of the structure altitude with pair of closely-located cameras.

2. Instrumentation and some details of the methods used

The data of three all-sky-cameras were used in this study. The EMCCD all-sky camera in Tjautjas (TJA; 67.31°N, 20.73°E), Sweden, that was installed under the PsA research project and PWING project (e.g. Shiokawa et al., 2017) gives 100 images per second that allow us to detect both the main pulsations and the internal modulation in PsA. Two identical sets of all-sky Watec Monochromatic Imagers (WMI) of National Institute of Polar Research, Japan, installed in Kiruna (KRN; 67.88°N, 20.42°E) and Tjautjas (see Fig.1a) with the north-south base distance ~ 60 km give the images with the time resolution 1s, and therefore pulsating aurora with a period of main pulsations can be targeted to study (Ogawa et al., 2020).

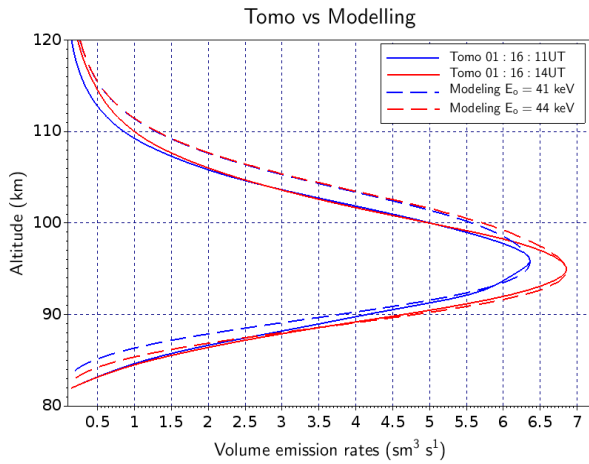


Figure 2. The reconstructed (solid line) and calculated (dashed line) 557.7 emission rate profiles.

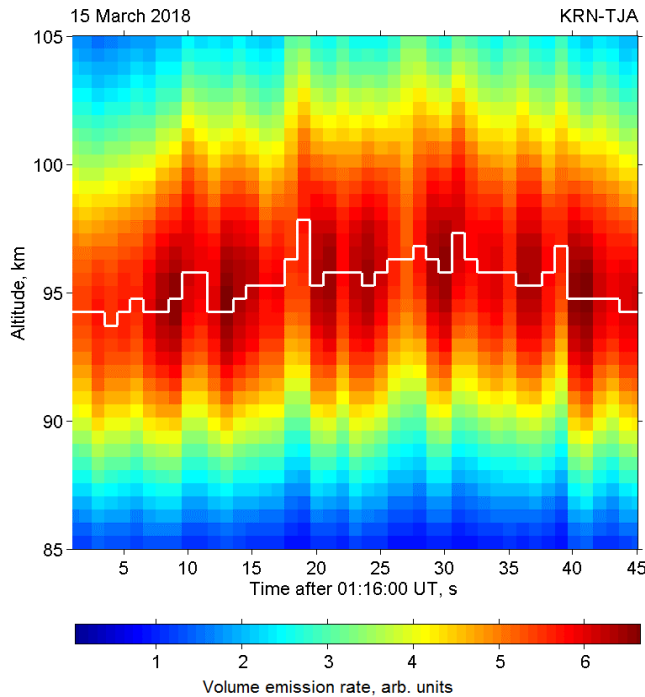


Figure 3. Altitude vs time diagram. White step-like line shows the time variation in the altitude of maximum luminosity.

The images taken with the WMI cameras were used for the reconstruction of the volume distribution of the auroral emissions. Unfortunately, the 557.7 and 670.0 images were oversaturated during the event. Following the results by *Partamies et al.* (2007), we used the green channel images of the color WMI camera for the tomography-like reconstruction of the volume distribution of the auroral emission and hereinafter we refer to this as the 557.7 nm emission distribution. The reconstruction was done with a tomography-like algorithm developed by *Gustavsson* (1998). Looking ahead, we note that for event considered there was no noticeable difference between luminosity altitude profiles inferred from green channel data by the method of tomography by *Gustavsson et al.* (1998) and calculated using the model of the auroral green line by *Ivanov et al.* (1993) (see Fig.2b).

When it was possible, we also performed the comparative analysis of a few Hz luminosity variations (internal modulation) in two neighboring pulsating arcs during the ON phase of the pulsations. For the high-speed camera images, the mean intensities of certain 3x3 pixel areas of the pulsating auroral structures were calculated.

3. Results of observations

The main results of investigations are the following:

(1) Main pulsations and internal modulation represent the localized phenomenon attributed to the arcs.

(2) Altitude of the arc during the ON phases is less than that for OFF phases. By regarding the examined arc as a homogeneous structure, we have found out the following feature of its behaviour (see Figure 3). The “arc altitude”, defined by us as the position of the maximum of luminosity, was less within the switch-on intervals than between them. The altitude changes by 1.5 – 3 km that is larger than the spatial resolution of the method of optical tomography (~ 500 m). To the authors’ knowledge, the earlier observations of PsA showed no indication of changes in height of the lower border during the lifetime of a single pulsation (e.g. *Brown et al.*, 1976). Probably,

this is due to the lower spatial resolution of the triangulation method, which is traditionally used in such investigations. The decrease of arc altitude means that the energy of precipitating particles increases.

(3) Of two closely spaced arcs, internal modulation of luminosity took place only in the lowest arc. The merit of optical tomography is an ability to distinguish the fine structure of auroral arc whereas on ordinary all-sky images it may be masked by neighboring structures. The more careful analysis showed that the structure considered consists actually of two thin arcs, at least, at the beginning of the interval. This allowed us to calculate the variation of luminosity in each arc separately (Fig. 4,b). The comparison with tomographic reconstructions showed that internal modulation appears in that arc of two which altitude is less during the ON phase. Earlier, *Whiter et al.* (2010) showed that the energy of flickering electron precipitation was higher than the energy of the non-flickering auroral electrons.

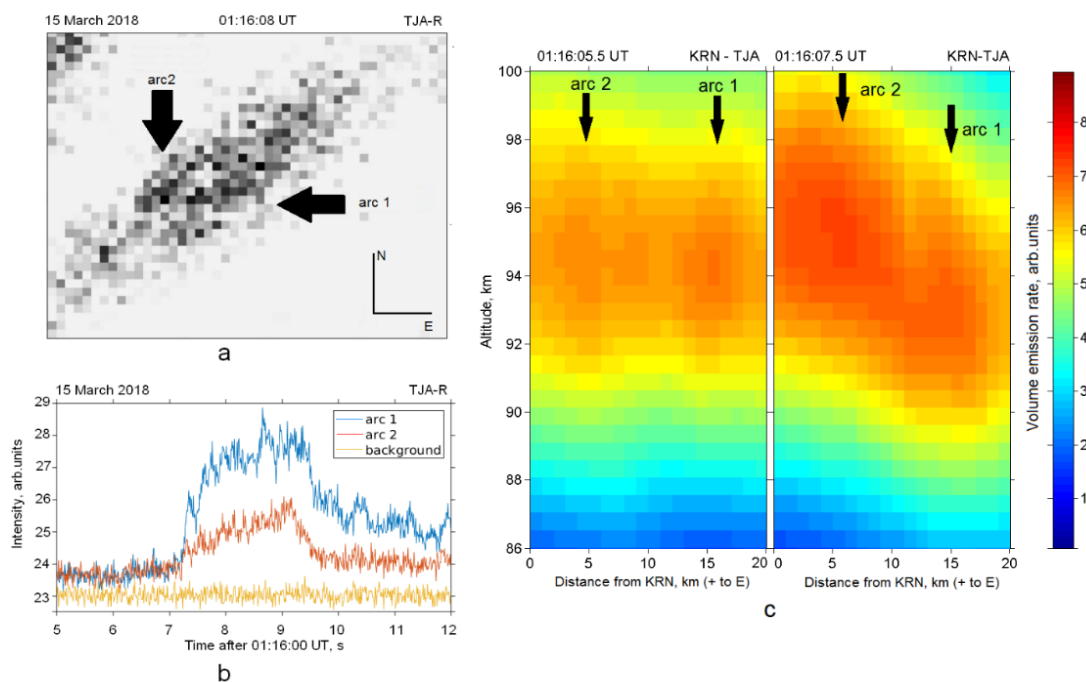


Figure 4. Internal modulation takes place in that arc of two, the altitude of which decreases with the luminosity increase. (a) Fine structure of pulsating arc; (b) luminosity variations in the arcs and background for switch-on interval; (c) altitude distribution of arc luminosity before (left panel) and during (right panel) the ON interval.

4. Interpretation of PsA features in the frame of traditional mechanism

The widely accepted a primary process for the PsA is the pitch angle scattering of electrons at the magnetosphere (e.g. *Lessard, 2012*). An other process without wave-particle interactions has been proposed by *Sato et al.* (2004) who showed that the time variations of the field-aligned potential drop may cause the pulsating aurora. In what follows, for brevity, we will refer to these approaches as scattering and accelerating approaches, respectively.

We have shown that the altitude of the emission is lower during the ON phases of PsA that means that the energy of precipitating electrons is higher at these moments. In the frame of scattering approach, the result can be explained by the model of *Miyoshi et al.* (2015). They demonstrated that PsA during the “on” phase is caused by scattering of electrons due to the lower/upper band chorus. The upper (lower) band resonates with lower (higher) energy electrons. Both the higher and lower energy electrons are detected during the “on” phase whereas only lower energy electron precipitations are seen during the OFF phase. Such a precipitation causes the higher altitude emission.

The internal modulation may be explained in the frame of scattering approach, too. *Hosokawa et al.* (2020) have demonstrated a direct association between the multiscale temporal variations in chorus wave power detected onboard Arase satellite and aurora luminosity inferred from the ground optical measurements. Namely, they showed correlation between chorus bursts and the main optical pulsations, as well as between discrete chorus elements embedded in a burst and internal modulation embedded in an impulse of main pulsations. *Hosokawa et al.* (2020) also noted that the energy of precipitating electrons ranges from a few to several tens keV.

Due to different time-of-flight from the magnetosphere to the ionosphere, significant spreading in time of the electron flux appears. In such a case, the sub-second modulation in chorus tends to be smeared out and ground-based optical instrument does not see the corresponding internal modulation in the PsA emission. If the resonance energy is higher (in our case this means that the corresponding arc is close to the Earth’s surface), the dispersion effect would be smaller and sub-second (internal) modulation is able to survive in the optical data.

5. Periodic acceleration as a possible mechanism for internal modulation

By using the Swarm satellite, Gillies *et al.* (2015) identified upward field-aligned current (FAC) throughout the interior of the PsA (pulsating patches). It is widely assumed that the aurora brightening is due to the increase of the flux of precipitating particles that may mean the increase of FAC. In the course of its increase, the FAC can exceed the threshold of electrostatic ion-cyclotron instability (EIC-instability) due to which the anomalous resistivity appears and yields the field-aligned potential drop (e.g. Papadopoulos, 1977). The potential drop accelerates the precipitating electrons along the magnetic field line due to which the altitude of the corresponding arc decrease during the ON phase. The signatures of electron acceleration were found in FAST satellite data by Sato *et al.* (2004).

Safargaleev (1996) showed that the value of the EIC-instability threshold inside the area where the anomalous resistivity is appearing decreases due to the change of some plasma parameters in the course of instability development. After resistivity appearance, FAC should decrease following Ohm's law. When FAC becomes less than the new threshold, then the anomalous resistivity and potential drop turn off, FAC starts to increase again and the on/off process becomes quasi-periodic. The absence of internal modulation in the upper arc (arc 2 in Figs. 5,6) may simply mean that the arc-related field-aligned current for some reasons does not achieve the threshold value.

In many papers related to pulsating auroras, there is no direct indication of exactly what auroral form is under consideration although the generation mechanisms for pulsating patches and pulsating arcs may be different. In accordance with Sato *et al.* (2015) the applying the field-aligned electric field modulation model to elongated pulsating arcs may be more reasonable than the pitch-angle scattering approach if one takes into account the analogy to ordinary auroral arcs. Ordinary arcs are enhanced via field-aligned electric field accelerations, as is widely accepted due to *in-situ* observations.

Acknowledgments. The work of Japanese co-authors has been supported by JSPS KAKENHI JP 15H05747 and 16H06286. The operation of the EMCCD camera at Tjautjas has been supported by Swedish Institute of Space Physics.

References

- Gillies D.M., Knudsen D., Spanswick E. *et al.*: Swarm observations of field-aligned currents associated with pulsating auroral patches, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 9484–9499, doi:10.1002/2015JA021416, 2015.
- Gustavsson B.: Tomographic inversion for ALIS noise and resolution, *J. Geophys. Res.*, 103 (A11), 26,621–26,632, doi:10.1029/98JA00678, 1998.
- Hosokawa K., Miyoshi Y., Ozaki M. *et al.*: Multiple time-scale beats in aurora: precise orchestration via magnetospheric chorus waves, *Sci. Rep.*, 10, 3380, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59642-8>, 2020.
- Ivanov V.E., Kirillov A. S., Sergienko T., Steen A.: Modelling of the altitude distribution of green line ($\lambda 5577\text{\AA}$) luminosity in aurora, *SPIE*, 105–113, <https://doi.org/10.1117/12.164815>, 1993.
- Lessard M.R.: A review of Pulsating Aurora. *Auroral Phenomenology and Magnetospheric Processes: Earth and Other Planets*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 197, pp. 55–68, <https://doi.org/10.1029/2011GM001187>, 2012.
- Miyoshi Y., Saito S., Seki K., *et al.*: Relation between fine structure of energy spectra for pulsating aurora electrons and frequency spectra of whistler mode chorus waves, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 7728–7736, doi:10.1002/2015JA02156, 2015.
- Ogawa Y., Tanaka Y., Kadokura A., *et al.*: Development of low-cost multi-wavelength imager system for studies of aurora and airglow, *Polar Science*, 23, 100501, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.100501>, 2020.
- Papadopoulos K.: A review of an anomalous resistivity for the ionosphere, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 15, 113–127, doi:10.1029/RG015i001p00113, 1977.
- Partamies N., Syrjäsuo M., Donovan E.: Using colour in auroral imaging, *Canadian Journal of Physics*, 85(2), 101–109, doi:10.1139/p06-090, 2007.
- Royrvik O., Davis T.N.: Pulsating aurora: local and global morphology, *J. Geophys. Res.*, 82 (29), 4720–4740, <https://doi.org/10.1029/JA082i029p04720>, 1977.
- Safargaleev V.: Disturbances in the magnetosphere-ionosphere system, PhD thesis, Saint-Petersburg State University, 12 p, 1996.
- Sato N., Wright D.M., Carlson C.W., *et al.*: Generation region of pulsating aurora obtained simultaneously by the FAST satellite and a Syowa-Iceland conjugate pair of observatories, *J. Geophys. Res.*, 109, A10201, doi:10.1029/2004JA010419, 2004.
- Sato N., Kadokura A., Tanaka Y., *et al.*: Omega band pulsating auroras observed onboard THEMIS spacecraft and on the ground, *J. Geophys. Res.*, 120 (A7), 5524–5544, doi: 10.1002/2015JA021382, 2015.
- Shiokawa K., Katoh Y., Hamaguchi Y.: Ground-based instruments of the PWING project to investigate dynamics of the inner magnetosphere at subauroral latitudes as a part of the ERG-ground coordinated observation network, *Earth Planets Space*, 69, 160, <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0745-9>, 2017.
- Whiter D.K., Lanchester B.S., Gustavsson B., *et al.*: Using multispectral optical observations to identify the acceleration mechanism responsible for flickering aurora, *J. Geophys. Res.*, 115, A12315, <https://doi.org/10.1029/2010JA015805>, 2010.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.030

SEASONAL FEATURES OF THE CORRELATION OF THE TOTAL ELECTRON CONTENT AT MAGNETICALLY CONJUGATE POINTS

A.V. Timchenko^{1,2}, F.S. Bessarab¹, A.V. Radievsky¹

¹*West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Kaliningrad, Russia*

²*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia*

Abstract. The paper presents the results of studies of the seasonal variability of statistical relationships between Magnetoconjugated Points (MCP) of the ionosphere. The analysis is based on the calculation of the correlation coefficients between the variations in the Total Electron Content (TEC) at points located on the same field line of the dipole magnetic field on both sides of the geomagnetic equator. Global TEC maps were used as initial data. For the four seasons of 2009 and 2015, the values of the Pearson's correlation coefficient between the variations in the Total Electron Content in the MCP were calculated. For two levels of solar activity, we examined the seasonal features of statistical relationships between TEC variations at points located on the same field line of the dipole magnetic field on both sides of the geomagnetic equator. Pearson's correlation coefficient was calculated for the mean daily TEC variations. It was shown in the work that during the period of low solar activity, the correlation between the TEC variations in the MCP regions is weak or absent, except for autumn. In 2015, a significant correlation between magnetoconjugated regions is observed during all seasons, while in winter and summer they are localized at low latitudes and in spring and autumn at high and middle latitudes.

Introduction

An important source of information on the state of the ionosphere is the Total Electron Content. The availability of this integral characteristic of the ionosphere for researchers, a large number of receivers providing good spatial coverage, the high temporal resolution of measurements, made TEC a kind of indicator of the state of the ionosphere and a convenient parameter for studying the dynamics of ionospheric processes. To study the response of the Total Electron Content to various disturbing factors, statistical methods are traditionally used, including correlation analysis. The expansion of the network of ground stations of the Global Navigation Satellite System (GNSS), the development of satellite observations made it possible to move from measuring the Total Electron Content in local areas to the construction of Global Ionospheric Maps of TEC (GIM TEC). The use of two-dimensional maps made it possible to move on to the study of large-scale processes in the ionosphere, including the TEC response to disturbances of various nature. In particular, many researchers have considered the features of the ionospheric response to strong earthquakes. For example, Li and Parrot, 2018 showed that the response of the ionosphere to an earthquake is observed not only above its epicenter but also at its conjugate point. Shim Ja, 2009 in his work carried out a study of the correlation between TEC variations at different spatial points on the GIM TEC. Among the many pairs of GIM TEC points, a good correlation was observed in MCP. Shuo L. et al, 2018 considered the local and spatial morphology of daytime TEC variations. They noted the presence of a significant correlation between variations at Magnetoconjugated Points of the equatorial anomaly. Yue et al, 2007 conducted a study of the correlation between diurnal TEC variations and incoherent scatter radar data. One of the results of the study is the conclusion about a significant correlation of variations in the Total Electron Content at high latitudes, which can exceed 0.8 at Magnetoconjugated Points.

It is clear that due to the existing geomagnetic connections between the sources, which determine the daily TEC variability, higher correlation values should be expected in MCP. At the same time, the problem of the variability of this correlation over longer time intervals, in particular, the dependence on the season, remains unexplored.

In this work, we investigated the change in the correlation coefficient between TEC variations at Magnetoconjugated Points for four seasons in 2009 and 2015.

Data and Method

As data we used GIM TEC set on a spatial grid from -87.5° to 87.5° in latitude, with a step of 2.5° and from -180° to 180° in longitude, with a step of 5° , with a time resolution of 1 hour. These maps are available on the IZMIRAN website: <https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/>.

We have selected TEC maps for 2009 and 2015, corresponding to the minimum and maximum levels of 24 solar activity cycles. When analyzing the data for the winters of 2009 and 2015, the data for December 2008 and 2014 were also used, respectively. Data preparation for correlation analysis was as follows. The original GIM TEC data is

generated in a geographic coordinate system, which we have converted to a geomagnetic dipole coordinate system. For each point of the TEC map in the northern geomagnetic hemisphere with coordinates (θ_d, φ_d) , there was a point in the southern geomagnetic hemisphere $(-\theta_d, \varphi_d)$. Here θ_d and φ_d are geomagnetic latitude and longitude, respectively. After that, the obtained coordinates were again converted into a geographic coordinate system. Strictly speaking, not all points selected in this way can be called magnetically conjugated: from their set, those related to open lines of force should be excluded. Nevertheless, "conjugation" in the extended sense can be justified by the symmetry of the geophysical factors perturbing the high-latitude ionosphere in the dipole coordinate system.

The GIM TEC values were averaged to daily values, and then the trend and periodic component were removed from the time series of daily means using window averaging. The window size was 27 days. The Pearson correlation coefficient was calculated between the TEC variations prepared in this way in the Magnetoconjugated Points, and the length of the time series was limited to 30 days, and the series itself was centered on the solstices or equinoxes.

$$\mathbb{R}(\theta, \varphi, \theta_c, \varphi_c) = \frac{\sum_t (TEC_d(\theta, \varphi)_t - \langle TEC_d(\theta, \varphi) \rangle) (TEC_d(\theta_c, \varphi_c)_t - \langle TEC_d(\theta_c, \varphi_c) \rangle)}{\sqrt{\sum_t (TEC_d(\theta, \varphi)_t - \langle TEC_d(\theta, \varphi) \rangle)^2 (TEC_d(\theta_c, \varphi_c)_t - \langle TEC_d(\theta_c, \varphi_c) \rangle)^2}}$$

Where $TEC_d(\theta, \varphi)_t$ and $TEC_d(\theta_c, \varphi_c)_t$ – are values of the average daily TEC in t-day at the point with geographic coordinates (θ, φ) and the magnetoconjugate to it point with coordinates (θ_c, φ_c) .

Results and Discussions

The correlation coefficients in the spatial maps form are shown in Fig. 1. The first four maps correspond to the winter, spring, summer, and autumn seasons of 2009 (a–d), the next four – 2015 (e–h). The maps show the northern hemisphere of the Earth, against the background of which the isolines of the correlation coefficient are plotted, taking values from -1 to 1 . The scale of isolines is selected in such a way that only significant (from 0.75 to 0.9) and strong (more than 0.9) the value of the correlation coefficient.

As it could be seen, in 2009, in all seasons, except for autumn, there are no correlations between the hemispheres. In autumn 2009, a small spatial region appears at polar latitudes with high values of the correlation coefficient. In 2015, areas with significant correlation coefficients are observed during all four seasons. The localization of correlated zones during equinoxes and solstices is different: in winter and summer, areas of significant correlation are located in low and equatorial latitudes, and in spring and autumn in polar and high latitudes. Moreover, in the autumn equinox, areas of high and significant correlation expand to middle and low latitudes.

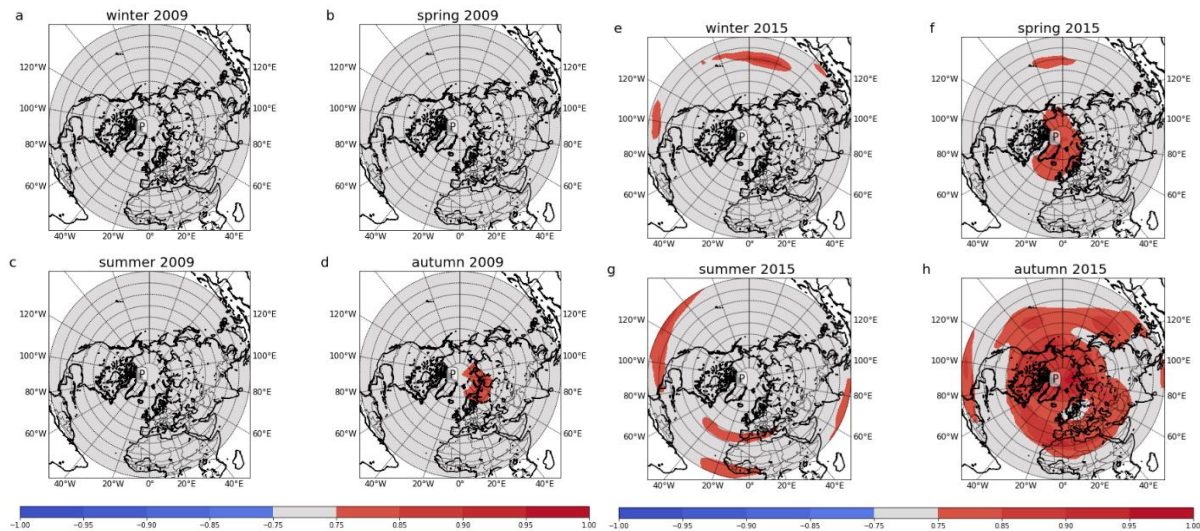


Figure 1. Distribution of the correlation coefficient of magnetoconjugate points for four seasons: winter, spring, summer and autumn 2009 (a-d) and 2015 (e-h), respectively.

Thus, the results of the analysis of TEC variations showed that under the condition of anomalously low geomagnetic activity in 2009, there is no correlation in the ionosphere between the geomagnetic hemispheres, except for the autumn season. On the opposite, high solar activity in 2015 was accompanied by a large number of geophysical disturbances. For example, in March and June 2015, there were very strong geomagnetic storms. A high level of disturbance also led to a significant correlation in MCP of the ionosphere, and during the solstices, TEC variations correlate at low and equatorial latitudes, and at the spring and autumn equinoxes, a significant correlation is manifested at high and circumpolar latitudes.

An important result of the analysis is also a clear predominance of correlations in the autumn period, which took place both in 2009 and 2015. This seasonal asymmetry requires further research.

Conclusion

The paper presents the results of a study of the seasonal variability of correlations in Magnetoconjugated Points of the ionosphere for two levels of solar activity, calculated from the data of the GIM TEC for 2009 and 2015. It is shown that in 2009, which was characterized by anomalously low values of solar and geomagnetic activity, a significant correlation between MCP was observed only in autumn in a limited longitudinal sector of high latitudes. In the case of high solar activity in 2015, areas with high values of interhemispheric correlation are observed in all seasons. At the same time, during the solstice periods, a significant correlation prevails at low and equatorial latitudes, and during the spring and autumn equinoxes — at high and middle (autumn) latitudes. A common pattern for two years is the predominance of a high level of interhemispheric TEC correlation in the autumn season.

Acknowledgments

This investigation was performed with the financial support of the Russian Science Foundation Grant No. 21-17-00208.

References

1. Li M., Parrot M., Statistical analysis of the ionospheric ion density recorded by DEMETER in the epicenter areas of earthquakes as well as in their magnetically conjugate point areas // *Advances in Space Research*, 2018, V. 61, N 3, P. 974-984.
2. Shim, Ja Soon, "Analysis of Total Electron Content (TEC) Variations in the Low- and Middle-Latitude Ionosphere" (2009). All Graduate Theses and Dissertations. 403.
3. Shuo Liu, Jinsong Yang, Tao Yu, Zhiqiang Zhang, Horizontal spatial correlation of the ionospheric TEC derived from GPS global ionospheric maps // *Advances in Space Research*, 2018, V. 62, Is. 7, P. 1775-1786.
4. Yue X., Wan W., Liu L., Mao T., Statistical analysis on spatial correlation of ionospheric day-to-day variability by using GPS and Incoherent Scatter Radar observations // *Ann. Geophys.*, 2007, V. 25, P. 1815–1825, <https://doi.org/10.5194/angeo-25-1815-2007>

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.031

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ИОНОГРАММ CADI: ОБНАРУЖЕНИЕ СЛОЕВ E, ES, F1 И F2

С.А. Долгачева, А.В. Николаев, Л.Н. Макарова

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»,
Санкт-Петербург, Россия
E-mails: dolgachyova2010@yandex.ru, demosfen.spb@gmail.com, lumak@aari.nw.ru

Аннотация. Настоящее исследование является продолжением цикла работ, посвященных внедрению искусственных нейронных сетей в автоматическую обработку высокоширотных ионограмм вертикального зондирования ионосферы. Возможности разработанных ранее нейросетевых моделей были ограничены определением типов Es и F2 ионосферных слоев. К настоящему моменту удалось обучить искусственные нейронные сети различать слои E, Es, F1 и F2, типы слоя Es, тип диффузии слоя F2 (F, P, Q, L) и определять их числовые параметры. Эффективность моделей оценивалась с помощью тестовой выборки, содержащей примерно 60000 ионограмм. Точность определения слоев E, Es, F1, F2 с помощью наиболее эффективной модели в настоящий момент достигает 91%.

Введение

На протяжении последних десятилетий ФГБУ «ААНИИ» ведет непрерывные сетевые геофизические наблюдения, в состав которых входит мониторинг состояния высокоширотной ионосферы. Порядка 75% всех ионограмм, поступающих с 15-минутным разрешением в базу данных Полярного Геофизического Центра (ПГЦ) отдела Геофизики, не обрабатываются наблюдателями и хранятся в исходном виде. Поскольку существующие программы автоматической обработки ионограмм имеют ограниченные возможности и не предоставляют удовлетворительный уровень точности [1, 2], нами были разработаны модели на основе нейронных сетей, способные распознать слои Es и F2 и оценить их параметры [3]. В данной работе к слоям Es и F2 предыдущих версий моделей были добавлены слои E и F1, а также дополнительные характеристики слоев Es (тип слоя - f, l, c, h, r, a) и тип диффузии слоя F2 (F, P, Q, L). Числовые параметры, определяемые улучшенными моделями, следующие: (1) критические частоты обыкновенной волны (f_oE , f_oEs , f_oF1 , f_oF2); (2) минимальные действующие высоты (hE , hEs , $hF1$, $hF2$); (3) наименьшая наблюдаемая частота отражения от ионосферы (f_{min}); (4) экранирующая частота слоя Es (f_bEs); (5) высота максимума слоя Es ($hmEs$); (6) наибольшая частота отражения от области F ($fx1$); (7) предельная частота рассеянной обыкновенной компоненты слоя F ($fo1$); (8) высота и частота для коэффициента M3000 F1 и F2 слоев (M3000f F1, M3000h F1, M3000f F2 и M3000h F2).

Для обучения (тренировки) нейросетей используются результаты ручной обработки ионограмм. Чтобы достичь максимального разнообразия обучающей базы данных, были отобраны ионограммы со всех станций для четырех сезонов при различном уровне геомагнитной активности. Распознавание ионограмм производится с помощью глубоких нейронных сетей [5, 6], решающих задачи классификации (распознавание слоев, типа слоя Es и типа диффузии слоя F2) и регрессии (числовые параметры, высоты и частоты слоев). В текущем исследовании используется сверточная нейронная сеть с тремя слоями свертки и тремя линейными слоями [5]. Более подробная информация о принципах построения моделей и решении задач классификации и регрессии содержится в работе [3].

Обучение моделей и результаты

Обработка ионограммы относится к классической задаче распознавания изображений (задачи компьютерного зрения). Распознавание ионограммы состоит из двух ключевых этапов – выделения признаков из данных и классификации (или регрессии) на их основе. Модели обучались всем классам или всем числовым параметрам сразу, поэтому был собран совокупный обучающий и тестовый набор данных, содержащий примерно одинаковое количество ионограмм всех классов с квазиравномерным распределением по всем определяемым высотам и частотам. Размер тренировочного и тестового наборов составил 283 901 и 60 626 ионограмм соответственно. После обучения и тестирования моделей разных конфигураций были получены три модели с наилучшими показателями точности: (1) глобальная классификационная модель; (2) регрессионная модель для всех параметров и (3) модель классификации типов спорадических слоев Es, с точностью выше, чем у глобальной классификационной модели.

Показатели точности моделей представлены в таблицах 1-3. Для оценки качества классификации на каждом из классов были выбраны следующие метрики: (1) доля правильных ответов «ассигасу» - отношение правильно найденных и не найденных экземпляров класса ко всему объему данных; (2) точность «precision» - отношение правильно найденных экземпляров класса ко всем найденным экземплярам класса; (3) полнота recall - отношение правильно найденных экземпляров класса ко всем имеющимся экземплярам класса. Для оценки качества регрессии выбрана средняя абсолютная ошибка (MAE). В таблице 1 приведены результаты оценки качества распознавания ионограмм глобальной классификационной и регрессионной моделями.

Как было упомянуто выше, обучающий набор данных выбирался таким образом, чтобы значения всех параметров были равномерно распределены. Однако для некоторых типов спорадического слоя (I, h и a), а также типов диффузии слоя F2, набор данных сбалансировать не удалось. Так, например, доля ионограмм с диффузией слоя F2 F-типа составила 9.93%, P типа 0.07%, Q типа 1.27%, L типа 3.91%, при этом 84.82% ионограмм не содержали слоя F2 или диффузии слоя F2. Как видно из таблицы 2, типы диффузии P и Q моделью не обнаруживаются вследствие малого количества ионограмм с таким типом диффузии. В этом случае модель стремится определить отсутствие диффузии слоя F2.

Для несбалансированных наборов данных при обучении модели используются метрики, не зависящие от соотношения классов, например, F-мера, среднее гармоническое precision и recall (максимальное значение 1). Однако использование F-меры при обучении глобальной классификационной модели не помогло добиться удовлетворяющей точности определения типа диффузии слоя F2 и типа слоя Es, поэтому для решения задачи распознавания типа слоя Es была разработана модель с отдельным набором данных, сбалансированным по всем классам. Набор данных для обучения этой модели содержит только ионограммы с наличием Es, около 5000 ионограмм каждого определяемого типа. Тестовый набор данных содержит порядка 3000 ионограмм каждого типа. Результаты оценки качества модели классификации слоя Es приведены в таблице 3, из которой видно, что высокая точность определения чужих классов улучшает показатель ассигасу, но при этом модель стремится все классы определить как чужие. На рисунке 1 приведена матрица распознанных классов тестового набора данных. Что касается слоя F2, на данный момент модель для определения типа его диффузии с удовлетворяющей точностью получить не удалось.

Пример определения слоя и его критической частоты представлен на рисунке 2.

Таблица 1. Точность определения слоев ионосферы и их основных параметров.

Тип слоя	Accuracy %	Precision %	Recall %	F-мера	MAE fo, МГц	MAEh, км	MAE M3000 f, МГц	MAE M3000 h, км
E	88	78	67	0.72	0.39	6.2	–	–
Es	85	90	88	0.89	0.66	8.25	–	–
F1	91	81	65	0.72	0.43	25	0.5	27
F2	89	92	88	0.90	0.4	31	0.4	32

Таблица 2. Точность определения дополнительных параметров ионосферы и типов диффузии слоя F2.

Параметр	MAE	Тип диффузии F2	F-мера
f min, MHz	0.32	отсутствие диффузии	0.95
fb Es, MHz	0.47	F	0.34
foI, MHz	0.27	P	-
fxI, MHz	0.45	Q	-
hm, km	8.5	L	0.05

Таблица 3. Точность определения типа слоя Es.

Метрика \ Тип слоя Es	f	l	c	h	r	a
Accuracy, %	81	77	82	82	81	81
Precision, %	38	38	46	44	43	47
Recall, %	30	48	46	44	43	47
F-мера	0.33	0.43	0.46	0.44	0.43	0.47

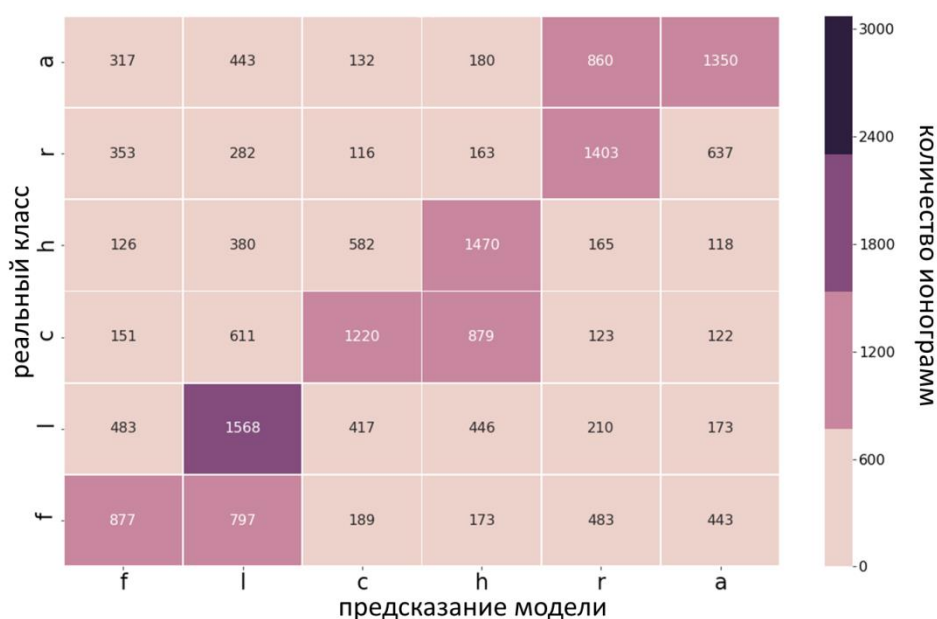


Рисунок 1. Матрица распознанных типов слоя Es на тестовом наборе данных.

Заключение

Автоматическая интерпретация высокоширотных ионограмм является сложной задачей, в отличие от задачи обработки среднеширотных ионограмм. Внедрение искусственных нейронных сетей имеет большой потенциал в вопросе улучшения качества распознавания характерных структур на ионограммах и получения их числовых характеристик. В данной работе приведены результаты обработки 60 626 ионограмм нейросетевыми моделями с расширенными возможностями. Доля правильных ответов (ассигасу) наиболее эффективной модели при определении слоёв E, Es, F1, F2 составляет от 85% до 91%. Метрика качества (F-мера) определения типа слоя Es составляет от 0.33 до 0.47, лучший результат определения типа диффузии F2 слоя – 0.34. В настоящий момент средняя абсолютная ошибка определения разного типа частот составляет от 0.27 до 0.66 МГц; средняя ошибка определения высот E области от 6.2 до 8.5 км, F области от 25 до 32 км.

Благодарности

Работа выполнена в рамках научно-исследовательских работ по теме 6.1 «Развитие и модернизация технологий мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации и Арктики».

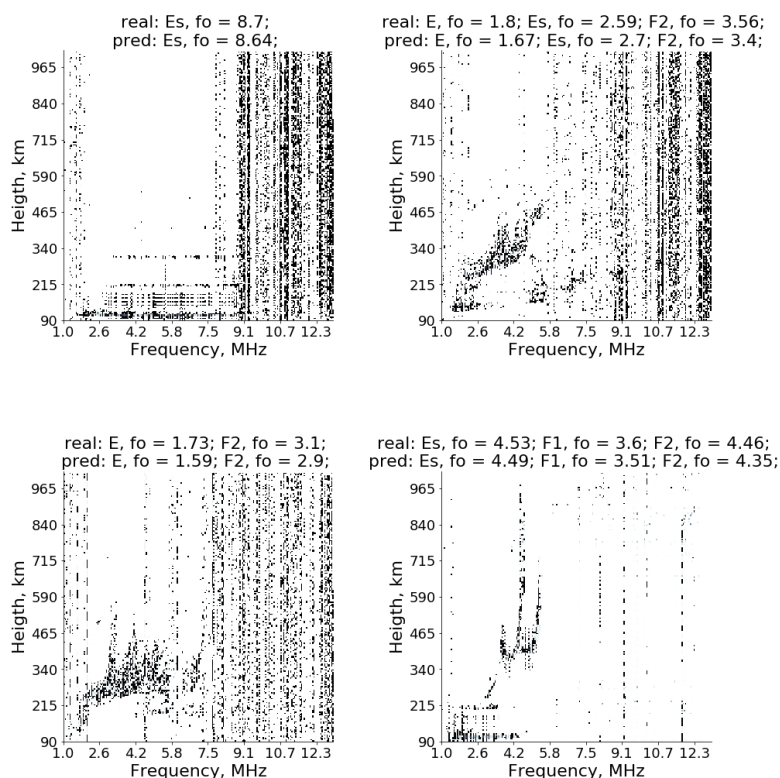


Рисунок 2. Пример распознавания реальной ионограммы: результаты определения слоя и его критической частоты. Real – результаты обработки ионограммы вручную, pred – результат моделей.

Литература

1. Выставной В.М., Макарова Л.Н., Широчков А.В., Егорова Л.В. Исследования высокоширотной ионосферы методом вертикального зондирования с использованием современного цифрового ионозонда cad1. Гелиогеофизические исследования, № 4, С.1–10, 2013.
2. Выставной В.М., Егорова Л.В., Макарова Л.Н., Широчков А.В. Измерения параметров высокоширотной ионосферы методом вертикального зондирования с помощью современного цифрового ионозонда. Мир Измерений, № 10, С. 49–55, 2014.
3. Долгачева С.А., Макарова Л.Н., Николаев А.В. Обработка ионограмм высокоширотных станций вертикального зондирования с использованием нейронных сетей: Es и F2 слои. Physics of Auroral Phenomena, Т. 43, С. 105-108, 2020.
4. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Пер. с англ., Междунар. науч. радиосоюз, Сов. нац. ком., М.: Наука, 1978, 342 с.
5. Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2018, 480 с.
6. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun. Deep Residual Learning for Image Recognition. arXiv:1512.03385, 2015.
7. Pan S.J., Yang Q. A survey on transfer learning. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 22(10), 1345–1359, 2010.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.032

«ТРИ ИСТОЧНИКА – ТРИ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ» ГЕНЕРАЦИИ ТЕРМОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Э.Г. Мирмович, к.ф.-м.н., доцент,

ГБПОУ МО «Колледж «Подмосковье», Москва, Россия; e-mail: mirmovich1940@mail.ru

«На всех высотах в ионосфере дует ветер,
Ионный ветер, нейтральный ветер.
За этот ветер по Союзу я в ответе,
И с ним я за границу вылетал...»
Шутка на сочинской «Школе ионосферы»,
посвящённая д.ф.-м.н., проф. Э. С. Казимировскому

Аннотация

Как альтернатива термину «ионосферно-магнитное возмущение» автором в конце 70-х годов введен и защищён диссертационным исследованием термин «термосферно-ионосферное возмущение». В статье приводятся аргументы в пользу права на его существование как отдельного фундаментального термина в физике ионосферы. Начальные возмущения термосферы могут порождаться различными источниками нарушений регулярной циркуляции и нейтрального состава верхней атмосферы, которые превращаются в возмущения ионосферы солнечным излучением и/или другими источниками ионизации. В период солнечного события термосфера подвергается непосредственному воздействию ультрафиолетовым и рентгеновским солнечным излучением, солнечными космическими лучами и вторжениями в магнитосферу возмущённого солнечного ветра, ответственного за планетарную геомагнитную бурю. Наиболее известным и изученным претендентом на роль генератора термосферно-ионосферных и магнитно-ионосферных (а не ионосферно-магнитных) возмущений в этот период являются три высокоширотных источника: два авроральных электроджета и полярный касп. Именно введением этих источников в соответствующие геомагнитные широты модели верхней атмосферы автор усовершенствовал её, разработал и протестировал для средних широт метод отдельного прогнозирования возмущений области F-ионосферы по корреляционным соотношениям между возмущениями нейтрального состава и оперативными индексами геомагнитной активности. Открытое автором опережение некоторыми типами положительных возмущений ионосферы начала магнитной бури тестировалось по эффекту поглощения в полярной шапке как показателя вторжения заряженных частиц в касп.

Ключевые слова: термосфера, возмущение, термосферное цунами, источник ионизации, ионосферное возмущение, авроральные электроджеты, полярный касп.

1. Введение

Термин «термосферно-ионосферные возмущения» (ТИБ), представляющий собой результат превращения первичных возмущений нейтрального состава верхней атмосферы в ионизационно-рекомбинационном цикле в возмущённое состояние ионосферной частично ионизованной плазмы, был автором введен и защищён диссертацией «Исследование и прогноз термосферно-ионосферных возмущений» в 1981 году [1] как детерминированная альтернатива, вообще говоря, не вполне корректному термину и понятию «ионосферно-магнитные возмущения» (ИМВ), являющемуся обозначением магнитно-ионосферных возмущений (МИВ).

Он был введен автором на основании цикла работ 1973–1981 гг. (например, [2–6]) и подтверждён в [7], где указано, что к МИВ могут быть отнесены не все возмущения ионосферы. Сама идея выделения ТИБ в отдельный объект исследований и прогноза родилась при расчёте и анализе N(h)-профилей и температуры области F по наземным и спутниковым измерениям в рамках комплексного проекта «Исследования в ионосфере при помощи спутника «Космос-378» (17.11.1970 – 17.08.1975 гг.), опубликованной в [8] и отмеченной в соответствующем разделе Википедии статье. Спутниковые данные на высотах $> h_m F_2$ по измерениям зондом Ленгмюра и сферическим зондом В. Афонина показывали неустраняемое аппаратными допусками расхождение с рядом дневных профилей в возмущённых условиях, рассчитанных по ионограммам вертикального зондирования (ВЗИ) и модели IRI для дальневосточных станций, контролирующих широтный пояс $\Delta\phi \sim 55 \div 45^\circ N$.

Однако десятки лет до настоящего времени термин ни у нас, ни за рубежом не был воспринят и использован. Из известных автору работ он был употреблён лишь в работе [9], и то исключительно в её названии, хотя идеи о роли «конкуренции» между собой векторов спокойного и возмущённого термосферного ветра в генерации и развитии МИВ не противоречат идеям автора [1, 10, 11].

Причиной этому явились два аспекта: во-первых, недооценка исследователями термина как продуктивной генетической альтернативы МИВ и применением вместо ТИВ не вполне адекватного термина «термосферно-ионосферное взаимодействие», а во-вторых, автор не сумел донести свою идею до мировой научной общественности через зарубежные издания.

2. Материалы и инструментарий

Материалами для статьи явились более ранние исследования автора, большая часть из которых остаётся актуальной и в настоящее время, хотя и не опубликованных в печати статуса SCOPUS. Инструментарий – авторских и иных источников по термосферно-ионосферным исследованиям. В противоположность некоторым исследователям выделение возмущений термосферы и как следствие ионосферы в отдельный вид явлений, требующий диагностики, исследования и прогнозирования вне численных и аналитических моделей регулярной циркуляции и состава с их сезонными и суточными вариациями. В своих работах автор старался следовать адекватному имитационному моделированию ТИВ, отделив их от регулярного невозмущенного хода параметров термосферно-ионосферной среды. А возврат к теме с задержкой в 40 лет ([1] – 1981) при этом не является уникальным случаем и во всей науке, и в космической и гелиогеофизике. Так, например, с 1926 года весь мир пользуется термином «ионосфера», в то время как защищено его авторство за одним из родоначальников радиолокации Sir Robert Alexander Watson-Watt лишь через 43 года публикацией его письма в журнале Nature. И таких примеров множество.

3. Отличие ТИВ от МИВ

Принципиальное отличие ТИВ от МИВ заключается в том, что «термосферное цунами» в форме нейтральных вихревых, циклональных, солитонных неоднородностей и облаков может иметь локальный характер, другой генезис, в том числе не электромагнитного характера. При ТИВ такого рода, как правило, ничего не происходит с ТЕС средних широт. Это относится, например, к открытой автором квазипериодической структуры дневного хода параметра f_oF_2 среднеширотной ионосферы в спокойное время и исчезающее во время повышения геомагнитной активности, интерпретируемой им в рамках задачи обтекания крупных горных систем масштаба Гималаев, Кордильер и др. ветровыми потоками [12, 13]. Автор считает, что чёткое применение ТИВ как термина будет способствовать развитию (нет, не численной калькуляции системы нарастающего числа уравнений с подгонкой коэффициентами к эмпирическим моделям) понимания динамики и физики возмущений в верхней атмосфере, а, значит, к их детерминированному моделированию и прогнозу. В рамках численных моделей ионосферы, даже лучших из них (например, цикла MSIS – вариант NRLMSISE-00, СибНИГМИ, а также более ранних) описать адекватно физические механизмы ТИВ до прогностического применения невозможно. Это, накатывающееся термосферное «цунами» на $h \leq F$ -области ионосферы от зарождения с инкрементом $tg(t) \geq 1$ до диссипации с запаздывающим релаксационным по эффекту Харстли декрементом «проживает» свою, не очень зависимую от регулярной термосферной циркуляции и стандартных вариаций ионосферы жизнь. А параметр возмущённости нейтрального состава в качестве предиктора задан отдельно лишь в единственной известной автору модели – TIEGCM, и то в виде некоего условного уровня возмущения лишь параметра O_2 , а не типичных для верхней атмосферы, включая экзосферу, O и N_2 и/или хотя бы их соотношения $[O]/[N_2]$.

4. Генератор среднеширотных ТИВ

На основе полуэмпирических моделей нейтральной атмосферы [14] автору удалось сделать ещё в 80-х годах. Основа в модели автора – ввод запаздывания между «включениями» двух источников (электроджетов) в виде входных параметров (предикторов), выраженных заданием $Kp' = Kp(t - \tau)$, где $\tau = 0^d.1 + 0^d.2 \cos \Phi'$, а также индексов aa и угла между векторами скоростей спокойной циркуляции по модели и возмущения. Это позволило понять и интерпретировать известное выражение для времени запаздывания возмущений термосферы из цикла моделей CIRA: $\tau = 7.5 - 0.11/\Phi'$, в которое превращается формула для τ в модели, если положить скорость перемещения возмущения $V' = 300$ м/с и экваториальную границу его затухания $\Phi' = 68^\circ$ на ночной стороне аврорального овала. При таком подходе автором объяснены положительные возмущения ионосферной плазмы, зависимость начала ТИВ от местного времени, т.н. «запрещённое время» начала отрицательной фазы МИВ в местное дневное время; было показано, что через параметры возмущённости нейтрального состава и температуры можно выразить не только δf_oF_2 (параметр, введенный автором в [2]), но и ряд других параметров возмущений ионосферы ($\delta N_m F_2$, $\delta h_m F_2$, δMUF).

Качественная двухуровневая модель циркуляции в виде ветрового переноса дополнительного материала на $h > 200$ км (область F), построенная по модифицированной автором модели верхней атмосферы

введением в неё утреннего и вечернего электроджетов и дневного каспа в качестве источников показывает, что поступает он, «втягиваясь» в область разрежения плотности из низких, а не высоких широт, откуда по уровню < 150 км приходит нейтральный материал в средние широты; адвективный перенос ветром дополнительной концентрации нейтралов приводит к росту N_e воздействием солнечного УФ; мелкие девиации-осцилляции N_e в области F, ответственные за F-рассеяние, объяснены воздействием инфразвука [15] от разных (в т.ч., возможно, и сейсмических) источников. Нет четкой, однозначной связи между подъемом высоты и увеличением электронной концентрации при положительной фазе бури. Этот факт говорит не в пользу объяснения положительной фазы ионосферной бури дрейфовым механизмом. Начальная стадия развития ТИВ, в особенности в летний период сопровождается в утреннее и послеполуденное время возникновением или усилением Es-типа "с". При этом, ему обязательно предшествует кратковременное (15–30 мин.) появление Es типа "h". Это говорит о том, что перенос первоначального импульса возмущения в виде ветрового сдвига происходит на высотах «долины».

Таким образом, основным генератором ТИВ в гелиоактивный период является зарождение и развитие возмущения термосферной циркуляции, отличной от регулярной циркуляции верхней атмосферы в спокойное полярно-авроральное время. Тремя источниками служат вечерний и утренний электроджеты в авроральной зоне как диссипативный результат вторжения потоков заряженных частиц возмущенного солнечного ветра и резкого повышения интегральных частот столкновений на высотах $\sim 10^5$ м и дневной cusp – вихревую воронку на геомагнитных полюсах для мягких электронов и последующие за ним эффекты. Однако остаётся не ясным, почему работа дневного каспа опережает начало активности аврорального овала. В работе [16] было отмечено, что одна из опережающих положительных ионосферных бурь началась почти одновременно с эффектом поглощения в полярной шапке (РСА) за более чем сутки до начала первой суббури, что допускает в качестве её источника непосредственные солнечные космические лучи (СКЛ) с протонами (а не касп). При этом, скорость солнечного ветра $V_{sw} \sim 10^6$ м/с, в то время как частицы всплеска СКЛ перемещаются на два порядка быстрее: $V_{scr} \geq 10^8$ м/с. Не менее интересной кажется возможность повышения содержания электронов на $h \geq h_m F_2$ за счёт прямого воздействия солнечного излучения с длиной волны 50 ± 5 нм и 80 ± 5 нм непосредственно во время вспышки [16], что также может быть источником положительного возмущения в максимуме на дневной стороне.

Кроме того, прогностические резервы эффекта опережения отдельным видом положительных ТИВ начала развития кольцевого тока (Dst-вариаций), всплеска обоих электроджетов (AE и aa-индексы) и всех локальных и планетарных магнитных индексов (k_i и K_p) [17, 18], на взгляд автора, имеют реальные перспективы в совершенствовании прогноза т.н. «космической погоды» и чрезвычайных ситуаций гелиогеофизического характера [19]. Во всяком случае, этот класс возмущений ионосферы во временном отрезке между непосредственными эффектами от вспышки и приходом потока возмущенного солнечного ветра является мало изученным предметом в комплексе солнечно-магнитосферно-ионосферной физики.

5. Заключение

В данной статье не только защищается авторство обсуждаемого термина, но и доказывается научная оправданность его введения для целого класса, если не большинства, возмущений верхней атмосферы. Это актуально хотя бы потому, что до высот $\sim 10^6$ м содержание нейтралов, ответственных за термин «термосфера», превышает концентрацию заряженных частиц (электронов и ионов), ответственных в свою очередь за сам термин «ионосфера» как компоненту верхней атмосферы в форме плазмы. Таким образом, введение в научный обиход специального термина «термосферно-ионосферные возмущения» способствует пониманию физических механизмов ионосферных возмущений и выстраивает или/и корректирует детерминированную цепочку процессов их генерации. Прогноз ионосферных возмущений, которые лучше назвать магнитно-ионосферным возмущением, а не наоборот, можно осуществлять по данным о возмущениях нейтральной компоненты термосферы с привлечением оперативных магнитных данных и минимума данных ВЗИ. Всё это важно не только из-за трудности, а порой невозможности использования на практике громоздких численных моделей. Это по-прежнему актуально в службе мониторинга «космической погоды» для оперативного прогнозирования ионосферных возмущений и бурь, влияющих на дальнейшее распространение коротких радиоволн, а также на многие виды жизнедеятельности на земле и в ближнем космосе, включая работу КА и даже воздействие на баллистику МБР в пассивной части их траектории в период интенсивных именно ТИВ, а не любых МИВ.

Библиографический список

1. Мирмович Э.Г. Исследование и прогноз термосферно-ионосферных возмущений // Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Иркутск: СибИЗМИР. 1981. 23 с.
2. Мирмович Э.Г. К использованию параметра δfoF_2 для оценки ионосферной возмущенности // Исслед. по геомагнетизму, аэрон. и физ. Солнца. М.: "Наука". 1973. вып. 27. С. 165–168.

3. Мирмович Э.Г. Полярный разогрев и детерминированный прогноз среднеширотных термосферно-ионосферных возмущений // Всесоюз. совещ. "Крупномасштабная структура субавроральной ионосферы". Якутск, июнь, 1981 г. Якутск, 1981. С. 15–17.
4. Мирмович Э.Г., Климов Н.Н. Зависимость начала термосферно-ионосферных возмущений от местного времени // II Всесоюз. семинар по ионосферному прогнозированию. Хабаровск, 15–18 сентября, 1981, Хабаровск, 1981. С. 24–26.
5. Климов Н.Н., Мирмович Э.Г. Роль полярной ионосферы в прогнозе среднеширотных возмущений термосферы и ионосферы // II Всесоюз. совещ. по полярной ионосфере и магнитосферно-ионосферным связям. Норильск, апрель, 1980. Иркутск, 1980. С. 14–16.
6. Климов Н.Н., Мирмович Э.Г. О возможности прогноза параметров ионосферной возмущенности на основе характеристик нейтральной атмосферы // Исслед. по геомагнетизму, аэрон. и физ. Солнца. М.: "Наука". 1979. Вып. 47. С. 166–172.
7. Мирмович Э.Г. Термосферно-ионосферные возмущения как отдельный класс возмущений ионосферы // Физика плазмы в солнечной системе. 16-я ежегодная конференция, 8-12 февраля 2021 г. М.: ИКИ. С. 193.
8. Мирмович Э.Г., Шапиро Б.С. Исследования в ионосфере при помощи спутника «Космос-378». N(h)-профили и температура области F по наземным и спутниковым измерениям над Хабаровском // Геомагн. и аэрномия. М.: 1975. Т. 15, № 5. С. 934–936.
9. Захаров И.Г., Мозговая О.Л., Таран В.И., Тырнов О.Ф. Некоторые особенности термосферно-ионосферных возмущений при переходе от спокойных к возмущенным условиям по данным Харьковского радара НР // Космічна наука і технологія. Додаток. № 2. Том 8. 2002. С. 152–158.
10. Мирмович Э.Г. Двухуровневая модель детерминированного прогноза крупномасштабных термосферно-ионосферных возмущений, влияющих на распространение радиоволн // XXV областная НТК, посвященная Дню Радио. 14-16 апреля 1982. Новосибирск, 1982. С. 23–25.
11. Климов Н.Н., Мирмович Э.Г., Повышение точности прогнозов по модели J-77 с источником в овале // Исслед. по геомагнетизму, аэрон. и физ. Солнца. М.: "Наука". 1981. Вып. 55. С. 94–97.
12. Мирмович Э.Г. Квазипериодическая структура дневного хода foF2 // Экспресс-информация ВНИИГМИ-МЦД, метеорология. Обнинск, 1976. Вып. 3(47). С. 14–18.
13. Мирмович Э.Г. О реакции ионосферы на некоторые виды возмущений нейтральной составляющей верхней атмосферы // III Всесоюз. совещ. по исследованию динамических процессов верхней атмосферы. Обнинск, октябрь, 1979. Обнинск, 1979. С. 85–87.
14. Jacchia L.G. Thermospheric temperature, density and composition: new models // Spec. Rept. Smithsonian Astrophys. Observ. 1977. № 375. 106 p.
15. Мирмович Э.Г., Прудников П.Т., Ройхваргер З.Б. Понижение электронной концентрации под воздействием нейтральных волн в ионосфере // Геомагн. и аэрномия. 1978. Т. 18, № 3. С. 535–536.
16. Mirmovich E.G. Ionospheric behavior during August 2-11, 1972 derived from data of ionosphere vertical sounding over Khabarovsk // Report UAG, №28, WDC A, Boulder, USA. 1973. Part II. PP. 557–560.
17. Кринберг И.А., Тащилин А.В., Фридман С.В. О возможной природе «горячей» зоны в плазмосфере Земли // Геомагн. и аэрномия. 1980. Т. 20, № 6. С. 1028–1035.
18. Мирмович Э.Г. Фундаментальность явления опережения начала магнитной бури одним из типов положительных возмущений среднеширотной ионосферы // Физика плазмы в солнечной системе. 16-я ежегодная конференция, 8-12 февраля 2021 г. М.: ИКИ. С. 192.
19. Мирмович Э.Г. Потенциальные источники чрезвычайных ситуаций гелиогеофизического происхождения // Физика плазмы в солнечной системе. 16-я ежегодная конференция, 8-12 февраля 2021 г. М.: ИКИ. С. 279.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.033

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗИ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ И ИНДЕКСОВ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ ПО ОПТИЧЕСКИМ И GNSS ДАННЫМ

С.В. Пильгаев¹, Б.В. Козелов¹, М.В. Филатов¹, Ю.В. Федоренко¹,
А.В. Ларченко¹, А.В. Ролдугин¹, П.А. Будников²

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
"Полярный геофизический институт, Апатиты", Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение
"Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова", Москва, Россия

Аннотация

В декабре 2020 года сотрудники Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова в здании Полярного геофизического института г. Апатиты ввели в эксплуатацию новый GNSS приемник Septentrio PolaRx5S. Среди возможностей данного приемника можно выделить автоматический расчет ПЭС, фазовых и амплитудных индексов сцинтилляций. Так же камеры всего неба Полярного геофизического института работают в месте установки приемника в г. Апатиты и в obs. Ловозеро. Для облегчения целей исследования связи полярных сияний и индексов сцинтилляций реализован интерактивный WEB-интерфейс, позволяющий просматривать в каждый момент времени кадры оптических камер с нанесенными на них положениями GNSS спутников и соответствующими индексами сцинтилляций.

Введение

Неоднородности электронной концентрации в ионосфере могут влиять на прохождение электромагнитных сигналов и вызывать быстрые колебания амплитуды и фазы волны, принятой на Земле. Такие явления называют сцинтилляциями [1]. Первые исследования ионосферных сцинтилляций описаны в [2]. Последующие исследования показали, что явления сцинтилляций наиболее часто происходят в экваториальной и высокоширотной областях [1, 3-10]. Возрастающая активность человека в арктических регионах привела к росту сцинтилляционных исследований, особенно при помощи GNSS (Global Navigation Satellite System) систем [11-19]. Было обнаружено, что фазовые сцинтилляции преобладают над амплитудными в высокоширотных областях [20, 21].

Изучение ионосферных сцинтилляций может помочь в исследованиях неоднородностей ионосферы, поскольку они связаны между собой. Был предложен ряд объяснений возникновения высокоширотных неоднородностей на больших высотах [22-25], которые включают в себя плазменную турбулентность [26, 27], дрейфовые неустойчивости (GDI) [22, 28], неустойчивость Кельвина-Гельмгольца (КНГ) [23, 29], нестабильность температурного градиента [30], тококонвективная неустойчивость (CCI) [31]. Позже в метод GDI был включен эффект CCI, который проявляется, в основном, в области продольных токов [24]. Carlson [32] предложил двухэтапную КНГ-GDI обработку, где КНГ используется для генерации неоднородностей в методе GDI, с целью ускорения процесса обработки. Измерения «на месте» (in situ) имеют решающее значение в оценке темпов роста плазменных неоднородностей [33-36].

Связь между полярными сияниями и сцинтилляциями подтверждена рядом исследований. Jin et al. [16] показали, что сильные сцинтилляции зависят от положения авроральной зоны и связали это с высыпанием частиц. Чаще всего сильные фазовые сцинтилляции в Европейском Арктическом регионе наблюдаются вблизи магнитной полуночи, чем в дневное время [16].

Межпланетное магнитное поле влияет на патчи в полярной шапке от дня к ночи [37-40]. На протяжении полярной ночи движение патчей полярной шапки может быть зафиксировано при помощи камер всего неба [7, 41-46]. Есть несколько исследований, показывающих, как светящиеся патчи выходят из полярной шапки и входят в авроральную зону. Moen et al. [43] показали, что 60% пятен выходят из полярной шапки между 22 и 01 MLT (локальное магнитное время), но полное распределение длится с 18:30 MLT до 04:50. Патчи полярной шапки плазмы F слоя выходят из полярной шапки ночью и возвращаются днем [47, 39, 40].

Когда патчи, которые выходят из полярной шапки, располагаются внутри аврорального овала, они называются авроральными блобами. Несмотря на то, что блобы были изучены более, чем три десятилетия назад [24, 25, 29, 47-50], они получили свое название лишь недавно. Блобы разделены на два типа ВТ-1 и ВТ-2. Первый тип связан с высокоплотной плазмой полярной шапки, которая входит в авроральную зону. Второй связан с плазменными уплотнениями, сгенерированными локальными высыпаниями частиц.

Исследование *C. van der Meeren et al.* [18] утверждает, что самые сильные сцинтилляции были обнаружены в овале полярных сияний в ночное время, когда патч из полярной шапки входит в авроральный овал.

Вышеуказанные исследования подтверждают наличие пространственных корреляций интенсивности фазовых и амплитудных сцинтилляций с оптическими изображениями авроральных эмиссий в высокоширотных областях. Экспериментальные результаты подтверждают необходимость продолжений исследований в различных геомагнитных условиях на основе данных дистанционных измерений распределений интенсивности авроральных эмиссий с помощью оптических приборов одновременно с получением уровней сцинтилляций сигналов глобальных навигационных систем. Для постановки и реализации экспериментов необходимо дальнейшее совершенствование средств диагностики, т.е. орбитального и наземного комплексов аппаратуры на основе современных изображающих детекторов и новых методик [51].

В зимний период в условиях полярной ночи на высокоширотных станциях ПГИ проводятся оптические наблюдения при помощи камер всего неба, в том числе на здании ПГИ, Апатиты. В декабре 2020 года Институт прикладной геофизики имени Е. К. Фёдорова на здании Полярного геофизического института г. Апатиты установил новый современный сцинтилляционный GNSS приемник Septentrio PolaRx5S. Использование спутниковых и оптических приборов в одной точке дает возможность исследовать взаимную корреляцию регистрируемых данных.

Оборудование

Оптическая камера всего неба **ASB** на базе модуля SONY IMX385 IP и GNSS приемник расположены рядом на крыше здания Полярного Геофизического института в г. Апатиты с координатами 67.571N, 33.398E.

Камера всего неба основана на базе модуля SONY IMX385 IP и широкоугольного объектива M12 1,85 мм 1/1.8" «рыбий глаз» 185°. Цветной датчик изображения CMOS IMX385 (1/2" 1945X1097 2,13МП) позволяет получать поток 1920X1080 25/30 кадров в секунду.

Многочастотный малопотребляющий 544 канальный GNSS приемник генерирует данные, содержащие малозумные индексы сцинтилляций, кодовые, фазовые и навигационные нефильтрованные данные с частотой до 100 Гц. Особенностью прибора является предоставление потребителю данных о полном электронном содержании (ПЭС) и индексов сцинтилляций в реальном времени. Проверенная на практике технология Advanced Interference Mitigation (AIM+) компании Septentrio позволяет PolaRx5 отфильтровывать как преднамеренные, так и непреднамеренные источники радиопомех, от узкополосных сигналов по импульсным сигналам высокой мощности до глушителей ЛЧМ-сигналов и источников помех Iridium. Запатентованная Septentrio технология подавления многолучевого распространения (APME+) - уникальная возможность устранения многолучевого распространения с короткой задержкой без внесения смещения - гарантирует превосходное качество измерений. При необходимости пользователь может активировать или деактивировать APME+ для получения полностью неизмененных измерений.

Case study

Для упрощения поиска и отбора случаев корреляции оптических и GNSS данных. был создан WEB интерфейс. Он позволяет в единой шкале времени просматривать данные GNSS приемника и камеры всего неба. На странице изображена суточная кеограмма по данным камеры всего неба. Под ней расположено изображение с индексами фазовых сцинтилляций с таким же временным разрешением.

Для демонстрации работы страницы взяты кадры цветной камеры обс. Ловозеро. В дальнейшем предполагается возможность выбора камеры.

Слева сверху – текущее изображение камеры с нанесенными на изображение спутниками. При увеличении индекса сцинтилляции изменяется цвет и размер изображения спутника увеличивается. Справа сверху - суточная кеограмма. Слева внизу – текущий индекс сцинтилляций. Справа внизу – индекс сцинтилляций за сутки.

Страница интерактивная. При клике мышью на изображении кеограммы или суточных сцинтилляций происходит обновление текущих изображений камеры и индексов сцинтилляций.

В качестве примера, в выделенном красном прямоугольнике показано время, где происходят одновременные флуктуации фазы спутниковых сигналов и сияния, зарегистрированные камерой всего неба.

Заключение

Для облегчения целей исследования связи полярных сияний и индексов сцинтилляций реализован интерактивный WEB-интерфейс, позволяющий просматривать в каждый заданный момент времени кадры оптической камеры с нанесенными на них положениями GNSS спутников и соответствующие индексы сцинтилляций. В настоящее время WEB-интерфейс функционирует в тестовом режиме. Производится накопление данных приборов, отладка и коррекция работы страницы.

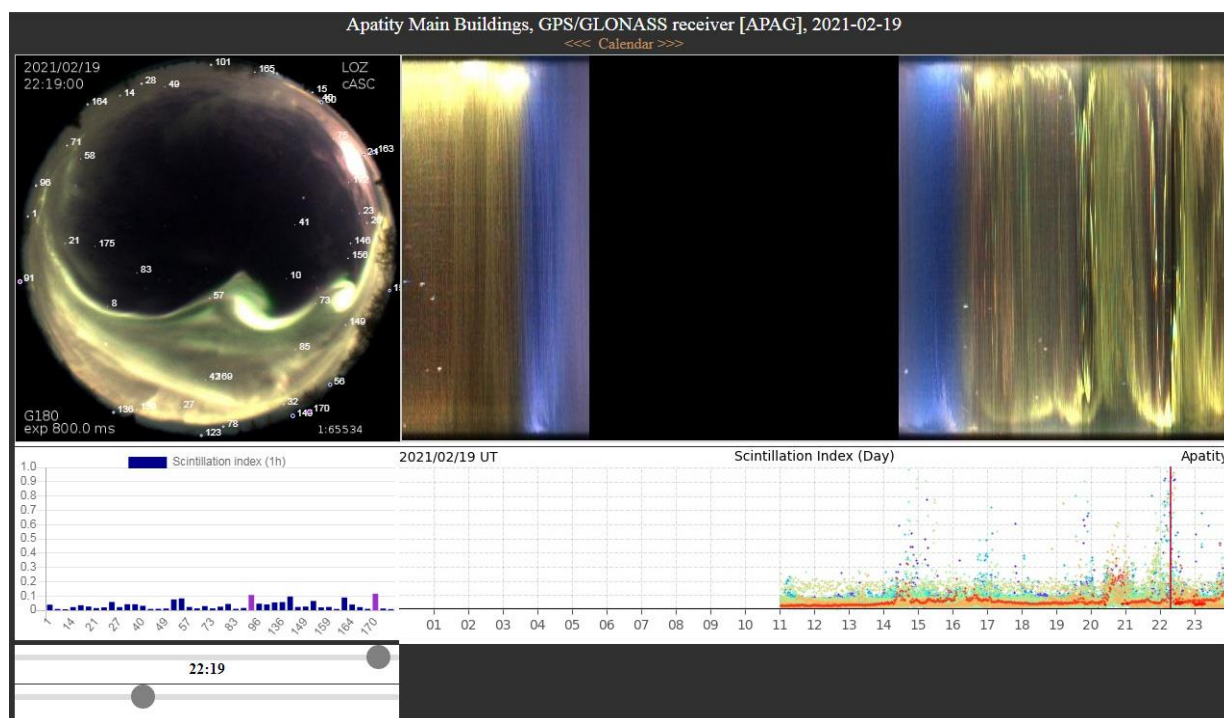


Рисунок 1. Пример страницы событие 19 февраля 2021 с камерой всего неба в obs. Ловозеро.

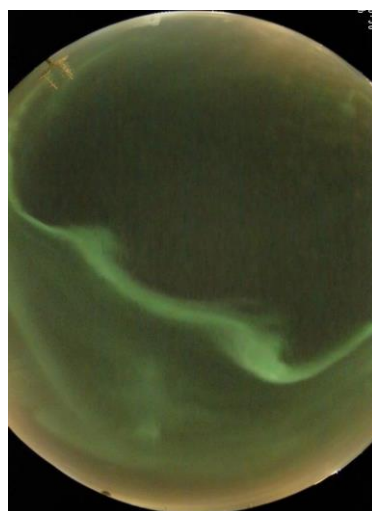


Рисунок 2. Снимок камеры всего неба в г. Апатиты 19 февраля 2021, 22:19.

Литература

1. Yeh K.C., Liu C.-H. (1982). Radio wave scintillations in the ionosphere // *Proc. IEEE*, V. 704, P. 325–378.
2. Hey J.S., Parsons S.J., Phillips J.W. (1946). Fluctuations in cosmic radiation at radiofrequencies // *Nature*, V. 158, P. 234.
3. Fremouw E.J., Leadabrand R.L., Livingston R.C., Cousins M.D., Rino C.L., Fair B.C., Long R.A. (1978). Early results from DNA wideband satellite experiment: Complex-signalscintillation // *Radio Sci.*, V. 13, P. 167–187, doi:10.1029/RS013i001p00167
4. Kelley M.C., Baker K.D., Ulwick J.C., Rino C.L., Baron M.J. (1980). Simultaneous rocket probe, scintillation, and incoherent scatter radar observations of irregularities in the auroral zone ionosphere // *Radio Sci.*, V. 15, P. 491–505, doi:10.1029/RS015i003p00491
5. Aarons J. (1982). Global morphology of ionospheric scintillations // *Proc. IEEE*, V. 70 (Is. 4), P. 360–378.
6. Aarons J., Klobuchar J.A., Whitney H.E., Austen J., Johnson A.L., Rino C.L. (1983). Gigahertz scintillations associated with equatorial patches // *Radio Sci.*, V. 18 (Is. 3), P. 421–434, doi:10.1029/RS018i003p00421

7. Buchau J., Weber E.J., Anderson D.N., Carlson H.C., Moore J.G., Reinisch B.W., Livingston R.C. (1985). Ionospheric structures in the polar-cap — Their origin and relation to 250 Mhz scintillation // *Radio Sci.*, V. 20, P. 325–338, doi:10.1029/RS020i003p00325
8. Basu S., MacKenzie E., Basu S. (1988). Ionospheric constraints on VHF/UHF communications links during solar maximum and minimum periods // *Radio Sci.*, V. 23, P. 363–378, doi:10.1029/RS023i003p00363
9. Basu S., Groves K.M., Basu S., Sultan P.J. (2002). Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: Current status and future plans // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, V. 64 (Is. 16), P. 1745–1754.
10. Basu S., Groves K.M. (2001). Specification and forecasting of outages on satellite communication and navigation systems // in *Space Weather*, edited by P. Song, H.J. Singer, and G.L. Siscoe, AGU, Washington, D.C., doi:10.1029/GM125p0423
11. Mitchell C.N., Alfonsi L., DeFranceschi G., Lester M., Romano V., Wernik A.W. (2005). GPS TEC and scintillation measurements from the polar ionosphere during the October 2003 storm // *Geophys. Res. Lett.*, V. 32, L12S0, doi:10.1029/2004GL021644
12. Prikryl P., Jayachandran P.T., Mushini S.C., Pokhotelov D., MacDougall J.W., Donovan E., Spanswick E., Maurice J.P.S. (2010). GPS TEC, scintillation and cycle slips observed at high latitudes during solar minimum // *Ann. Geophys.*, V. 28 (Is. 6), P. 1307–1316.
13. Moen J., Oksavik K., Alfonsi L., Daabakk Y., Romano V., Spogli L. (2013). Space weather challenges of the polar cap ionosphere // *J. Space Weather Space Clim.*, V. 3, A02, doi:10.1051/swsc/2013025
14. Andalsvik Y.L., Jacobsen K.S. (2014). Observed high-latitude GNSS disturbances during a less-than-minor geomagnetic storm // *Radio Sci.*, V. 49, P. 1277–1288, doi:10.1002/2014RS005418
15. Jin Y., Moen J.I., Miloch W.J. (2014). GPS scintillation effects associated with polar cap patches and substorm auroral activity: Direct comparison // *J. Space Weather Space Clim.*, V. 4, A23, doi:10.1051/swsc/2014019
16. Jin Y., Moen J.I., Miloch W.J. (2015). On the collocation of the cusp aurora and the GPS phase scintillation: A statistical study // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 120, P. 9176–9191, doi:10.1002/2015JA021449
17. van der Meer C., Oksavik K., Lorentzen D., Moen J.I., Romano V. (2014). GPS scintillation and irregularities at the front of an ionization tongue in the nightside polar ionosphere // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 119, P. 8624–8636, doi:10.1002/2014JA020114
18. van der Meer C., Oksavik K., Lorentzen D.A., Rietveld M.T., Clausen L.B.N. (2015). Severe and localized GNSS scintillation at the poleward edge of the nightside auroral oval during intense substorm aurora // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 120, P. 10,607–10,621, doi:10.1002/2015JA021819
19. Oksavik K., van der Meer C., Lorentzen D.A., Baddeley L.J., Moen J. (2015). Scintillation and loss of signal lock from poleward moving auroral forms in the cusp ionosphere // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 120, P. 9161–9175, doi:10.1002/2015JA021528
20. Spogli L., Alfonsi L., De Franceschi G., Romano V., Aquino M.H.O., Dodson A. (2009). Climatology of GPS ionospheric scintillations over high and mid latitude European regions // *Ann. Geophys.*, V. 27 (Is. 9), P. 3429–3437.
21. Prikryl P., Jayachandran P.T., Mushini S.C., Chadwick R. (2011). Climatology of GPS phase scintillation and HF radar backscatter for the high-latitude ionosphere under solar minimum conditions // *Ann. Geophys.*, V. 29 (Is. 2), P. 377–392.
22. Keskinen M.J., Ossakow S.L. (1983). Theories of high-latitude ionospheric irregularities: A review // *Radio Sci.*, V. 18, P. 1077–1091, doi:10.1029/RS018i006p01077
23. Keskinen M.J., Mitchell H.G., Fedder J.A., Satyanarayana P., Zalesak S.T., Huba J.D. (1988). Nonlinear evolution of the Kelvin-Helmholtz instability in the high-latitude ionosphere // *J. Geophys. Res.*, V. 93, P. 137–152, doi:10.1029/JA093iA01p00137
24. Tsunoda R.T. (1988). High-latitude F region irregularities: A review and synthesis // *Rev. Geophys.*, V. 26, P. 719–760, doi:10.1029/RG026i004p00719
25. Kelley M.C., Vickrey J.F., Carlson C.W., Torbert R. (1982). On the origin and spatial extent of high-latitude F region irregularities // *J. Geophys. Res.*, V. 87, P. 4469–4475, doi:10.1029/JA087iA06p04469
26. Huba J.D., Hassam A.B., Schwartz I.B., Keskinen M.J. (1985). Ionospheric turbulence: Interchange instabilities and chaotic fluid behavior // *Geophys. Res. Lett.*, V. 12, P. 65–68, doi:10.1029/GL012i001p00065
27. Kintner P.M., Seyler C.E. (1985). The status of observations and theory of high-latitude ionospheric and magnetospheric plasma turbulence // *Space Sci. Rev.*, V. 41, P. 91–129.
28. Gondarenko N.A., Guzdar P.N. (2004). Plasma patch structuring by the nonlinear evolution of the gradient drift instability in the high-latitude ionosphere // *J. Geophys. Res.*, V. 109, A09301, doi:10.1029/2004JA010504
29. Basu S., Basu S., MacKenzie E., Coley W.R., Sharber J.R., Hoegy W.R. (1990). Plasma structuring by the gradient drift instability at high-latitudes and comparison with velocity shear driven processes // *J. Geophys. Res.*, V. 95, P. 7799–7818, doi:10.1029/JA095iA06p07799
30. Hudson M.K., Kelley M.C. (1976). The temperature gradient drift instability at the equatorward edge of the ionospheric plasma trough // *J. Geophys. Res.*, V. 81, P. 3913–3918, doi:10.1029/JA081i022p03913

31. Ossakow S.L., Chaturvedi P.K. (1979). Current convective instability in the diffuse aurora // *Geophys. Res. Lett.*, V. 6, P. 332–334, doi:10.1029/GL006i004p00332
32. Carlson H.C. (2012). Sharpening our thinking about polar cap ionospheric patch morphology, research, and mitigation techniques // *Radio Sci.*, V. 47, RSOL21, doi:10.1029/2011RS004946
33. Moen J., Walker I.K., Kersley L., Milan S.E. (2002). On the generation of cusp HF backscatter irregularities // *J. Geophys. Res.*, V. 107 (Is. A4), doi:10.1029/2001JA000111
34. Moen J., Oksavik K., Abe T., Lester M., Saito Y., Bekkeng T.A., Jacobsen K.S. (2012). First in-situ measurements of HF radar echoing targets // *Geophys. Res. Lett.*, V. 39, L07104, doi:10.1029/2012GL051407
35. Oksavik K., Moen J., Lester M., Bekkeng T.A., Bekkeng J.K. (2012). In situ measurements of plasma irregularity growth in the cusp ionosphere // *J. Geophys. Res.*, V. 117, A11301, doi:10.1029/2012JA017835
36. Spicher A., Cameron T., Grono E.M., Yakymenko K.N., Buchert S.C., Clausen L.B.N., Knudsen D.J., McWilliams K.A., Moen J.I. (2015). Observation of polar cap patches and calculation of gradient drift instability growth times: A swarm case study // *Geophys. Res. Lett.*, V. 42, P. 201–206, doi:10.1002/2014GL062590
37. Foster J.C., et al. (2005). Multiradar observations of the polar tongue of ionization // *J. Geophys. Res.*, V. 110, A09S31, doi:10.1029/2004JA010928
38. Oksavik K., Barth V.L., Moen J., Lester M. (2010). On the entry and transit of high-density plasma across the polar cap // *J. Geophys. Res.*, V. 115, A12308, doi:10.1029/2010JA015817
39. Zhang Q.H., et al. (2013). Direct observations of the evolution of polar cap ionization patches // *Science*, V. 339 (Is. 6127), P. 1597–1600.
40. Zhang Q.-H., Lockwood M., Foster J.C., Zhang S.-R., Zhang B.-C., McCreary I.W., Moen J., Lester M., Ruohoniemi J.M. (2015). Direct observations of the full Dungey convection cycle in the polar ionosphere for southward interplanetary magnetic field conditions // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 120, P. 4519–4530, doi:10.1002/2015JA021172
41. Weber E.J., Klobuchar J.A., Buchau J., Carlson H.C., Livingston R.C., Delabaujardiere O., McCreedy M., Moore J.G., Bishop G.J. (1986). Polar cap F layer patches: Structure and dynamics // *J. Geophys. Res.*, V. 91, P.12,121–12,129, doi:10.1029/JA091iA11p12121
42. Lorentzen D.A., Shumilov N., Moen J. (2004). Drifting airglow patches in relation to tail reconnection // *Geophys. Res. Lett.*, V. 31, L02806, doi:10.1029/2003GL017785
43. Moen J., Gulbrandsen N., Lorentzen D.A., Carlson H.C. (2007). On the MLT distribution of F region polar cap patches at night // *Geophys. Res. Lett.*, V. 34, L14113, doi:10.1029/2007GL029632
44. Moen J., Hosokawa K., Gulbrandsen N., Clausen L.B.N. (2015). On the symmetry of ionospheric polar cap patch exits around magnetic midnight // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 120, P. 7785–7797, doi:10.1002/2014JA020914
45. Hosokawa K., Shiokawa K., Otsuka Y., Ogawa T., St-Maurice J.P., Sofko G.J., Andre D.A. (2009). Relationship between polar cap patches and field-aligned irregularities as observed with an all-sky airglow imager at Resolute Bay and the PolarDARN radar at Rankin Inlet // *J. Geophys. Res.*, V. 114, A03306, doi:10.1029/2008JA013707
46. Hosokawa K., Moen J.I., Shiokawa K., Otsuka Y. (2011). Decay of polar cap patch // *J. Geophys. Res.*, V. 116, A05306, doi:10.1029/2010JA016297
47. Crowley G., Ridley A.J., Deinst D., Wing S., Knipp D.J., Emery B.A., Foster F., Heelis R., Hairston M., Reinisch B.W. (2000). Transformation of high-latitude ionospheric F region patches into blobs during the March 21, 1990, storm // *J. Geophys. Res.*, V. 105, P. 5215–5230, doi:10.1029/1999JA900357
48. Vickrey J.F., Rino C.L., Potemra T.A. (1980). Chatanika/Triad observations of unstable ionization enhancements in the auroral F-region // *Geophys. Res. Lett.*, V. 7, P. 789–792, doi:10.1029/GL007i010p00789
49. Rino C.L., Livingston R.C., Tsunoda R.T., Robinson R.M., Vickrey J.F., Senior C., Cousins M.D., Owen J., Klobuchar J.A. (1983). Recent studies of the structure and morphology of auroral-zone F region irregularities // *Radio Sci.*, V. 18, P. 1167–1180, doi:10.1029/RS018i006p01167
50. Weber E.J., Tsunoda R.T., Buchau J., Sheehan R.E., Strickland D.J., Whiting W., Moore J.G. (1985). Coordinated measurements of auroral zone plasma enhancements // *J. Geophys. Res.*, V. 90, P. 6497–6513, doi:10.1029/JA090iA07p06497
51. Кузьмин А.К., Мерзлый А.М. (2019). Дистанционная оптическая диагностика состояния полярной ионосферы в различных диапазонах спектра на основе данных наблюдений орбитального аврорального имаджинга. часть 1 (ВУФ-диапазон) // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, Т. 167, № 6, С. 9-41.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.034

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ НАД БАРЕНЦЕВЫМ МОРЕМ

Д.Д. Рогов, П.Е. Барышев, А.С. Калишин, А.В. Николаев, С.В. Новиков, Ю.В. Угрюмов

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия (E-mail: rogovdenis@mail.ru)

Аннотация. В декабре 2019 года в п. Баренцбург (арх. Шпицберген) в тестовом режиме был установлен приемный комплекс наклонного зондирования ионосферы. Данный пункт был включен в общую систему мониторинга условий распространения радиоволн в Российской Арктической зоне, поддерживаемую специалистами отдела геофизики ФГБУ «ААНИИ». Представлены примеры данных и результаты исследования параметров ионосферы и распространения радиоволн над акваторией Баренцева моря в различных геофизических условиях.

Введение

В Арктическом регионе РФ развернута сеть наклонного зондирования в КВ диапазоне частот [Рогов и Выставной, 2014; Рогов и др., 2020; Рогов, 2020а,б] для исследования высокоширотной ионосферы. Мониторинг состояния ионосферы и условий распространения КВ радиоволн над акваторией Баренцева моря осуществляется методом наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) с помощью комплекса НЗИ с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) [Иванов и др., 2003] в Баренцбурге (арх. Шпицберген, 78.07°N 14.23°E).

Сеть наклонного зондирования ионосферы над акваторией Баренцева моря

В приемном пункте Баренцбург проводятся наблюдения на следующих исследовательских российских трассах НЗИ: Горьковская (GRK) – Баренцбург (2050 км), Ловозеро (LOZ) – Баренцбург (1290 км), Амдерма (AMD) – Баренцбург (1660 км), Салехард (SAH) – Баренцбург (2070 км) и Диксон (DIK) – Баренцбург (1770 км), а также на 2х зарубежных трассах: о. Кипр (CP1) – Баренцбург (4890 км) и Соданкюля (SOD) – Баренцбург (1280 км) - рисунок 1. Внешний вид комплекса представлен на рисунке 2, примеры ионограмм НЗИ, получаемых на данных трассах, показаны на рисунке 3.

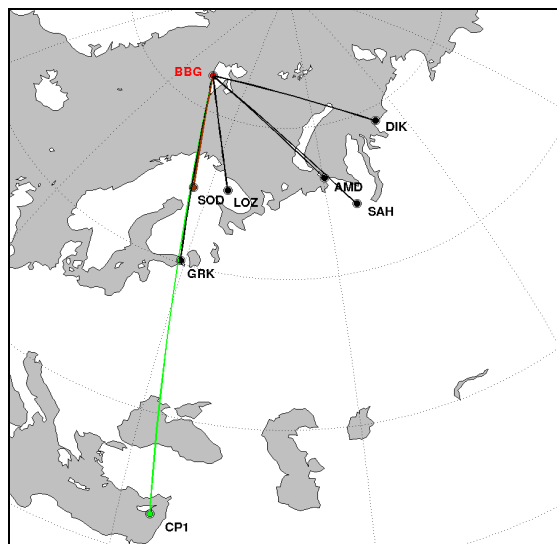


Рисунок 1. Трассы наклонного зондирования ионосферы (прием в Баренцбурге).

Мониторинг условий распространения КВ радиоволн

Для определения параметров распространения радиоволн, условий КВ радиосвязи и режимов работы других КВ радиотехнических средств (например, загоризонтная радиолокация) были разработаны алгоритмы автоматической обработки ионограмм (очистка от помех и выделение полезных сигналов); определения максимальных (МНЧ) и наименьших (ННЧ) наблюдаемых частот отдельно для отражений от F- и E-

областей ионосферы; разделения отражений от E-слоя и Es-слоя ионосферы [Рогов, 2020б]. Данные приемного пункта Баренцбург включены в общую систему мониторинга условий распространения радиоволн в Российской Арктической зоне (условия многолучевости и вероятность радиосвязи на различных частотах ДКМ (КВ) диапазона), разрабатываемую в отделе геофизики ФГБУ «ААНИИ».



Рисунок 2. Приемный комплекс наклонного зондирования ионосферы в Баренцбурге.

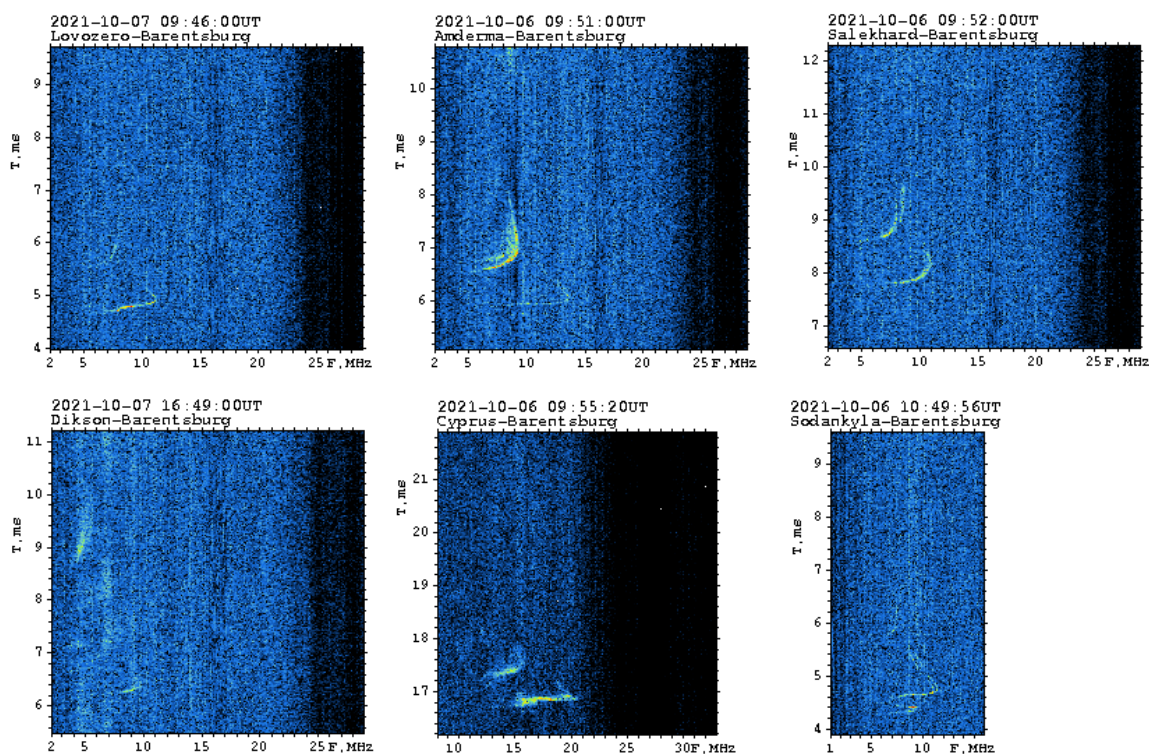


Рисунок 3. Примеры ионограмм наклонного зондирования на различных радиотрассах (прием в Баренцбурге).

На рисунке 4 представлены максимальные (MOF) и минимальные (LOF) частоты сигналов отражений от областей E и F ионосферы (автоматическая обработка) на трассе НЗИ о. Кипр – Баренцбург и Амдерма – Баренцбург в период различной геомагнитной для временного интервала 16 – 24 октября 2021 г.

Трасса о. Кипр – Баренцбург относится к среднеширотному региону и хорошо показывает глобальное влияние уровня геомагнитной активности на параметры ионосферы – например, максимальная электронная концентрация в F-области ионосферы уменьшается в период магнитной бури и постепенно восстанавливается после нее (глобальный Kp индекс для рассматриваемого периода приведен на рисунке 4в). Это хорошо видно по данным трассы НЗИ о. Кипр – Баренцбург для 18, 19 и 20 октября 2021 г. (рисунок 4а). Также данная трасса позволяет уточнить условия «входа» для радиосигналов в зону под границей зоны поглощения аврорального овала, показывая условия КВ связи с п. Баренцбург для дальних трасс. Параметры максимальных частот отражения от F области ионосферы на трассе Амдерма – Баренцбург (рисунок 4б) демонстрируют похожую тенденцию, уменьшаясь 18, 19 и 20 октября 2021 г. и восстанавливаясь до невозмущенного уровня в остальные дни. Также отмечаем увеличение значений минимальных частот на

данной трассе в период возмущения. Это связано с увеличением поглощения радиоволн в зоне аврорального овала. Также трассе Амдерма – Баренцбург (рисунок 4б) в возмущенный период часто регистрируются отражения от спорадических слоев Es ионосферы, связанных с высыпаниями частиц из магнитосферы. Однако эти отражения иногда наблюдаются в ночные периоды и в относительно спокойных условиях [Rogov, 2019]. Приведенный пример демонстрирует возможности экспериментального определения параметров ионосферы и условий распространения радиоволн, что для данного региона будет более точным, чем любой вариант моделирования.

На данный момент аппаратура установлена в тестовом режиме, из-за чего наблюдаются не всегда условия приема сигналов. В дальнейшем планируется провести модернизацию антенно-фидерной системы.

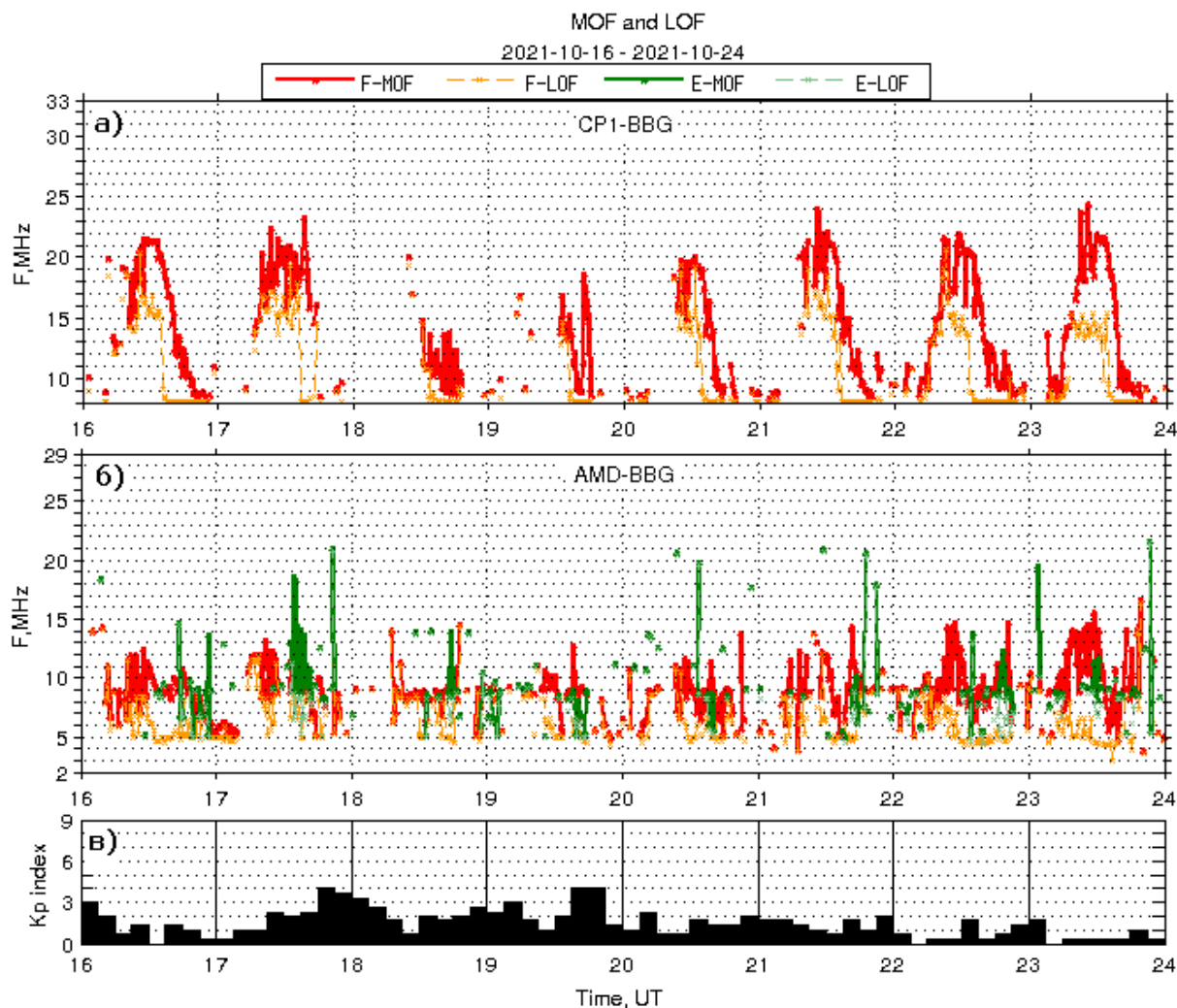


Рисунок 4. Максимальные и минимальные частоты сигналов на трассе НЗИ о. Кипр – Баренцбург и Амдерма – Баренцбург в период различной геомагнитной активности в период 16 – 24 октября 2021 г.

Заключение

Представлены примеры данных и результаты исследования параметров ионосферы и распространения радиоволн над акваторией Баренцева моря в различных геофизических условиях, полученные благодаря развертыванию приемного пункта станции наклонного зондирования ионосферы на арх. Шпицберген в п. Баренцбург. Данный пункт был включен в общую систему мониторинга условий распространения радиоволн в Российской Арктической зоне, поддерживаемую специалистами отдела геофизики ФГБУ «АНИИ». Наблюдения позволяют получить реальные данные в регионе, где точность ионосферных моделей сильно падает, поэтому проводимые работы имеют большое значение в практических вопросах, а также для улучшения моделей высокоширотной ионосферы.

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-05-80004.

Литература

- Rogov D.D. Study of the sporadic Es layers occurrence probability based on the ionospheric oblique sounding network data in the Russian Arctic region. Conference Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 2019, DOI:10.1109/RSEMW.2019.8792696.
- Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Урядов В.П., Шумаев В.В. ЛЧМ ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях. Изв. вузов. Радиофизика, 2003, Т. 46, № 11, С. 919-952.
- Рогов Д.Д. Оперативный мониторинг условий КВ радиосвязи в Арктическом регионе РФ. Материалы VI Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2020а, 257-261 с.
- Рогов Д.Д. Мониторинг условий распространения КВ радиоволн в Арктическом регионе РФ в режиме реального времени. «Physics of Auroral Phenomena», Proc. XLIII Annual Seminar, Apatity, pp. 120-123, 2020б.
- Рогов Д.Д., Выставной В.М. Исследование параметров распространения декаметровых радиоволн на сети трасс наклонного зондирования ионосферы в арктическом регионе РФ. Мир измерений. 2014. Т. 7. С. 20-26.
- Рогов Д.Д., Выставной В.М., Калишин А.С., Новиков С.В. Арктическая сеть наклонного зондирования для исследования высокоширотной ионосферы. Тезисы докладов международной научной конференции «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики, 2020, С. 353-354.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.035

ОЦЕНКА ГРАНИЦ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВОЗМУЩЕНИЙ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ GPS/ГЛОНАСС

С.А. Серебренникова

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия; e-mail: sova@mail.iszf.irk.ru

Аннотация. Оценка положения границы аврорального овала является актуальной и при этом достаточно сложной задачей. В последние годы Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) предоставляют обширный материал для изучения ионосферы Земли, а именно для наблюдения ионосферы и ионосферных неоднородностей в глобальном и региональном масштабе. Следовательно, карты вариации ПЭС указывают на постоянное присутствие ионосферных неоднородностей в области аврорального овала, а динамика области ионосферных неоднородностей соответствует динамике аврорального овала [1]. Таким образом, в работе был предложен новый подход для решения задачи прогноза положения аврорального овала, основанный на модели машинного обучения Random Forest, использующие данные GPS/ГЛОНАСС. В качестве опорных данных для машинного обучения использовались данные модели Ovation Prime. Разработанная модель Random Forest позволяет получать прогноз авроральной активности в виде карт потока энергии авроральных высыпаний. Оценка границ возмущений в авроральной зоне, в высокоширотной области была получена с помощью собственных, разработанных алгоритмов машинного зрения.

Введение. Изучение влияния Солнца на внешние слои ионосферы является актуальной задачей для современной науки. Одним из ключевых, видимых невооруженному взгляду процессов, происходящих в высоких слоях Ионосферы является область авроральных высыпаний частиц Солнечного ветра, где они сталкиваясь с нейтральными частицами атмосферы ионизируют область, называемую «Авроральным овалом». Свечение (мощность) «аврорального овала» тем сильнее, чем выше уровень геомагнитной активности, что описывается геомагнитными индексами (Kp, Dst и т.п.).

Так качественное моделирование процессов, происходящих в авроральной области, влияющих на мощность и увеличение границы «Аврорального овала» может помочь приоткрыть завесу тайны природы ионосферных возмущений. На данный момент существует несколько моделей, позволяющих получать прогноз мощности и границы авроральных высыпаний, однако, они используют часовые данные геомагнитных параметров (измерения магнитного поля, Kp индекс, данные солнечного ветра и т.п.). ГНСС же в свою очередь, имея информацию о глобальном распределении возмущенности ПЭС потенциально может осуществлять мониторинг авроральной активности [2] в режиме реального времени.

Используемые данные и метод. В исследовании для того, чтобы определить положение и мощность авроральных высыпаний по данным ГНСС был использован метод решения регрессионной задачи с помощью модели машинного обучения Random Forest. Суть метода состояла в том, чтобы определить уравнение F – связывающее вариации ПЭС с мощностью и границей авроральных высыпаний, которое бы при входных параметрах X генерировало прогноз Y - двумерно - пространственное распределение потока энергии авроральных высыпаний. В качестве эталонного набора для обучения модели Random Forest на данных ГНСС, использовались данные потока энергии электронов диффузного типа сияния, полученные с помощью модели Ovation Prime. Так как модель Ovation Prime построена на данных солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, полученные космическим аппаратом DISCOVER, данные солнечного ветра $f_{10.7}$, изменения межпланетного магнитного поля и индекс геомагнитного возмущения Kp также учитывались для модели Random Forest в качестве входных данных обучения X . В качестве основных данных обучения использовались 2-10 минутные вариации ПЭС в авроральной области, полученные с помощью ГНСС, изображенных на рис.1.

Однако, для сопоставления ПЭС и потока энергии электронов модели Ovation Prime нужно было привести их к одной системе координат, что было осуществлено методом «скользящего окна». «Окно» было отцентрировано по значениям потока энергии электронов, как показано на рис.2, где входящие в рамки «окна» значения ПЭС брались, как среднее значение с соответствующим вычислением статистических характеристик, включаемых в набор обучения модели Random Forest.

Результаты анализа авроральной активности, полученной моделью машинного обучения Random Forest. Обучение модели машинного обучения Random Forest происходило на выборке данных (данных обучения), включающей полные 96 суток, в период с 2000 по 2019 год, с равномерным распределением по Кр-индексу: спокойные дни (1-3), возмущенные дни (4-6) и сильные магнитные бури (7-9). Для тестирования модели использовались независимые от обучающей выборки данные с теми же параметрами: средним ПЭС «окна», дисперсией, данными межпланетного магнитного поля, кр-индексом и f10.7. На данный момент карты авроральных высыпаний, полученные на основе разработанной модели, с использованием машинного обучения Random Forest, дают хорошую согласованность с данными модели Ovation Prime, что можно наблюдать на рис. 3 и рис. 4.

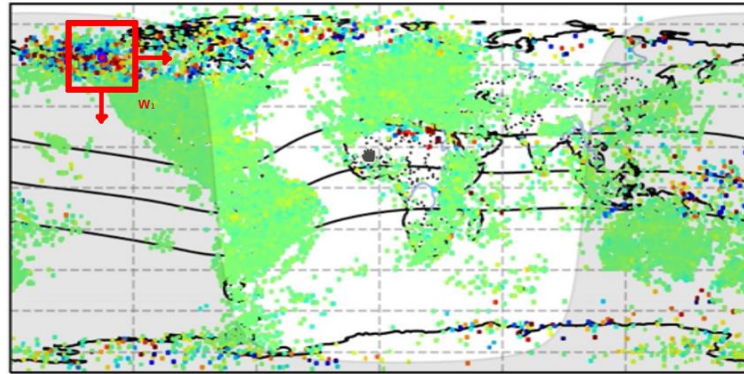


Рисунок 1. Карты вариации ПЭС с изображением работы метода «Скользящее окно», проходящее всю систему координат с радиусом 5x5 градусов географической широты/долготы.



Рисунок 2. Наглядное представление работы метода «Скользящее окно».

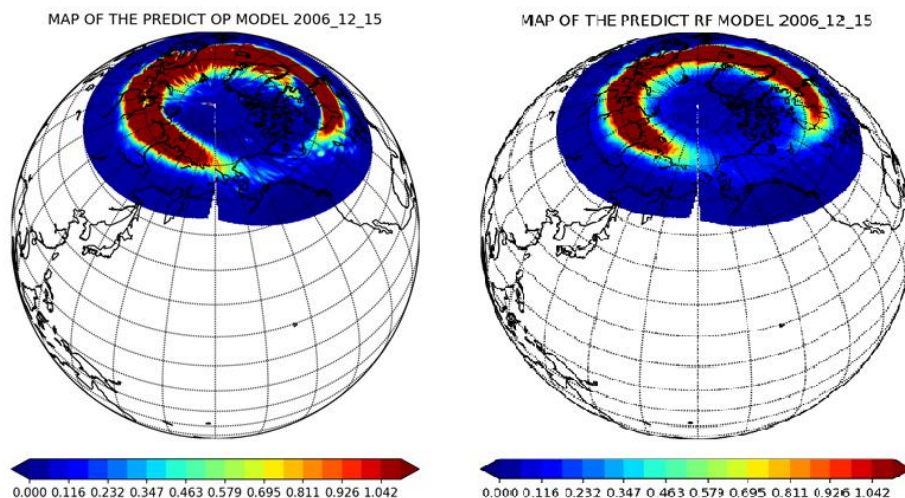


Рисунок 3. Слева представлен прогноз модели ovation Prime, эталонной модели для сравнения и справа прогноз мощности и границ авроральных высыпаний модели Random Forest для 15.12.2006.

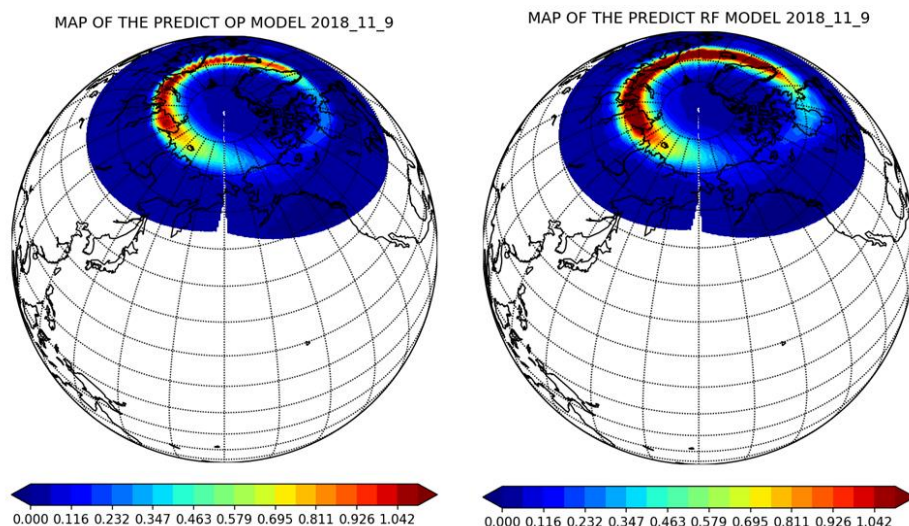


Рисунок 4. Слева представлен прогноз модели ovation Prime, эталонной модели для сравнения, и справа прогноз мощности и границ авроральных высыпаний модели Random Forest для 9.11.2018.

Можно отметить, что согласованность карт авроральных высыпаний, полученных моделью Random Forest растёт с увеличением количества дней обучения и увеличением глубины обучения. Минусом данного подхода является большее потребление вычислительной мощности и оперативной памяти компьютера, что в значительной степени увеличивает время обучения модели.

Границы авроральных высыпаний с помощью собственного алгоритма отчерчиваются красным цветом и накладываются сверху на график, во время рисования области авроральных высыпаний, прогнозируемой моделью Random Forest, как видно на рис.5. Границы ищутся довольно хорошо, в целом за счёт однотипности «аврорального овала» на всём тестовом наборе данных, без видимых искажений.

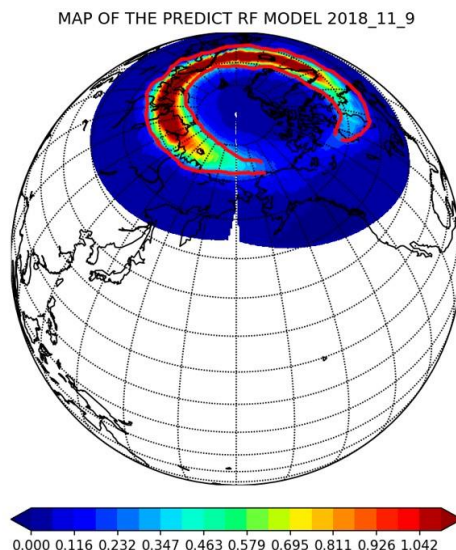


Рисунок 5. Границы аврорального овала для тестового набора данных для 9.11.2018.

Выводы. Несмотря на хорошую согласованность полученного прогноза с данными модели Ovation Prime, есть в этом также и минусы, так как модель Random Forest копирует модель изменения границ аврорального овала Ovation Prime, рисуя его «идеальным». Это связано с использованием лишь одной неэмпирической модели, как эталонной. Вследствие этого для улучшения и приближения оценки авроральной активности к

реальной назревает необходимость использования большего числа эталонных моделей для описания овала, в том числе использование экспериментальных данных спутника DMSP.

В целом можно сказать, что полученные результаты показывают работоспособность данного подхода **определения мощности и границы авроральных высыпаний по данным карт вариации ПЭС**, его перспективность и возможность доработки в дальнейшем для получения актуальной оценки авроральной активности в системах реального времени.

Список литературы

1. Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., Edemskiy I.K., Gavrilyuk N.S., Ishin A.B., Kosogorov E.A., Leonovich L.A., Lesyuta O.S., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., Polyakova A.S., Smolkov G.Y., Voeykov S.V., Yasyukevich Yu.V., Zhivetiev I.V. Review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena // Journal of Space Weather and Space Climate. 2013. V. 3. A27. DOI: 10.1051/swsc/2013049
2. Черноус С.А., Шагимурагов И.И., Алпатов В.В., Филатов М.В., Будников П.А., Ефишов И.И., Федоренко Ю.В. Авроральный овал и овал неоднородностей полного электронного содержания в различных гелиогеофизических условиях // Труды Второй всероссийской конференции "Гелиогеофизические исследования в Арктике". 2018. с. 102-105. DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.102-105

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.036

СВЯЗЬ ПОЯВЛЕНИЯ ЭФФЕКТА УТРЕННЕГО ПОНИЖЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ В ЯВЛЕНИЯХ ППШ С НЕОДНОРОДНЫМ ВЫСЫПАНИЕМ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ

В.А. Ульев^{1*}, Д.Д. Рогов^{1,2}, А.А. Абуни², М.А. Абунина²

¹Арктический и Антарктический Научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Россия

*E-mail: vauliev@yandex.ru

Аннотация

При анализе явления поглощения типа полярной шапки 10 – 15 сентября 2017 г. обнаружен новый эффект аномального понижения поглощения в местные утренние часы (эффект УП – утреннее понижение) 13 сентября на антарктических станциях Восток и Прогресс [Ульев и др., 2019].

В данной работе проанализированы вариации интенсивности потоков протонов во время солнечного протонного события с 10 – 15 сентября и вариации поглощения на ст. Прогресс за этот же период. В эти дни определены (на основании данных спутников серии POES с полярной орбитой) значения интенсивности потоков протонов, проникающих в утренний и вечерний сектора полярной шапки отдельно. Рассчитаны коэффициенты асимметрии (утро/вечер) заполнения южной полярной шапки потоками протонов. Установлено, что 13 сентября (период наблюдения эффекта УП) коэффициент асимметрии меньше 1. Предложено физическое обоснование связи появления УП с регистрацией пониженной интенсивности ПП в утреннем секторе ПШЦ по сравнению с вечерним.

Введение

В работе [Ульев и др., 2019] описан новый эффект в явлениях ППШ: в некоторых ППШ (особенно происшедших в равноденственные сезоны года [Ульев и др., 2020]) на станциях в центральной области полярной шапки в утренние часы вплоть до местного полудня наблюдается пониженное поглощение, которое названо эффектом утреннего понижения поглощения или утренним понижением (УП). Один из основных морфологических признаков УП заключается в том, что вариация понижения поглощения во время УП не коррелирует с тенденцией изменением интенсивности ПП с энергией $E_p > 10$ МэВ, измеренных вне магнитосферы во время УП.

В статье рассмотрены данные регистрации ПП в период СПС (ППШ) 10 – 15 сентября 2017 г. на спутнике (POES-15) с полярной орбитой над утренним и вечерним секторами центральной области полярной шапки (ПШЦ). Рассчитаны коэффициенты асимметрии заполнения ПШЦ потоками протонов утреннего (Jмут) и вечернего (Jмвч) секторов Кув ($K_{ув} = J_{мут} / J_{мвч}$).

Анализ вариаций интенсивности ПП и поглощения во время СПС и ППШ 10 - 15 сентября 2017 г.

На рисунке 1а представлены вариации интенсивности ПП (Jпп) (в диапазоне энергий $E_p > 5, > 10, > 30, > 50, > 100$ МэВ) в период СПС 10-15 сентября 2017 г. [<http://satdat.ngtc.gov/sem/goes>]. Согласно [Richardson and Cane, 1996; Jiggins et al., 2019] СПС с подобными характеристиками обусловлены солнечными вспышками с выбросом корональной массы (ВКМ). Период прохождения ВКМ мимо Земли отмечен символом \leftrightarrow .

На рисунке 1б представлены экспериментальные вариации поглощения ППШ (Аэ) 10 – 15 сентября 2017 г. с эффектом УП (13 сентября) на антарктической станции Прогресс ($\Lambda' = 76.23^\circ$, $\Phi' = -74.43^\circ$). Вариации поглощения ППШ имеют суточную периодичность (повышенные / пониженные значения в местные дневные/ночные часы) как результат смены освещенности ионосферы. Штриховой черной линией показаны расчетные значения поглощения, вычисленные на основе эмпирического соотношения [Sauer and Wilkinson, 2008]. Видно, что 13 сентября в утренние часы экспериментальные значения поглощения меньше, чем расчетные ($A_{э} < A_p$). (1) Это первый из признаков идентификации УП. (2) Второй – проявление предполагаемого УП на средней фазе СПС (так называемая фаза «Reservoir») с приходом ВКМ. (3) Третий –

проявление предполагаемого УП на фазе очень медленного спада (или даже плоского характера изменения ПП) во время СПС. Период проявления эффекта УП показан значком [▲].

Отметим, что 12 сентября, как и 13 сентября ($A\alpha < A\beta$), однако 13 числа идентификация предполагаемого УП не удовлетворяет второму признаку (отсутствует приход ВКМ). 14 сентября есть небольшое понижение $A\alpha$ по сравнению с $A\beta$, однако различие очень незначительное.

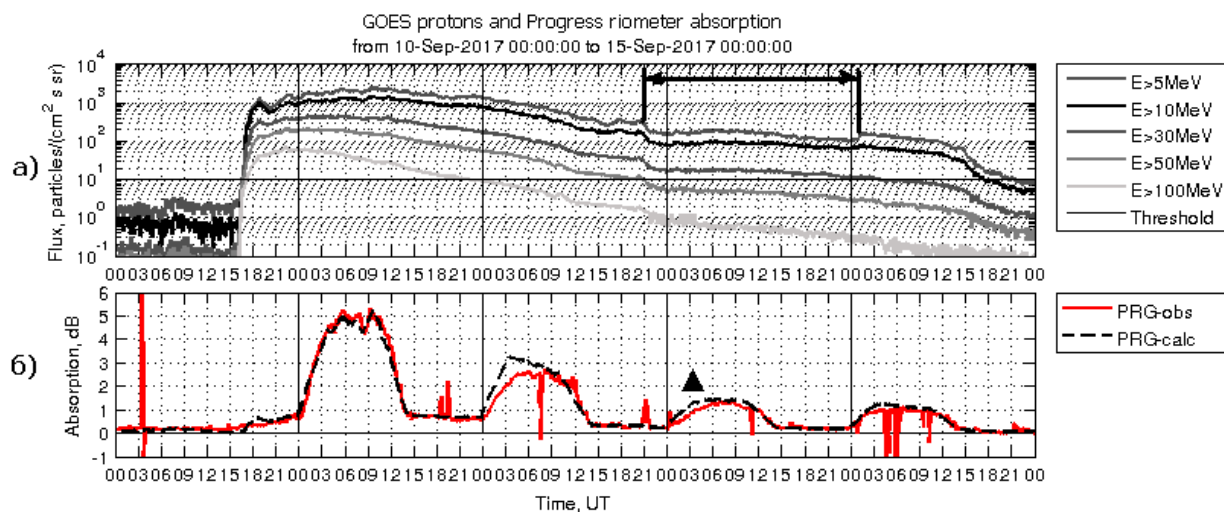


Рисунок 1. Поток протонов по данным спутника GOES (а) и поглощение на станции Прогресс (б) с 10 по 15 сентября 2017 г.

Анализ распределения интенсивности ПП в центральной области полярной шапки

При выполнении данной работы была выдвинута гипотеза о связи пониженного поглощения в период УП (в период местных утренних часов) на станциях в центральной области ПШЦ ($\Phi' \geq 60^\circ$) с пониженной интенсивностью ПП в утреннем секторе центральной области полярной шапки.

Для подтверждения этого предположения были построены проекции траекторий пролетов 5 полярных спутников серии POES над южной ПШЦ, регистрирующих потоки протонов с энергией $E_p > 6.9$ МэВ во время СПС 11 – 15 сентября 2017 г. Границы полярной шапки определены по [Dmitriev et al., 2010] для энергии протонов $E_p = 6.9$ МэВ.

Определены мгновенные значения интенсивности ПП (J_{pp}) с энергией $E_p > 6.9$ МэВ, зарегистрированные над траекториями пролетов спутников. На основе этих J_{pp} рассчитаны медианные значения интенсивности ПП раздельно по данным J_{pp} над утренней и вечерней частями траектории пролета спутника POES (соответственно J_{mut} и J_{mvch}). Определено соотношение J_{mut} и J_{mvch} и получен коэффициент асимметрии заполнения потоками протонов ПШЦ ($K_{ув} = J_{mut} / J_{mvch}$). Значения $K_{ув}$ рассчитаны для каждого пролета спутником POES-15 зоны южной полярной шапки Земли в течение СПС (по 14 значений за каждые сутки). На рисунке 2а представлена вариация СПС 10 – 15 сентября по данным GOES в нескольких диапазонах энергий. Красными линиями указаны моменты пролетов спутника POES-15, показанные на рисунках 2б и 2в.

На рисунке 2б и 2в приведены мгновенные значения J_{pp} по данным 2-х пролетов полярного спутника POES-15. На каждом рисунке две зеленые линии - границы нахождения траектории движения спутника внутри ПШЦ (границы рассчитаны по [Dmitriev et al., 2010]). Оранжевая линия делит ПШЦ на 2 сектора: утренний, левый (от зеленой до оранжевой линии) и вечерний, правый (от оранжевой до зеленой линии). Цифры около зеленых линий являются медианными значениями J_{pp} для каждого сектора раздельно. В левом верхнем углу указаны временные интервалы пролета спутника над ПШЦ.

На рисунке 2г приведены значения $K_{ув}$ за период 10 – 15 сентября. Видно следующее:

- 11 сентября значения $K_{ув} \approx 1$, т.е. $J_{mut} \approx J_{mvch}$. Это указывает на однородное заполнение утреннего и вечернего секторов ПШЦ потоками протонов.
- 13 сентября значения $K_{ув} < 1$, т.е. $J_{mut} < J_{mvch}$ (за исключением периодов около 10 UT и 18 – 23 UT). Это указывает на неоднородное заполнение утреннего и вечернего секторов ПШЦ потоками протонов.

Физическое обоснование связи между появлением УП и появлением ПП с пониженной интенсивностью в утреннем секторе ПШЦ

Пониженная интенсивность ПП в утреннем секторе ПШЦ в период эффекта УП может быть объяснена следующим образом. Во время мощных солнечных вспышек происходит выброс корональной массы (ВКМ)

в межпланетное пространство вместе с магнитными полями, которые образуют магнитное облако (МО). Магнитное облако состоит из замкнутых и так называемых «открытых» магнитных трубок (МТз и МТо), образующих центральную и внешнюю части. В МТз оба конца находятся в атмосфере Солнца и, таким образом, формируется магнитная трубка типа магнитной петли (МП). В МТо только один конец как правило «восточный» находится в атмосфере Солнца, а другой – в межпланетном пространстве [Pick and Vilmer, 2008; Malandraki et al., 2001, 2002].

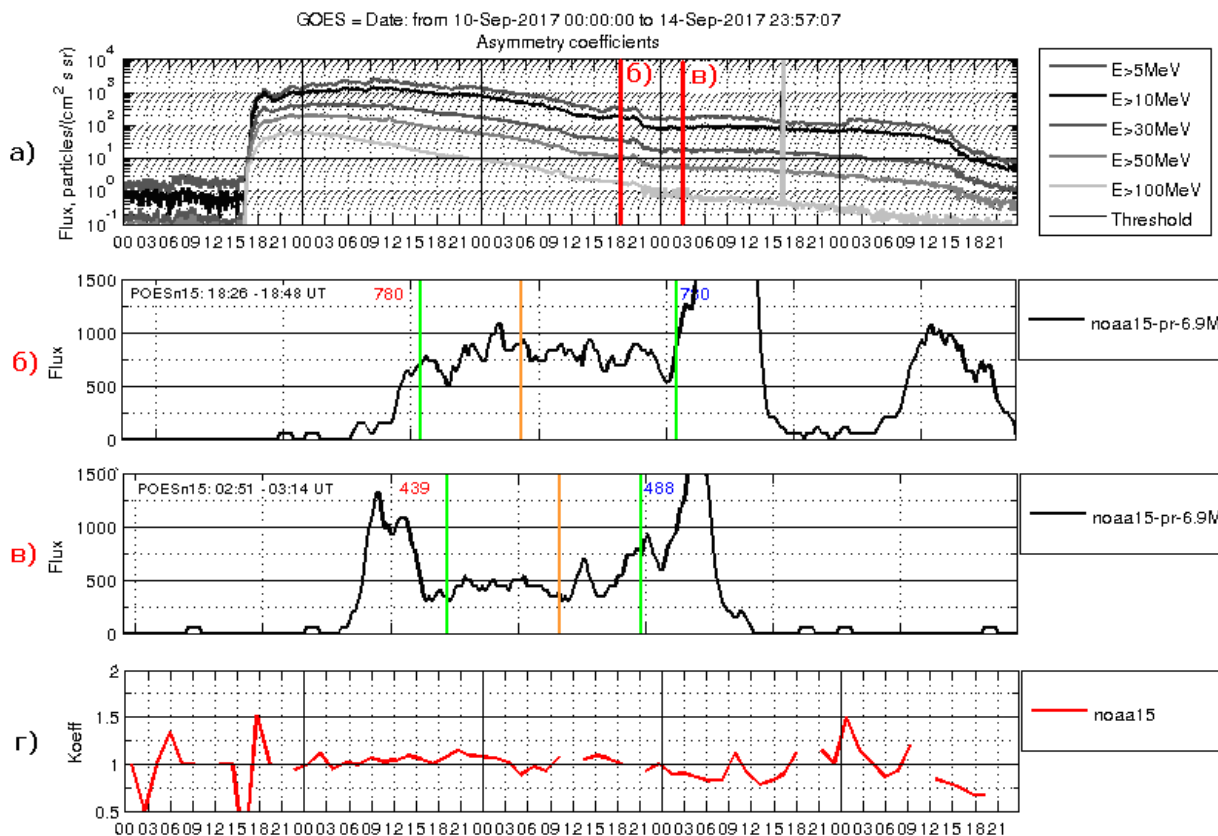


Рисунок 2. Потоки протонов по данным спутника GOES (а), вариации потоков протонов по данным спутника POES-15 около 18:40 UT 12 сентября 2017 г. (б) и около 3 UT 13 сентября 2017 г. (в), коэффициент асимметрии (утро/вечер) заполнения южной полярной шапки потоками протонов по данным спутника POES-15 (г).

Во время вспышки так же генерируются потоки протонов (ПП) в основном с энергией $E_p = 1 - 100$ MeV [Pick and Vilmer, 2008]. Часть ПП оказывается захваченной в МТз (в МП) внутри ВКМ, распространяется конвективно вместе с МТз и примерно через 24 – 48 час достигает орбиты Земли (в зависимости от гелиодолготы вспышки). В МТз (в МП) возникают два потока протонов, направленных навстречу друг другу: западный и восточный (ППзп и ППвс), если МТз (МП) расположена в плоскости эклиптики. При этом в зависимости от определенных условий в солнечной короне и в межпланетном пространстве: ППзп < ППвс или ППзп > ППвс. При этом в большинстве случаев (ППзп < ППвс) [Richardson, 1994; Richardson and Cane, 1996], особенно в МТо.

Когда МТз достигают орбиты Земли, происходит пересоединение магнитных силовых линий МТз с магнитными силовыми линиями хвоста магнитосферы (ХМ). В этом случае ПП неадиабатически (через магнитопаузу) проникают в ХМ. Если МТз находятся в плоскости эклиптики, то ППзп (ППвс) проникает в западную (восточную) сторону ХМ и высыпается в атмосферу в утреннем (вечернем) секторе ПШц [Hynds et al., 1974].

ПП ($E_p = 1 - 100$ MeV) на высотах нижней ионосферы (20 – 90 км) дополнительно ионизируют атмосферу и вызывают возрастание поглощения (А – absorption) коротких радиоволн галактического происхождения, которое регистрируется наземными высокочувствительными коротковолновыми приемниками - риометрами [Дриацкий, 1974]. Если ППзп < ППвс, то в утреннем секторе ПШц поглощение будет меньше, чем в вечернем ($A_{ут} < A_{вч}$), что и проявляется на записи риометра как утреннее пониженное поглощение, т.е. эффект УП.

ПП заполняют МТ (захватываются) и при этом формируется анизотропный ПП, состоящий из 2-х потоков протонов: западного и восточного (соответственно ППЗп и ППВс).

В равноденственные сезоны года Земля находится примерно на $\pm 7^\circ$ выше/ниже плоскости солнечного экватора. Когда в сентябре МО достигает орбиты Земли хвост магнитосферы попадает во внешнюю область МО, с МТО [Malandraki et al., 2002] в которых ППЗп \ll ППВс. Поэтому при пересоединении МТО с хвостом магнитосферы в утренний (вечерний) сектор ПШц проникают ППЗп (ППВс) соответственно малой (большой) интенсивности, которые вызывают соответственно малое утреннее / большое вечернее поглощение ППШУ < ППШВ. В результате регистрируется эффект УП.

Заключение

Исследована связь между появлением эффекта УП во время ППШ 10 – 15 сентября 2017 г. по данным риометрических наблюдений на антарктической станции Прогресс и распределением интенсивности потоков протонов в центральной области полярной шапки по данным наблюдений на полярных спутниках POES. Для этого рассчитаны значения коэффициента асимметрии заполнения потоками протонов утреннего и вечернего секторов центральной области ПШц. Сопоставление наличия УП и значений K_{uv} позволяет сделать следующие выводы: (1) в течение 13 сентября (наличие УП) значения $K_{uv} < 1$; (2) в течение 11 сентября (отсутствие УП) значения $K_{uv} \approx 1$; (3) связь между появлением УП и пониженными значениями $K_{uv} < 1$ обусловлена пониженными значениями ПП, проникающих в утренний сектор ПШц.

Предложена возможная физическая модель причинно-следственных факторов, обуславливающих связь между появлением УП и пониженными значениями K_{uv} .

Благодарности. Работа Ульева В.А. выполнена в рамках научно-исследовательских работ НИУ Росгидромета по теме 6.1 «Развитие и модернизация технологий мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации и Арктики». Работа Рогова Д.Д., Абунина А.А. и Абуниной М.А. выполнялась при поддержке гранта РФФИ № 20-72-10023.

Литература

- Dmitriev A.V., Jayachandran P.T., Tsai L.-C. (2010). Elliptical model of cutoff boundaries for the solar energetic particles measured by POES satellites in December 2006, *J. Geophys. Res.*, 115, A12244, doi:10.1029/2010JA015380
- Jiggins P. et al. (2019). In Situ Data and Effect Correlation During September 2017 Solar Particle Event. *Space Weather*, 17(1): 99-117.
- Hynds R.J., Morfill G., Rampling R. (1974). A two-satellite study of low-energy protons over the polar cap during the event of November 18, 1968, *J. Geophys. Res.*, 79(10): 1332-1344.
- Malandraki O.E., Sarris E.T., Lanzerotti L.J., Trochoutsos P., Tsiropoula G., Pick M. (2002). Solar energetic particles inside a coronal mass ejection event observed with the ACE spacecraft, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(5-6): 517-525, doi:10.1016/S1364-6826(02)00008-1
- Malandraki O.E., Sarris E.T., Lanzerotti L.J., MacLennan C.G., Pick M., Tsiropoula G. (2001). Tracing the magnetic topology of coronal mass ejection events by Ulysses/HI-SCALE energetic particle observations in and out of the ecliptic, *Space Sci. Rev.*, 97(1): 263-268, doi:10.1023/A:1011820832228
- Pick M., Vilmer N. (2008). Sixty-five years of solar radio astronomy: flares, coronal mass ejections and Sun-Earth connection, *Astronomy and Astrophysics Review*, 16(1): 1-153.
- Richardson I.G. (1994). A survey of bidirectional > 1 MeV ion flows during the HELIOS 1 and HELIOS 2 missions: observations from the Goddard Space Flight Center instruments, *Astrophys. J.*, 420: 926-942.
- Richardson I.G., Cane H.V. (1996). Particle flows observed in ejecta during solar event onsets and their implication for the magnetic field topology, *J. Geophys. Res.*, 101(A12): 27521 –27532.
- Sauer H.H., Wilkinson D.C. (2008). Global mapping of ionospheric HF/VHF radio wave absorption due to solar energetic protons, *Space Weather*, № 6, S12002.
- Дриацкий В.М. (1974). Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт, Гидрометеиздат, г. Ленинград.
- Ульев В.А., Рогов Д.Д., Франк-Каменецкий А.В. (2019). Эффект утренне-дневной аномалии (УДА) во время поглощения типа полярной шапки (ППШ) в сентябре 2017 г., “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XLII Annual Seminar, Apatity, pp. 194-197, doi: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.194-197
- Ульев В.А., Рогов Д.Д., Франк-Каменецкий А.В. (2020). Сезонная зависимость появления эффекта утреннего понижения поглощения ППШ, “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XLIII Annual Seminar, Apatity, pp. 135-137, doi: 10.37614/2588-0039.2020.43.033

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.037

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ПЕРИОДЫ РЕГИСТРАЦИИ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ НА КОРОНОГРАФАХ

О.А. Шейнер

НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Возможность подготовки и создания мер защиты от природных аномалий и от геоэффективных последствий мощных солнечных явлений в околоземных и земных процессах – актуальная задача современной науки, определяется периодом прогнозирования мощных явлений солнечной активности. Поскольку существуют методы прогнозирования отдельных явлений солнечной активности, в том числе и вызывающих возмущения в околоземном пространстве, можно было бы с определенной степенью уверенности предсказать временные возмущения в ионосфере. Способ прогноза времени регистрации коронального выброса массы был предложен на основе анализа данных солнечного микроволнового излучения, получаемых при наземном круглосуточном мониторинге при сравнительно простых усовершенствованиях методов обработки имеющейся информации. В то же время за проявление геоэффективности СМЕ можно принять длительное снижение значений девиации Δf_0F2 критической частоты f_0F2 слоя F2 ионосферы, и прогнозирование состояния ионосферы можно связать с прогнозированием корональных выбросов массы. В данной работе приводятся прогностические оценки f_0F2 на основе данных наблюдений солнечного радиоизлучения в широком диапазоне частот.

Введение

Влияние солнечных процессов на состояние околоземной космической среды является предметом исследований в связи с его актуальностью для современных технологий. При этом следует иметь в виду, что для анализа различных процессов, происходящих в верхних слоях атмосферы Земли и в околоземном космическом пространстве, необходимо использовать полную цепочку физических процессов, происходящих между Солнцем и Землей. Обычно для получения информации о характеристиках ионосферных возмущений, вызванных солнечными явлениями, используют информацию о геомагнитных индексах (Kp, Ap, Dst), рассчитанных по наземным наблюдениям, и вариациях данных околоземного космического пространства, измеренных искусственными спутниками (поток рентгеновского излучения, поток протонов). В последние годы большое внимание уделяется исследованиям геоэффективности физических явлений, возникающих на Солнце и проявляющихся в солнечном ветре, таких, как вспышки, корональные выбросы массы (СМЕ), потоки высокоскоростного солнечного ветра.

Известно, например, что СМЕ характеризуются мощным излучением в широком диапазоне электромагнитных волн, образованием ускоренных заряженных частиц, образованием ударных волн в межпланетном пространстве [1]. Возмущения в магнитосфере и ионосфере Земли, вызванные явлениями СМЕ, приводят к нарушениям функционирования систем ориентации, связи, ряда приборов на борту космических аппаратов, вызывают многочисленные сбои в работе связи, навигации, отслеживания и предупреждения на Земле, могут привести к экстремальным ситуациям в крупных энергетических системах, ускорению процессов коррозии в нефтегазопроводах, а также повлиять на процессы формирования погоды и здоровья человека (см., например, [2-9]).

Возможность подготовки и создания мер защиты от природных аномалий и от геоэффективных последствий мощных солнечных явлений в околоземных и земных процессах и во многих областях деятельности человека – актуальная задача современной науки, и определяется периодом прогнозирования корональных выбросов массы.

Поскольку существуют методы прогнозирования отдельных явлений солнечной активности, в том числе и вызывающих возмущения в околоземном пространстве, можно было бы с определенной степенью уверенности предсказать временные возмущения в ионосфере.

В качестве одного из параметров ионосферы Земли обычно рассматривается поведение во времени критической частоты f_0F2 слоя F2 ионосферы, измеряемой с помощью станций вертикального зондирования ионосферы. Как было показано [10,11], для повышения точности предпочтительно анализировать поведение во времени величин отклонения измеренного значения частоты от ее среднего значения Δf_0F2 по

предложенной в [10] методике. При анализе поведения Δf_0F2 и параметров корональных выбросов массы [11] нами была обнаружена корреляция между поведением девиации критической частоты (Δf_0F2) слоя F2 ионосферы и регистрацией корональных выбросов массы. Рисунок 1 иллюстрирует существование отрицательной производной во временном поведении отклонения f_0F2 после начала СМЕ типа петли, (красный квадрат) и без изменений после начала других типов СМЕ (зеленый треугольник). Две правые панели рисунка – разностное изображение СМЕ типа Jet (верхняя панель) и СМЕ типа Loop (нижняя панель) из Каталога СМЕ SOHO LASCO [12].

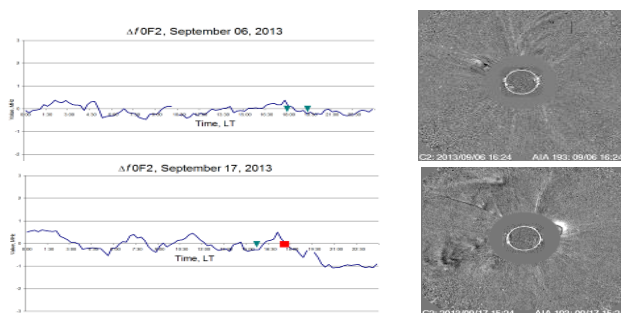


Рисунок 1.

Таким образом, за проявление геоэффективности СМЕ можно принять длительное снижение значений девиации Δf_0F2 критической частоты f_0F2 слоя F2 ионосферы. Тогда прогнозирование состояния ионосферы можно связать с прогнозированием корональных выбросов массы.

В данной работе приводятся результаты исследования возможности применения данных наблюдений солнечного радиоизлучения в широком диапазоне частот для прогностических оценок критической частоты f_0F2 слоя F2 ионосферы.

Используемые данные и метод

Способ прогноза времени регистрации коронального выброса массы был предложен в [13, 14] на основе анализа данных солнечного микроволнового излучения, получаемых при наземном круглосуточном мониторинге и размещаемых в сети Интернет в реальном времени, при сравнительно простых усовершенствованиях методов обработки имеющейся информации.

Алгоритм и схема краткосрочного прогнозирования КВМ, разработаны на основе статистического анализа закономерностей солнечного радиоизлучения, наблюдаемого до регистрации «изолированных» солнечных корональных выбросов массы – это события, которые удовлетворяют условиям: ближайшие по времени выбросы не регистрируются в течение, по крайней мере, 8 часов ДО и 6 часов ПОСЛЕ рассматриваемого события. Это связано с тем, что данные Мировой службы Солнца в рассматриваемом диапазоне частот, были получены с помощью радиотелескопов без пространственного разрешения. Поэтому необходимо было быть уверенными в том, что в течение рассматриваемого интервала времени в поле зрения коронографа регистрируется только один, вполне определённый СМЕ, и тогда изменения в наблюдаемом без пространственного разрешения радиоизлучении будут главным образом соответствовать активности, связанной с формированием рассматриваемого коронального выброса.

Ранее было показано, что использование радиоастрономических данных как для выявления особенностей возникновения КВМ, так и для разработки способов прогноза параметров КВМ удобно и перспективно [15]. Фактически, спектральные измерения солнечного радиоизлучения охватывают все высоты солнечной атмосферы; чувствительность и точность измерений позволяют регистрировать даже небольшие изменения энергии. Регистрация радиоизлучения обеспечивается практически всепогодными наземными наблюдениями, а относительная дешевизна получения соответствующей информации обусловлена разработанной и внедренной системой мониторинга наблюдений [16].

Предлагаемый метод, как метод, основанный на эмпирических данных, является классическим сочетанием точечного метода прогнозирования, когда указывается, происходит событие или нет, и вероятностного, поскольку определяется временной интервал для регистрации события. По своей структуре метод основан на опознавательной схеме, простейшим вариантом которой является синоптическая схема, когда по предыстории, по обучающей выборке определяется то сочетание признаков, которое наиболее часто предшествовало прогнозируемому событию, что позволяет предсказывать наличие события на определенном временном интервале [17].

Анализ данных микроволнового излучения, формируемого в нижних слоях солнечной атмосферы, является эффективным методом выявления особенностей, связанных с процессами уже на стадии образования и начального распространения СМЕ. Необходимый мониторинг позволяет идентифицировать

особенности эволюции до эрупции СМЕ (эволюция корональной магнитной топологии до дестабилизации) и их генерации.

Предыдущие исследования привели к открытию явления «радиопредвестников» [18]. Было показано, что значительному количеству СМЕ в течение двухчасового интервала перед их регистрацией на коронографе предшествует спорадическое радиоизлучение, которое, т.о. может быть определено как радиопредвестник коронального выброса массы.

Это явление было использовано для уточнения прогнозируемого времени регистрации явления СМЕ. С этой целью данные станций Службы Солнца потоков радиоизлучения от всего Солнца в микроволновом диапазоне (400 МГц – 15 ГГц), доступного в Интернете в виде временной регистрации радиоизлучения или спектрограммы в реальном времени, сравниваются с данными каталогов СМЕ. При анализе рассматриваемого материала было обнаружено, что если спорадическое радиоизлучение различных типов (радиопредвестники СМЕ в виде импульсного, постепенного или серии всплесков низкой интенсивности с длительностью ≥ 3 мин и потоком, по крайней мере, 1-3 единицы на фоне полного солнечного потока) происходит одновременно и в значительной части диапазона микроволнового излучения (что характерно для локальной активной области образования СМЕ), то событие СМЕ регистрируется на коронографе в интервале ≤ 200 мин.

Рисунок 2 иллюстрирует временные изменения в потоке радиоизлучения S в виде схемы профилей записей солнечного радиопотока для различных станций службы Солнца в спектральном диапазоне наблюдений от 6 до 15 ГГц перед регистрацией СМЕ 12 августа 1989 г. СМЕ типа петля был зарегистрирован на коронографе в 12:59–14:32 UT. Метод, используемый для визуального представления данных, подробно описан в каталогах [19,20].

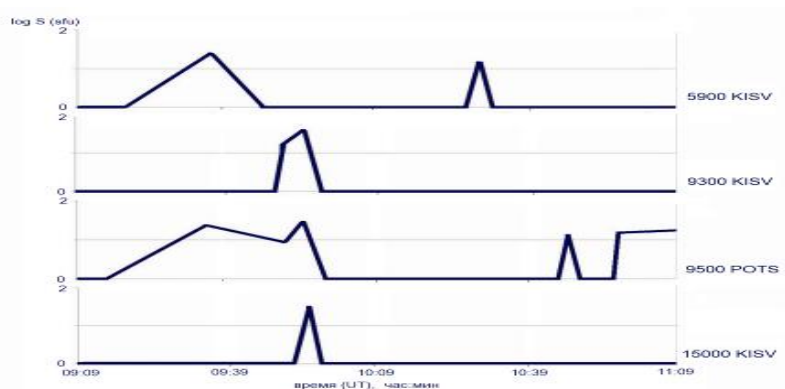


Рисунок 2.

С правой стороны рисунка показана частота наблюдения в МГц и сокращенное название соответствующей обсерватории (данные радиоизлучения Мировой службы Солнца), а с левой – значения потоков в логарифмическом масштабе. Как минимум за 3 часа до регистрации СМЕ типа петля на коронографе SMM (или за 2 часа до СМЕ типа облака) в анализируемой части микроволнового диапазона наблюдается широкополосное спорадическое явление.

Результаты анализа ионосферных данных

Рассмотрим применение предложенной процедуры для анализа состояния ионосферы на примере данных сентября 2017 г. (рис.3).

На рисунке 3 приведены результаты совместного анализа данных спутников GOES и данных вертикального зондирования ионосферы четырех разных ионосферных станций, расположенных на расстоянии друг от друга, за сентябрь 2017 г.; горизонтальная ось – дни месяца; левая вертикальная ось для Δf_0F2 – время суток (UT). Красными стрелками отмечены моменты регистрации геоэффективных СМЕ. Как видно из рисунка 3, наблюдается уменьшение мгновенного Δf_0F2 на несколько МГц (синий цвет) после регистрации указанных СМЕ 8 и 15 сентября. Следовательно, можно предположить, что именно данные СМЕ оказывают влияние на состояние ионосферы.

С другой стороны, подтверждаются установленные закономерности существования радиопредвестников отмеченных корональных выбросов массы.

Корональный выброс массы 7 сентября 2017 г. был зарегистрирован в 15:12:08 UT. Согласно данным мониторинга радиоизлучения Солнца, на двух частотах микроволнового диапазона одновременно регистрируются всплески примерно за 2 часа до момента регистрации СМЕ (см. таблицу 1). Что свидетельствует о выполнении условия прогнозирования СМЕ на интервале 2-3 часа. А значит, и о возможном прогнозировании изменений в ионосфере.

Корональный выброс массы 15 сентября был зарегистрирован в 12:00:05 UT. Как следует из рисунка 4, за 3 часа до регистрации СМЕ на коронографе наблюдаются всплески радиоизлучения в микроволновом диапазоне – условия прогнозирования СМЕ на интервале 2-3 часа выполнены.

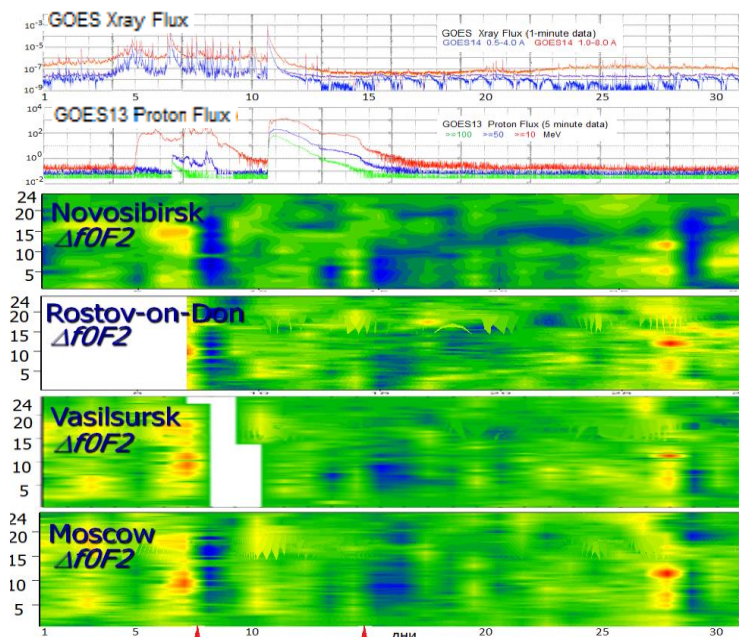


Рисунок 3.

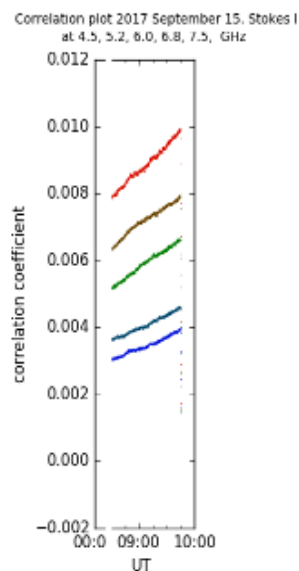


Рисунок 4.

Таблица 1.

Date	Frequency (MHz)	Type	Starting time (UT)	Time of maximum (UT)	Duration (Min.)	Flux density Peak	Flux density Mean	Observatory
07	9350	22GRF	1329.7	1331.6	17.97	7.5	-	KISL
	9350	47GB	1427.6	1433.3	33.77	3100.0	-	KISL
	6150	46C	1429.9	1433.6	14.71	874.8	-	KISL
	6150	4S/F	1445.9	1448.5	9.23	184.5	-	KISL

Выводы

На примере событий 7 и 15 сентября 2017 г. показана возможность прогностической оценки изменений критической частоты ионосферного слоя F2 (Δf_0F2) по поведению солнечного радиоизлучения в широком диапазоне частот.

Благодарности. Работа выполнена по проекту № 0729-2020-0057 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Webb D.F., Howard T.A. Coronal Mass Ejections Observations // Living Reviews in Solar Physics. 2012. V. 9, N 1. art. 3.
2. Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A. et al. Geomagnetically induced currents: Science, engineering, and applications readiness // Space Weather. 2017. V. 15, N 7. P. 828-856.
3. Kutiev I., Tzagouri I., Perrone L. et al. Solar activity impact on the Earth's upper atmosphere // J. Space Weather Space Clim. 2013. V. 3, A06. 21p.

4. Kumar P., Uddin W., Taori A. et al. Ionospheric response to the space weather event of 18 November 2003 – an investigation // *Indian J. Radio Space Phys.* 2010. V. 39, N 5. P. 290-295.
5. Tsagouri I., Galkin I., Asikainen T. Long-term changes in space weather effects on the Earth's ionosphere // *Advances in Space Research.* 2017. V. 59, N 1. P. 351-365.
6. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. – М.: Радио и связь, 2004. 320с.
7. Бреус Т.К., Бинги В.Н., Петрукович А.А. Магнитный фактор солнечно-земных связей и его влияние на человека: физические проблемы и перспективы // *Успехи физических наук.* 2016. Т. 186, N 5. С. 568–576.
8. Гальперин Ю.И., Дмитриев А.В., Зеленый Л.М., Панасюк М.И. Влияние космической погоды на безопасность авиа и космических полетов // *Полёт.* 2001. Т. 3. С. 27-39.
9. Libo L., WeiXing W., YiDing Ch., HuiJun L. Solar activity effects of the ionosphere: A brief review // *Chinese Science Bulletin.* 2011. V. 56, N 12. P. 1202-1211.
10. Sheiner O.A., Fridman V.M., Krupenya N.D. et al. Effect of solar activity on the Earth' environment // *Second Solar Cycle and Space Weather / ed. Huguette Sawaya-Lacoste. Proc. Euroconference ESA SP-477.* 2002. P. 479-481.
11. Sheiner O., Rakhlin A., Fridman V., Vybornov F. New ionospheric index for Space Weather service // *Advances in Space Research.* 2020. V. 66, N 6. P. 1415-1426.
12. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/ (дата обращения 2020-09-22).
13. Sheiner O.A., Fridman V.M. On a method to forecast the registration time of a Coronal Mass Ejection with a coronagraph // *Astronomical and Astrophysical Transactions.* 2019. V. 31, N 3. P. 379-388.
14. Способ краткосрочного прогноза времени регистрации явления коронального выброса массы (КВМ): пат. 2630535 Рос. Федерация: G01T 1/16 / Фридман В.М., Шейнер О.А.; заявитель и патентообладатель ННГУ им. Н.И. Лобачевского. – N 2016100808; заявл. 12.01.2016.; опубл. 11.09.2017.
15. Fridman V.M., Sheiner O.A. Spectral-Temporal Peculiarities of the Microwave Emission Preceding Geoeffective Coronal Mass Ejections // *Geomagn. Aeron.* 2009. V. 49, N 8. P. 1133-1136.
16. <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/solarradio.html> (дата обращения 2020-09-22).
17. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.: Наука, 1979. 448 с.
18. Шейнер О.А., Фридман В.М. Явления в микроволновом солнечном излучении, наблюдаемые во время образования и начального распространения корональных выбросов массы // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика.* 2010. Т. 53, N 5-6. С. 311-328.
19. Дурасова М.С., Тихомиров Ю.В., Фридман В.М., Шейнер О.А. Каталог явлений солнечной активности за 1998 г., предшествующих регистрации КВМ, по данным Мировой службы Солнца в радиодиапазоне // *Препринт НИРФИ № 483.* Нижний Новгород. 2003.
20. Дурасова М.С., Тихомиров Ю.В., Фридман В.М., Шейнер О.А. Каталог явлений солнечной активности, предшествующих регистрации КВМ, по данным Мировой службы Солнца в радиодиапазоне за 2003 г. // *Препринт НИРФИ № 496.* Нижний Новгород. 2004.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.038

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА СРЕДНЕШИРОТНУЮ ИОНОСФЕРУ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 22-23 ИЮНЯ 2015 ГОДА

О.И. Ягодкина¹, В.А. Панченко², В.Г. Воробьев¹, В.А. Телегин², Г.А. Жбанков³

¹ФБНУ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия

²ФБНУ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, г. Москва, г. Троицк, Россия

³Научно-исследовательский институт физики южного федерального университета,
г. Ростов-на-Дону

Аннотация. Исследована зависимость высоты $HmF2$ и критической частоты $foF2$ слоя F2 среднеширотной ионосферы от магнитной активности и динамического давления солнечного ветра в период изолированной магнитной бури 22-23 июня 2015 г. Используются данные, полученные в результате автоматической обработки 15-минутных ионограмм DPS-4 (Москва), данные спутника DMSP F16 и модель авроральных высыпаний. Показано, что во время главной фазы магнитной бури Москва находилась в районе высыпаний аврорального овала. Регистрируемые в это время параметры слоя F2 отличны от регистрируемых в предбуриевой период и на фазе восстановления бури, когда Москва находится вне зоны авроральных высыпаний. Представлены зависимости параметров слоя F2 от индексов магнитной активности и динамического давления солнечного ветра в периоды различных фаз магнитной бури.

1. Введение

Слой F2 ионосферы - наиболее ионизированная область верхней атмосферы Земли. Основными его параметрами являются высота $HmF2$ и критическая частота $foF2$. В зависимости от геомагнитной и солнечной активности они подвержены значительным изменениям. Динамика основных ионосферных параметров при разных геомагнитных условиях различна. Особый интерес представляет реакция ионосферы на большие геомагнитные бури, поскольку они приводят к планетарной перестройке ионосферы и изменению её параметров. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования ионосферы во время магнитных бурь разной интенсивности были проведены в течение последних десятилетий [1-5]. В этих работах выявлены основные факторы, влияющие на поведение определенных параметров ионосферы, однако полученные данные не дают полной картины реакции ионосферы на геомагнитные возмущения. Эта проблема достаточно сложна. Известно, что морфология бурь в области F зависит как от межпланетных параметров, так и от места и времени наблюдения. Роль геомагнитной активности на динамику ионосферы в период магнитных бурь легче всего выявить при попадании ионозонда в зону авроральных высыпаний. Для Москвы такое возможно только во время сильных геомагнитных бурь, при которых полярные сияния наблюдаются на средних и, возможно, на более низких широтах. Мониторинг местоположения пункта наблюдения относительно зоны авроральных высыпаний возможен при использовании модели АРМ (модель авроральных высыпаний) [6]. Входными параметрами модели служат индексы геомагнитной активности AL и Dst (SYM/H), географические координаты пункта наблюдения и универсальное UT время. Для настоящего исследования была выбрана сильная изолированная магнитная буря в 24-м цикле солнечной активности 22-23 июня 2015 г, в период которой Dst индекс в минимуме составлял -207 нТл.

Целью настоящей работы является исследование динамики параметров ионосферы в период до начала главной фазы магнитной бури, на ее главной фазе и на фазе восстановления и изучению их связи с уровнем геомагнитной активности и параметрами солнечного ветра.

2. Используемые данные

В работе использованы 15-минутные данные, полученные в ИЗМИРАН в результате автоматической обработки ионограмм DPS-4 (Москва, географ. 55.45° N, 37.37° E), и модель авроральных высыпаний АРМ [6], размещенная на сайте <http://apm.pgia.ru>.

Для определения положения экваториальной границы аврорального овала в условиях высокого давления солнечного ветра 22-23 июня 2015 г. использовались данные спутника DMSP F-16, представленные на портале <http://sd-www.jhuapl.edu>. Данные по магнитной активности были взяты на сайте <http://spdf.gsfc.nasa.gov>.

Ионосферная буря обычно проявляется в вариациях электронной концентрации в широком интервале высот от примерно 200 до 800-1000 км, поэтому основное внимание в работе уделяется высоте $HmF2$ и критической частоте $foF2$ слоя во время выбранных интервалов.

3. Связь параметров ионосферы с геомагнитной активностью и динамическим давлением солнечного ветра

Магнитная буря 22-23 июня 2015 г (Кр=9, Dst =-207 нТл) происходила на фоне повышенного давления солнечного ветра (P_{sw}), регистрируемого во время главной фазы бури. На средних широтах наблюдались довольно интенсивные полярные сияния. Геомагнитные условия и характеристики ионосферных параметров в период 22-23 июня представлены на рис. 1. Штриховыми вертикальными линиями выделены 3 интервала: (а) до начала главной фазы магнитной бури, (б) главная фаза бури и (в) фаза восстановления.

В этих интервалах исследуется динамика параметров ионосферы – высоты $HmF2$ и критической частоты $foF2$. На рис. 1 сверху вниз показаны индексы геомагнитной активности AL, SYM/H и динамическое давление солнечного ветра (P_{sw}). На двух нижних панелях показаны основные параметры ионосферы в слое F2 - высота $HmF2$ и критическая частота $foF2$.

AL-индекс достигает величины -1370 нТл в 18:50 UT 22 июня, максимальное значение SYM-H индекса - 207 нТл в 04:25 UT 23 июня. Мы используем SYM-H индекс вместо характерного для магнитных бурь Dst индекса, так как 5-минутное разрешение предпочтительнее для изучения явлений, происходящих на коротких промежутках времени. SYM-H индекс демонстрирует те же вариации что и Dst индекс.

Резкий рост динамического давления солнечного ветра, показанный на третьей панели, регистрируется на земной поверхности как SSC в 18:35 UT. Как видно из рисунка, динамика изменений $HmF2$ такова, что по форме она близка к форме изменения P_{sw} , а высота слоя достигает минимума одновременно с уменьшением давления еще до окончания главной фазы бури.

(а) Период до начала главной фазы (09:00 – 18:35 UT).

В течение периода 09:01-18:16 UT 22 июня, согласно модели APM [6], Москва находилась экваториальнее зоны авроральных высыпаний. Показанный на верхней панели рис. 1 индекс AL указывает на наличие сильной авроральной активности в высоких широтах. Наблюдались две последовательные магнитные бухты в AL с амплитудами -916 нТл в 16:40 UT и -1274 нТл в 18:15 UT. Индекс SYM/H в первом случае составлял -46 нТл, во втором -15 нТл.

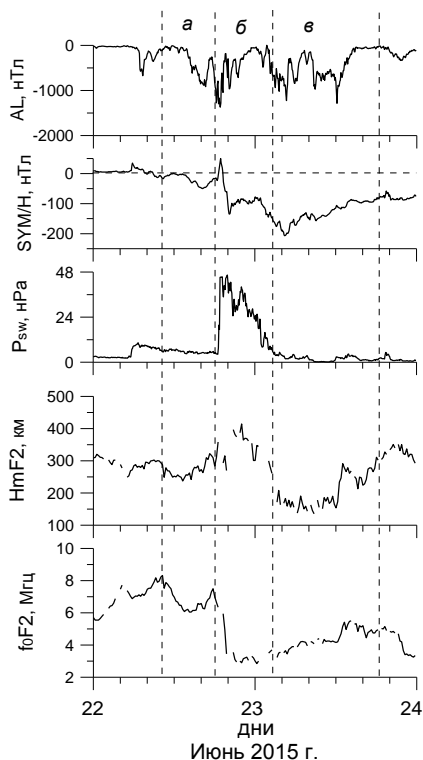


Рисунок 1. Геомагнитные условия и характеристики ионосферных параметров в период 22-23 июня 2015 г.

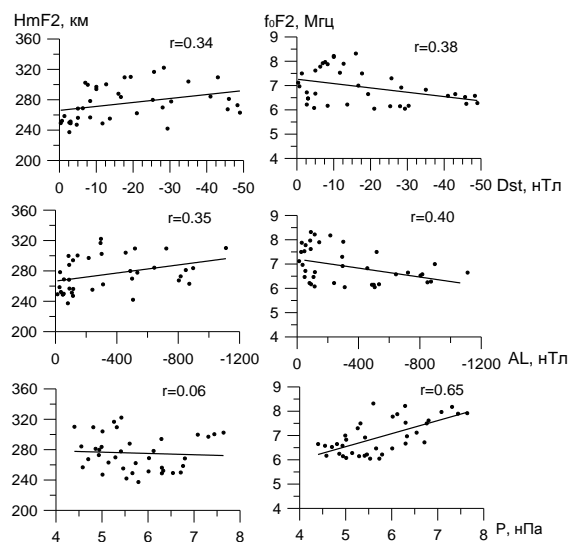


Рисунок 2. Зависимость высоты и критической частоты слоя F2 от величины SYM/H (верхняя панель), AL (средняя панель) индексов геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра (нижняя панель) до начала главной фазы магнитной бури.

На рис. 2 показана зависимость высоты $HmF2$ и критической частоты f_oF2 от активности и динамического давления солнечного ветра. Сплошные линии на рисунке соответствуют уравнениям линейной регрессии. Коэффициент корреляции указан на каждой панели рисунка.

Как видно из рисунка, с увеличением магнитной активности наблюдается некоторая тенденция к росту высоты $HmF2$ и падению критической частоты f_oF2 . Изменение динамического давления солнечного ветра влияет только на поведение критической частоты слоя, но не влияет на его высоту. С увеличением давления происходит рост f_oF2 .

(б) Главная фаза магнитной бури (18:35 UT 22 июня - 04:41 UT 23 июня).

Как видно из рисунка 1, до начала возмущения значение критической частоты ~ 7 МГц, высоты ~ 380 км. Одновременно с регистрацией SSC в 18:35 UT резкий рост динамического давления солнечного ветра сопровождается перестройкой ионосферы: резко, до ~ 3 МГц падает критическая частота слоя F2, но увеличивается до ~ 400 км его высота. По мере развития магнитной активности и уменьшения давления солнечного ветра высота слоя $HmF2$ падает до минимума ~ 200 км, а критическая частота f_oF2 возрастает до ~ 3.5 МГц. Динамическое давление солнечного ветра достигает своего предбурового значения еще до окончания главной фазы бури.

На рис. 3а представлено глобальное распределение авроральных высыпаний по модели АРМ в начале главной фазы магнитной бури в 19:30 UT. В это время динамическое давление солнечного ветра составляло 40.5 нПа. Входные параметры модели: $AL = -365$ нТл, $Dst = -47$ нТл. Обсерватория Москва при таких параметрах геомагнитной активности не попадает в зону авроральных высыпаний, поэтому наблюдение полярных сияний в таких условиях кажется невозможным. Однако известно, что во время бури полярные сияния наблюдались не только в г. Москве, но и на более южных широтах, т.е. в данном случае модель АРМ не вполне корректно отражает реальную ситуацию. Модель создана при условии среднего уровня динамического давления 2-3 нПа, но, как показано выше, в рассматриваемый период был зарегистрирован необычно высокий, более 30 нПа, уровень Psw .

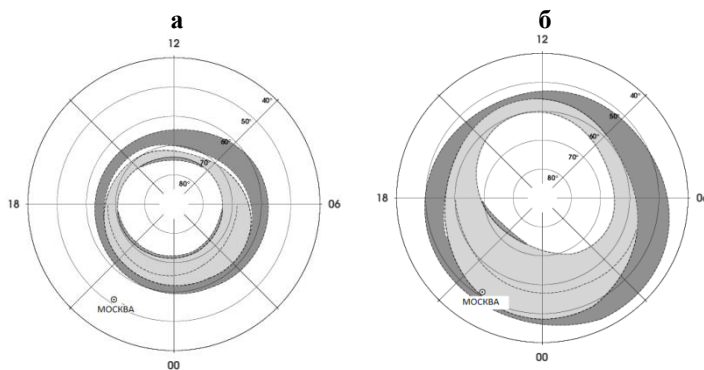


Рисунок 3. Глобальное распределение авроральных высыпаний по модели АРМ в 19:30 UT в период начала главной фазы магнитной бури: (а) при реальных геомагнитных параметрах $AL = -365$ нТл, $SYM/H = 47$ нТл; (б) при высоком уровне Psw .

Москвы относительно зоны авроральных высыпаний с учётом высокого динамического давления. При этих условиях станция наблюдения располагается внутри зоны авроральных высыпаний. Из сравнения положений авроральных овалов на рис. 3а и 3б видно, что в данном событии динамическое давление солнечного ветра сдвигает границу авроральных высыпаний примерно на 10° в более низкие широты.

Таким образом, в процессах, происходящих во время бури, существенную роль, наряду с магнитной активностью, играет высокое динамическое давление солнечного ветра.

Прохождение над Москвой зоны высыпаний во время главной фазы бури полностью подтверждается ионограммами, показанными на рис. 4. Следы от ~ 1.5 МГц до ~ 4.7 МГц (б) на высотах от ~ 110 км до $\sim 160 \div 190$ км являются чёткими признаками авроральных высыпаний.

Для изучения зависимости высоты $HmF2$ и критической частоты f_oF2 от геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра были рассмотрены данные в интервале наблюдений от скачка давления в момент SSC 22 июня до 04:40 UT 23 июня. Это время главной фазы магнитной бури и нахождения Москвы в зоне авроральных высыпаний. Рассматривались периоды ночных регистраций сигнала. Зависимость $HmF2$ и f_oF2 от индексов магнитной активности AL и Dst и динамического давления солнечного ветра Psw иллюстрирует рис. 5. Сплошные линии на рисунке соответствуют уравнениям линейной регрессии, на каждой панели рисунка указан коэффициент корреляции.

В работе [7, рис. 7], показано, что с ростом Psw происходит смещение авроральных высыпаний в более низкие широты. Для оценки величины такого смещения в рассматриваемом событии была использована следующая процедура. Рассмотрен пролёт спутника DMSP F16 в 19:27-19:34 UT, близкий к началу бури. Динамическое давление солнечного ветра в это время менялось от 40.7 нПа до 38.7 нПа. По данным спутника F16 определено положение экваториальной границы авроральных высыпаний на широте 50.4° CGL.

С помощью модели АРМ была смоделирована такая ситуация, когда в области траектории F16 данные спутника совпали с модельными значениями. Рисунок 3б демонстрирует положение

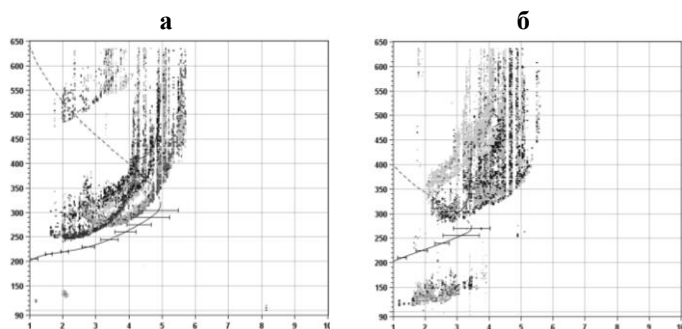


Рисунок 4. Ионограммы во время главной фазы магнитной бури 22 июня: (а) в 19:31 UT: $HmF2=315.5$ км, $foF2=4.95$ МГц. (б) в 19:46 UT: $HmF2=269.9$ км, $foF2=3.45$ МГц.

следует из правой панели рис. 5, поведение критической частоты на главной фазе бури не зависит ни от магнитной активности, ни от динамического давления. На протяжении всей главной фазы частота практически остается на одном уровне в пределах 3 МГц. Таким образом, на главной фазе только высота слоя F2 оказывается чувствительной к таким факторам как геомагнитная активность и динамическое давление солнечного ветра.

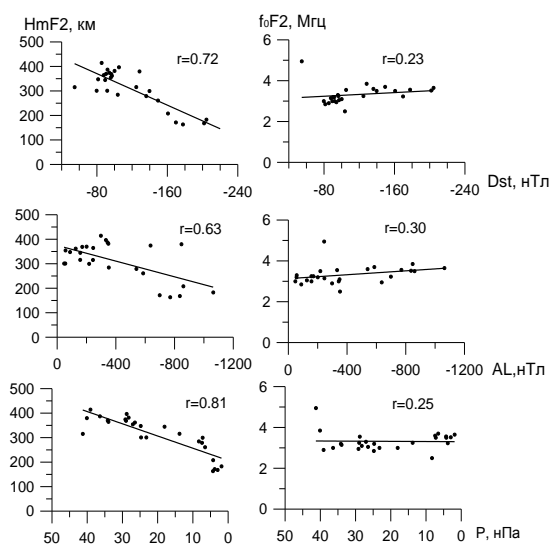


Рисунок 5. Зависимости высоты и критической частоты слоя F2 от геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра на главной фазе магнитной бури.

Как видно из рис. 1, динамика изменений $HmF2$ такова, что она совпадает с динамикой P_{sw} и по времени заканчивается одновременно с уменьшением давления еще до окончания главной фазы бури (03:00 UT). Резкий рост P_{sw} способствует росту высоты $HmF2$ от ~ 360 км до 400 км. Следующее затем постепенное ее уменьшение связано с ростом геомагнитной активности и уменьшением P_{sw} . В 03:00 UT динамическое давление достигает величины ~ 4 нПа, в это время $HmF2 \sim 200$ км, геомагнитная активность $AL = -939$ нТл и $Dst = -167$ нТл. Дальнейшее смещение слоя до ~ 150 км, которое регистрируется в максимуме бури, происходит за счет геомагнитной активности, что мы наблюдаем на рис. 1. Как

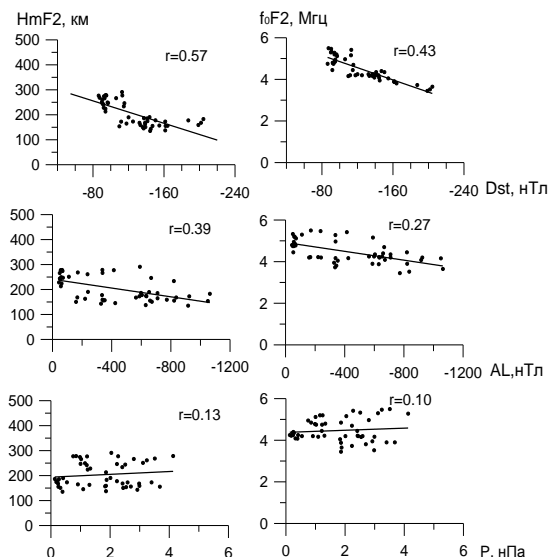


Рисунок 6. Зависимости высоты и критической частоты слоя F2 от геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра на фазе восстановления магнитной бури.

(в) Фаза восстановления магнитной бури (04:41 UT - 23:55 UT 23 июня).

В начале фазы восстановления магнитной бури Москва находилась в утреннем секторе MLT вне зоны авроральных высыпаний. Как и в течение предбуревого периода, индекс AL указывал на наличие существенной авроральной активности, длительное, примерно 4-х часовое увеличение AL-индекса с амплитудой до -1285 нТл в 12:10 UT и -1274 нТл в 18:15 UT. Индекс SYM/H составлял -106 нТл и -15 нТл соответственно. На рис. 6 для временного интервала 04:15 - 17:45 UT показаны зависимости высоты и критической частоты слоя F2 от геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра. Формат рисунка такой же, как рис. 2 и 5. Как видно из рисунка, с уменьшением геомагнитной активности происходит рост как критической частоты слоя, так и увеличение его высоты. Ни тот, ни другой параметр не зависят от динамического давления солнечного ветра.

4. Заключение

По данным среднеширотной ионосферной станции (Москва) исследована зависимость высоты $HmF2$ и критической частоты f_oF2 слоя F2 ионосферы от уровня геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра в период изолированной магнитной бури 22-23 июня 2015 г. Основные результаты исследований можно сформулировать следующим образом.

1. Показано, что во время главной фазы магнитной бури Москва располагается в районе высыпаний аврорального овала. В этих условиях параметры слоя F2 (высота, критическая частота) отличаются от параметров во время нахождения Москвы вне зоны высыпаний овала, т.е. до начала бури и в течение фазы ее восстановления.

2. Получены зависимости высоты $HmF2$ и критической частоты f_oF2 от геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра. Определено, что наиболее чувствительным параметром, реагирующим на изменение внешних условий, является высота слоя $HmF2$. В частности:

(а) В предбуревой период с увеличением геомагнитной активности уменьшается критическая частота и растет высота слоя F2. От изменения динамического давления зависит только частота f_oF2 , с уменьшением давления частота f_oF2 падает.

(б) На главной фазе бури только высота слоя F2 оказывается чувствительной к изменениям геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра. В течение всей главной фазы f_oF2 остается на уровне ~ 3 МГц.

(в) На фазе восстановления бури уменьшение геомагнитной активности сопровождается ростом критической частоты f_oF2 и высоты $HmF2$ слоя. Эти параметры не зависят от динамического давления солнечного ветра.

Литература

1. Деминов М.Г. Ионосфера земли: закономерности и механизмы // Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75. Москва, 2015, С. 295-346.
2. Шубин В.Н., Деминов М.Г. Глобальная динамическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия, 2019, Т. 59, № 4, С. 461–473.
3. Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор) // Гелиогеофизические исследования, 2013, выпуск 5, С. 1–33.
4. Bowman G.G. The nature of ionospheric spread-F irregularities in mid-latitude regions // J. Atmos. Terr. Phys., 1981, V. 43, N. 1, P. 65–79.
5. Palul K.S., Haralamdous H., Oikonomou C. et. al. Multi-station investigation of spread F over Europe during low to high solar activity // J. Space Weather Space Clim., 2018, V. 8, A27, doi: 10.1051/swsc/2018006
6. Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Y. Auroral Precipitation Model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // J. Atm. S.-Terr. Phys., 2013, V. 102, P. 157-171, doi: 10.1016/j.jastp.2013.05.007
7. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е. Ионное давление на границах авроральных высыпаний и его связь с динамическим давлением солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия, 2019, Т. 59, № 5, С. 582–593, doi: 10.1134/S0016794019050146

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.039

THE MICROWAVE MONITORING OF THE MIDDLE ATMOSPHERE OZONE ON KOLA PENINSULA DURING LAST THREE WINTERS

Y.Y. Kulikov¹, A.F. Andriyanov¹, V.G. Ryskin¹, V.M. Demkin²,
V.I. Demin³, A.S. Kirillov³, V.A. Shishaev³

¹*Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod*

²*High School of Economy, Nizhny Novgorod*

³*Polar Geophysical Institute, Apatity*

Abstract

This work presents long-term investigation of a nature of the middle atmosphere ozone variability using a method ground-based microwave radiometry. Measurements were carried out with the help of mobile microwave ozonemeter (observation frequency 110836.04 MHz) which was established in Polar Geophysical Institute at Apatity (67N, 33E). The parameters of the device allow to measure a spectrum of the emission ozone line for time about 15 min with a precision of ~ 2%. The error of estimating the vertical distribution of ozone on the measured spectra by above described device does not exceed 10-15%. On the measured spectra were appreciated of ozone vertical profiles in the layer of 22 – 60 km which were compared to satellite data MLS/Aura and with the data of ozonesondes at station Sodankyla (67N, 27E). The analysis of the microwave data on behavior of polar mesospheric ozone in past winters shows, that sudden stratospheric warming (SSW) can cause significant and long influence on its diurnal variation which should be determined by photochemical processes.

Microwave ground-based equipment used in the experiment

Method ground-based microwave radiometry is based on measurements of thermal atmospheric radiation in vicinity the ozone line in the range of millimeter and submillimeter waves. Microwave observations are weakly dependent on weather conditions and the presence of atmospheric aerosols, and this is an advantage compared with observations in the optical and infrared wavelength ranges. In addition, the microwave ozone observations can run around the clock. In recent years it is managed to make a significant step forward towards the creation of a new generation of mobile microwave spectrometers. The device consists of an uncooled heterodyne receiver tuned to a fixed frequency 110836.04 MHz corresponding to a rotational transition of ozone molecules $6_{0,6} - 6_{1,5}$, and multichannel spectrum analyzer. In front of receiver is a module that includes an antenna (scalar horn) and a switch to calibrate accepted intensity of atmospheric ozone radiation. Information about the content of the ozone is contained in the measured radio emission spectrum of the middle atmosphere. The error of estimating the vertical distribution of ozone from the measured spectra by above described device does not exceed 10-15%. A detailed description of the spectrometer and the method of measuring ozone of the middle atmosphere in the millimeter wavelength range are given in [1, 2].

The general character of the ozone variations in the middle atmosphere during three winters

Microwave measurements of ozone of the middle atmosphere in Apatity were performed for three winter seasons 2017 - 2018, 2018 - 2019 and 2019 - 2020. First our microwave observations in polar latitudes during these winter seasons were carried out in form of continuous series (several days nonstop) with a time resolution of 15 minutes. It should be emphasized that the method of ground-based microwave radiometry is one of the few that allows you to continuously monitor the behavior of ozone in the entire middle atmosphere at specific place with high temporal resolution. Figure 1 shows the ozone variations at altitudes of 25, 40 and 60 km (three winters). Sudden stratospheric warmings were recorded for each of the winter season. Ozone data obtained from ground-based microwave observations are indicated by separate crosses. Solid lines indicate ozone data at selected altitudes which were obtained from onboard MLS/Aura observations over Apatity.

The analysis of microwave observation data in Apatity indicates the appearance of low ozone densities at altitudes from 20 to 60 km in the winter polar middle atmosphere. At one time, a stable relationship of a simultaneous decrease of temperature and O₃ concentration at the level of 25 km was established, that repeated in different years (winter-spring season) [3, 4]. For example, in December 2002, the average ozone density at an altitude of 25 km had a value of $(1.99 \pm 0.23) \cdot 10^{12}$ mol/cm³, and the temperature at 20 hPa dropped below 195 K. According to the zonal model of the middle atmosphere [5] the ozone density at this altitude in December exceeds the monthly average measured one by (30-50)%. Low temperatures are a sign of the impact on the stratosphere of the polar vortex, the degree of its influence varies from year to year. The vortex prevents the exchange of air masses between polar and

moderate latitudes, and this leads to a significant decrease of temperature at altitudes of 20-30 km. And why the ozone density decreases at altitudes of about 25 km inside the vortex is not entirely clear. The lifetime of ozone at these altitudes is about a month. Variations of O_3 concentration at altitudes of 25 and 40 km for the seasons 2017-2018 and 2018-2019 are in satisfactory agreement with the data of on-board observations. And the ozone variations are controlled by both the polar vortex and the SSW that occurred during these winter-spring seasons. In the winter of 2019-2020 stratospheric warming was short-lived, and the temperature at the level of 25 km again returned to low values - significantly below 200 K. The average daily vertical profiles of ozone concentration at selected altitudes of 25, 40 and 60 km for three winters - 2017-2018, 2018-2019 and 2019-2020 were obtained from ground-based microwave observations in polar latitudes too. These data are labeled by bold crosses. For an altitude of 60 km the diurnal variation of O_3 concentration is shown which is associated with sunrise and sunset. Night and day concentrations of O_3 are indicated by bold and translucent crosses, respectively. Solid lines indicate the onboard data (MLS/Aura) during the flight over the Apatity.

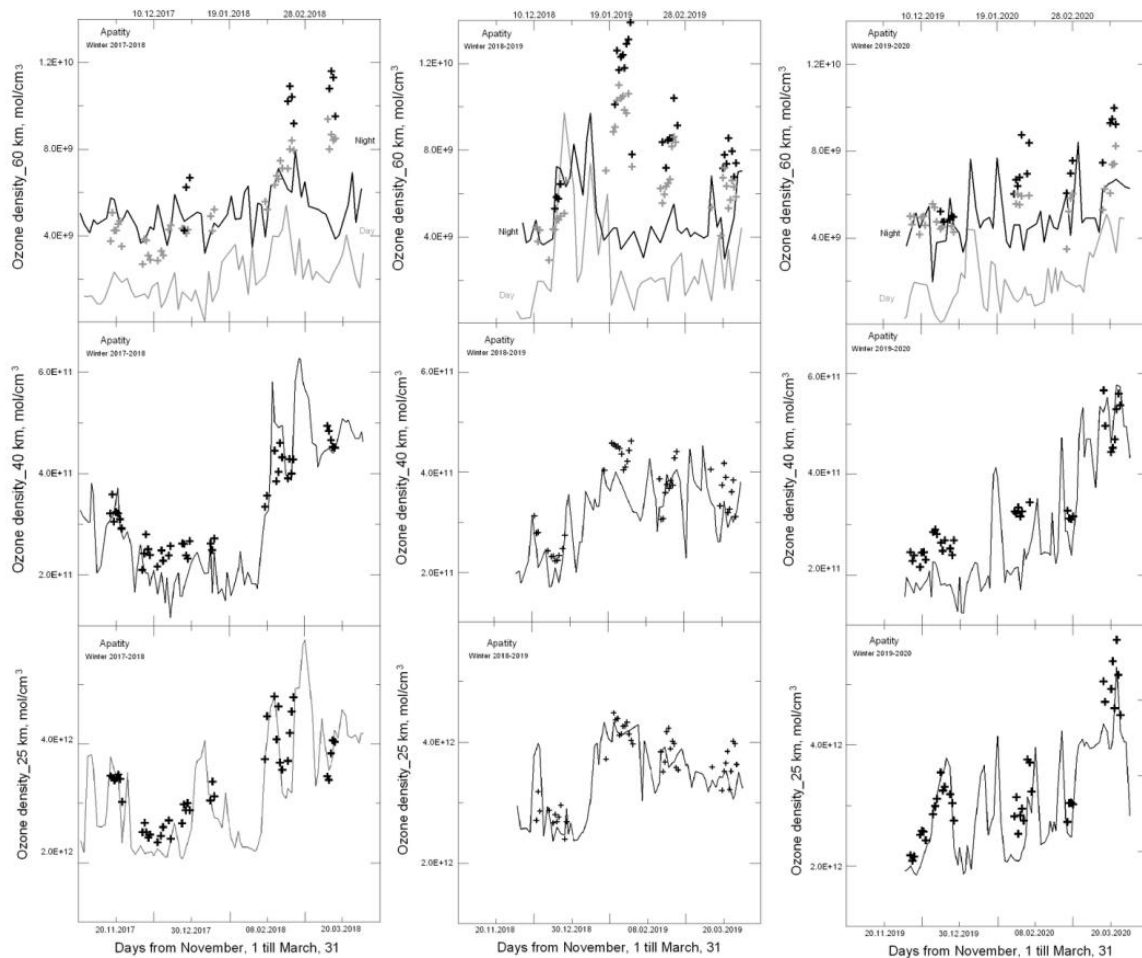


Figure 1. The ozone concentrations at altitudes 25, 40 and 60 km for three winters. The ground-based microwave measurements (crosses); satellite MLS/Aura millimeter wave measurements (continuous lines).

It should be looking at systematic difference in the behavior of mesospheric ozone (60 km) data from ground-based and on-board measurements (see the upper part of Fig. 1). It should be noted that on-board measurements surely register the diurnal variation of mesospheric ozone. Ozone concentration data were obtained for night flights (bold solid line) and daytime flights (translucent solid line) over Apatity. Ground-based measurements of O_3 with a time resolution of 15 minutes showed a strong and long-term influence of SSW on mesospheric ozone. A possible consequence of stratospheric warming is short-term (several days) splashes of O_3 at an altitude of 60 km. They are especially noticeable for the winters of 2017-2018 and 2018-2019. Apparently these disturbances are specific for the polar latitudes [6]. The third winter of 2019-2020 was significantly different from previous winters. The polar vortex occurred this winter provided very low temperatures in the altitude interval of 20-30 km for a long time (about two months – December-January) and stratospheric warming in mid-January 2020 was very weak and not long-term. Thus, conditions were created for the spring lack of ozone over the Kola Peninsula. Nevertheless Fig. 1 (right panel) shows that in March there was a lot of ozone in the altitude interval from 20 to 40 km. Deficit of ozone content occurred in the lower stratosphere (12-20 km) above the Northern Ocean, Western Hemisphere in March 2020 [7].

The total content on March 12, 2020 was 205 DU. According to the authors [7] the reason for the decrease of ozone content is the chemical loss associated with chlorine radicals.

In Figure 2 represents the data of ozone concentrations at an altitude of 25 km in the winter-spring periods 2017-2018 and 2019-2020 according to ground-based (Apatity) and onboard (MLS/Aura) measurements on millimeter waves in comparison with contact measurements that were performed at the Sodankyla station using ECC-4 type ozonesonde. Distance between Apatity and Sodankyla about 400 km to the west.

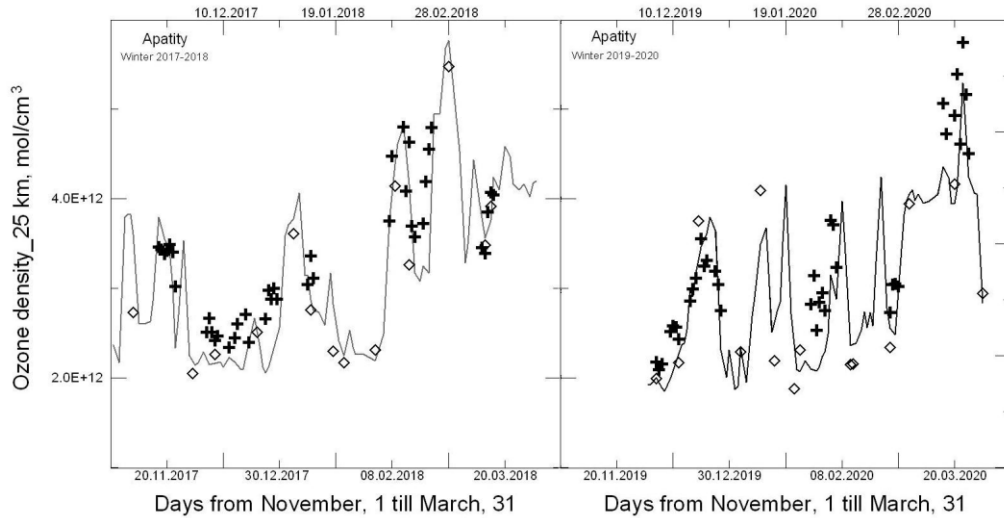


Figure 2. Comparison of the data of ozone concentration (altitude 25 km) which were received by remote sensing and contact methods during winter-spring seasons 2017-2018 and 2019-2020 above Apatity. Crosses – daily average of ozone concentration from ground-based microwave measurements; continuous lines – data of ozone from satellite (MLS/Aura); open rhombuses – data of ozone from ozonesonde ECC-4 at station Sodankyla.

Comparison of remote and contact methods has shown the satisfactory consent in an estimation of concentration of ozone in an interval of height of 20-30 km. In December 2017 and 2019 completely different character of behaviour of ozone concentration (25 km) in the period of very low temperatures in a stratosphere which was confirmed with independent methods of measurements is marked. In December 2019 fast and short-term growth of concentration of ozone from $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ up to $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ was observed.

In a Fig. 3 diurnal variations of ozone at 60 km which were received from continuous measurements (temporal resolution 15 min) in December, 28 2017 near to a winter solstice before SSW and February 20 2018 after SSW are resulted.

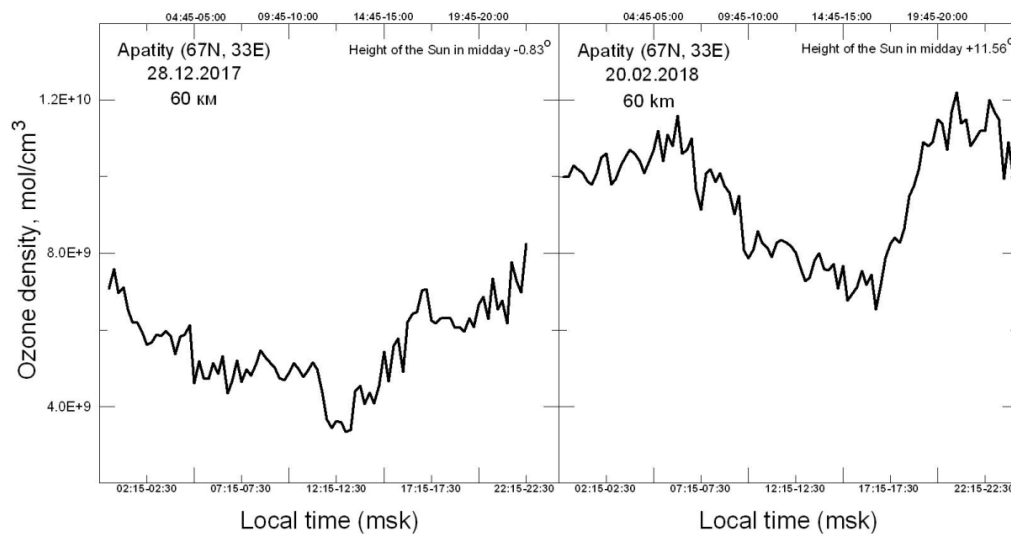


Figure 3. Diurnal variations of mesospheric ozone obtained by ground-based microwave radiometry in polar night (left panel) and in middle of February 2018 after sudden stratospheric warming (right panel) above Apatity.

Note the significant variations in the O₃ density, which apparently are not associated with sunrise and sunset. The amplitude of changes in ozone density reached 80%. The data given in a Fig. 3 show on a priority of dynamic processes above photochemical in polar mesosphere. The average decreasing of ozone density in midday concerning midnight has made 25%. The right panel of a Fig. 3 specifies significant influence of warming on mesospheric ozone.

Conclusion

- The analysis of the microwave data on behavior of polar mesospheric ozone in past winters shows, that SSW can cause significant and long influence on its diurnal variation which should be determined by photochemical processes.
- Thus is important, that microwave observations were carried out during a deep minimum of a solar cycle.
- It is established, that the mesospheric ozone amount can change from winter to winter almost in up two times. Apparently, dynamic processes through SSW influence on transfer of ozone from low latitudes.

Acknowledgments

The work was supported the Russian Foundation for Basic Research, grant number 18-45-520009.

References

1. Kulikov Y.Y., Krasilnikov A.A., Ryskin V.G., Shanin V.N., Shchitov A.M. Ground-based microwave instrument to research of stratospheric ozone (some results of observations). Proc. XXX Annual Seminar, Apatity, P. 218-221, 2007.
2. Krasilnikov A.A., Kulikov Y.Y., Mazur A.B., Ryskin V.G., Serov N.V., Fedoseev L.I., Shvetsov A.A. Detection of «ozone clouds» in the upper stratosphere of the Earth by means of microwave radiometry technique. Geomag. Aeron. (Eng. Transl.), V. 37, P. 385-391, 1997.
3. Kulikov Yu.Yu., Ryskin V.G., Krasilnikov A.A. Microwave sounding measurements of the ozone layer in the polar and mid-latitude stratosphere in the winter seasons of 1998-2001. Izv. Acad. Sci. Atmos. and Oceanic Phys., V. 39, P. S56-S61, 2003.
4. Kulikov Y.Y., Ryskin V.G., Krasilnikov A.A., Kukin L.M. Microwave observations of ozone variability in the high-latitude stratosphere in winter of 2002-2003. Radiophysics and Quantum Electronics, V. XLVII, № 2, P. 134-141, 2005.
5. Keating G.M., Pitts M.C., Young D.F. Ozone reference models for the middle atmosphere (New CIRA). Handbook for MAP, V. 31, P. 1-36, 1989.
6. Kulikov Yu.Yu., Poberovskii A.V., Ryskin V.G., Yushkov V.A. Detection of large fluctuations in ozone content in the middle atmosphere during sudden stratospheric warmings and subpolar latitudes of the Arctic. Geomag. Aeron., V. 60, P. 254-262, doi:10.1134/S0016793220020097, 2020.
7. Manney G.L., Livesey N.J., Santee M.L., Froidevaux L., Lambert A., Lawrence Z.D., Millán L.F., Neu J.L., Read W.G., Schwartz M.J., Fuller R.A. Record-low Arctic stratospheric ozone in 2020: MLS observations of chemical processes and comparisons with previous extreme winters. Geophysical Research Letters, V. 47, Is. 16, article id. E89063, 2020.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.040

АНАЛИЗ ИЗЛУЧАЕМЫХ ПОЛОС ЧЕМБЕРЛЕНА И ГЕРЦБЕРГА I В СПЕКТРЕ СВЕЧЕНИЯ НОЧНОГО НЕБА ЗЕМЛИ

О.В. Антоненко, А.С. Кириллов

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия

Аннотация

Проведены расчеты профилей интенсивностей свечения полос Чемберлена и Герцберга I молекулярного кислорода в ионосфере Земли в ночное время. Выполнено сравнение расчётов интегральных интенсивностей полос Чемберлена и Герцберга I с экспериментальными данными, полученными с космического шаттла "Дискавери" (STS-53) и со спектрографа "EbertFastie" (национальная обсерватория КИТТ – ПИК, США, Аризона). Показано, что наилучшее согласие наблюдается при коррекции квантовых выходов колебательных уровней $A^3\Delta_u$ и $A^3\Sigma_u^+$ состояний молекулярного кислорода при тройных столкновениях, а также при коррекции коэффициентов Эйнштейна, которые были опубликованы ранее в научной литературе.

Ключевые слова: интенсивности свечения молекулярных полос, космический шаттл, колебательные уровни, состояния электронно-возбуждённого молекулярного кислорода.

1. Введение

Одним из источников свечения ночной атмосферы является электронно-возбуждённый молекулярный кислород $O_2(A^3\Delta_u, A^3\Sigma_u^+)$. На высотах толщиной около 10 км с центром на высоте около 90 км, происходит трёхчастичная рекомбинация, в результате которой образуются электронно – возбуждённые молекулы O_2 . В дальнейшем электронно-возбуждённая молекула кислорода переходит в более низкое по энергии состояние, излучая при этом фотоны света от ультрафиолетовой до инфракрасной области спектра [1].

Сообщество в области аэронавтики все больше интересуется корреляцией измерений ночного свечения неба, полученных наземными приборами, с измерениями, полученными с летательных аппаратов. Во время космических наблюдений со спутников выполняются эксперименты, работающие в режиме моментального снимка с использованием высокопроизводительного оборудования в течение ограниченного времени полета, когда спутник находится над наземной станцией. Единственная космическая платформа, в настоящее время при тщательном планировании наблюдения способная ликвидировать разрыв между наборами спутниковых и наземных данных - это космический шаттл или космическая транспортная система (STS). Несмотря на то, что полет шаттла короткий, обычно всего 7-12 дней, скорость передачи данных высокая, тем более, что наблюдения также могут повторяться каждые 90 минут при прохождении по орбите над многими наземными станциями. Эти локализованные наблюдения с орбиты могут быть столь же значимыми, как и любая наземная кампания наблюдений [2].

В настоящей работе используются спектры, полученные с космического шаттла на протяжении его 11-дневной миссии STS 53, совершившего полет 7-18 сентября 1995 года. Также в работе используются спектры, полученные с пика КИТТ на высоте 2080 м (Национальная обсерватория КИТТ – ПИК, США, Аризона), измеренные спектрографом "EbertFastie".

Цель данной работы – провести сравнение результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения полос Чемберлена и Герцберга I с экспериментальных данными по ночному свечению молекулярного кислорода O_2^* в атмосфере Земли. При этом особое внимание будет уделено особенностям образования различных колебательных уровней v' электронно-возбуждённых состояний $A^3\Delta_u$ и $A^3\Sigma_u^+$ молекулы кислорода в результате тройных столкновений.

2. Свечение ночного неба Земли

На рисунке 1 представлены несколько спонтанных излучательных переходов с различных колебательных уровней состояния $A^3\Delta_u$ на различные колебательные уровни основного состояния $a^1\Delta_g$, при которых происходит излучение наиболее ярких полос Чемберлена. Так же приведено несколько спонтанных излучательных переходов с различных колебательных уровней состояния $A^3\Sigma_u^+$ на различные колебательные уровни состояния $X^3\Sigma_g^-$, при которых происходит излучение полос Герцберга I. Все приведённые состояния находятся ниже энергии диссоциации молекулы $O_2 \sim 41300 \text{ см}^{-1}$ ($8065 \text{ см}^{-1} = 1 \text{ эВ}$). Поскольку переходы между рассмотренными нами состояниями дипольно-запрещенные, то характерные излучательные времена

состояний $A^3\Delta_u$ и $A^3\Sigma_u^+$ порядка 1 и 0.1 секунды, соответственно [3]. Таким образом, даже при давлениях значительно меньше нормального атмосферного столкновительное время жизни состояний $A^3\Delta_u$ и $A^3\Sigma_u^+$ намного меньше излучательного и их кинетика во многом определяется столкновительными процессами.

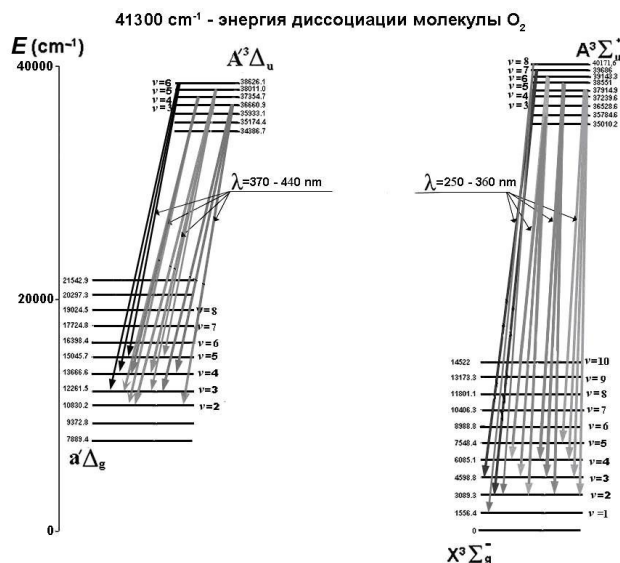


Рисунок 1. Электронные переходы внутри молекулы O_2 .

Проведем расчеты концентраций возбуждённого кислорода $\text{O}_2(A^3\Delta_u)$ и $\text{O}_2(A^3\Sigma_u^+)$ и на высотах верхней атмосферы Земли для колебательных уровней $v'=3-8$ для октября месяца, 1976 и 1986 г.г. (низкая солнечная активность, $F_{10.7} = 75$) [4]. При расчетах учтем гашение электронно-возбужденной молекулы $\text{O}_2(A^3\Delta_u)$ и $\text{O}_2(A^3\Sigma_u^+)$ и при излучательных переходах, и при столкновениях с молекулами азота N_2 и кислорода O_2 [5]. Аналитическая формула для расчета квантовых выходов $q_{v'}^{A'}$ и $q_{v'}^A$ была представлена в [5].

3. Результаты моделирования

На рисунке 2 (а, в) представлены фрагменты усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 250-360 нм (2500-3600 Å) и, соответственно, в диапазоне 370-440 нм (3700-4400 Å), измеренного спектрографом с космического шаттла “Дискавери” (STS-53) в интервале от 115 до 900 нм на протяжении его 12-дневной миссии в январе 1995 года (условия низкой солнечной активности) [2]. По осям Y отложены значения интенсивностей в рэлях/ангстрем ($\text{R}/\text{Å}$), по осям X отложены длины волн в ангстремах ($\lambda(\text{Å})$). Также представлены рассчитанные значения интегральной светимости $I(\text{cm}^{-2}\text{c}^{-1})$ (гистограммы 3б, 3г) для различных полос Чемберлена и Герцберга I, выполнены для октября 1976 и 1986 г.г. (условия низкой солнечной активности $F_{10.7} = 75$). Как показали расчеты, наблюдается расхождение рассчитанных значений интегральной светимости с экспериментальными значениями для 2, 3 и 4 колебательных уровней в случае полос Чемберлена и для 3 и 4 колебательных уровней в случае полос Герцберга. Данное расхождение, возможно, объясняется либо заниженными значениями квантовых выходов $q_{v'}$ для данных уровней, либо завышенными значениями константы скорости реакции рекомбинации при тройных столкновениях, которая применялась как рассчитанная величина в зависимости от температуры атмосферы на рассмотренном интервале высот согласно [6]. Поэтому мы в настоящих расчетах варьируем значения нормирующих коэффициентов квантовых выходов, увеличив их значения приблизительно на 1/3 для 3 и 4 колебательных уровней состояния $A^3\Sigma_u^+$ и, приблизительно в 4 раза для 2, 3 и 4 колебательных уровней состояния $A^3\Delta_u$. Соответственно, значения нормирующих коэффициентов квантовых выходов для других колебательных уровней были уменьшены. При использовании измененных квантовых выходов $q_{v'}^A$ было достигнуто лучшее согласие рассчитанных спектров интегральной светимости возбуждённого кислорода $\text{O}_2^*(A^3\Sigma_u^+, v'=3-8)$ со спектрами, полученными с шаттла [2] - экспериментальными данными свечения ночного неба в диапазоне 250-360 нм (2500-3600 Å), что хорошо видно из рисунка 2 (б).

Для состояния $\text{O}_2(A^3\Delta_u, v'=3-6)$, как показали расчеты, выявилось серьёзное расхождение рассчитанных интегральных светимостей со спектрами, полученными с шаттла [2] - экспериментальными данными свечения ночного неба в диапазоне 370-440 нм (3700-4400 Å). В настоящих расчетах варьирование значения нормирующих коэффициентов оказалось не применимо, поскольку значения коэффициентов Эйнштейна для состояния $\text{O}_2(A^3\Delta_u, v')$ значительно изменяются относительно друг друга (на несколько порядков), чего не наблюдается в аналогичных значениях для состояния $\text{O}_2(A^3\Sigma_u^+, v')$. В настоящей работе были проведены коррекции коэффициентов Эйнштейна [3] для состояния $\text{O}_2(A^3\Delta_u, v'=3-6)$, после чего стало возможным

получить хорошее согласие рассчитанных спектров интегральной светимости (гистограмм) со спектрами, полученными с летательного аппарата [2], варьируя значения нормирующих коэффициентов для вышеуказанного состояния O_2^* . Это видно из рисунка 2 (г).

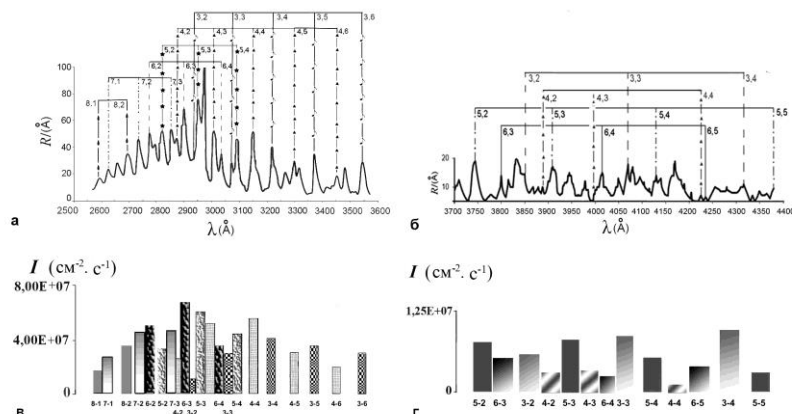


Рисунок 2. Фрагменты усредненного спектра свечения ночного неба, рассчитанные значения интегральной светимости для различных полос Герцберга I с учетом измененных квантовых выходов q_{v^A} , для различных полос Чемберлена с учетом измененных квантовых выходов $q_{v^{A'}}$ [5] и измененных коэффициентов Эйнштейна [3].

Так же представлены на рисунке 3(а) значения спектра свечения ночного неба в диапазоне длин волн 370-440 нм (3700-4400 Å), измеренного спектрографом “EbertFastie” с пика КИТТ на высоте 2080 м (Национальная обсерватория КИТТ – ПИК, США, Аризона) [7], 3 (в) - рассчитанные значения интегральной светимости для различных полос Чемберлена с учетом измененных квантовых выходов $q_{v^{A'}}$ [5] и измененных коэффициентов Эйнштейна [3]. По оси Y – интенсивности ($R/\text{Å}$), X – длины волн λ (Å). В УФ длинах волн (3100-4500 Å) использовался ультрафиолетовый источник низкой яркости [8]. Обсерватория функционирует с 1958 г., однако, автор описывает наблюдения, ссылаясь на труды 1961-1964 г.г. – период низкой солнечной активности.

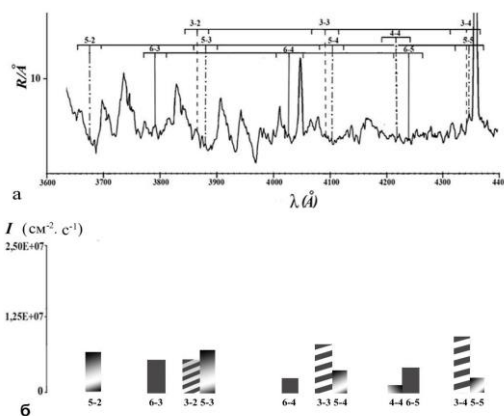


Рисунок 3. Фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба, рассчитанные значения интегральной светимости для различных полос Чемберлена.

В данном случае удовлетворительное согласие результатов расчетов с экспериментальными данными с шаттла “Дискавери” (STS-53) [2] и с обсерватории КИТТ – ПИК [7], удалось получить благодаря коррекции коэффициентов Эйнштейна [3] и квантовых выходов $q_{v^{A'}}$, которые в [5] аппроксимировались аналитической формулой. В большинстве случаев спектральных измерений (как и в [2; 7]), результаты представляются в виде кривых без разрешения по вращательной структуре. Поэтому в настоящей работе мы проводим сравнение результатов расчета (гистограмм) с максимальными значениями кривых для каждого рассмотренного излучательного перехода.

На рисунке 4 (а, б) показано графическое отображение исходных и измененных значений квантовых выходов $q_{v^{A'}}$ и q_{v^A} . По осям Y приведены значения квантовых выходов, по осям X приведены значения колебательных уровней v' . Профили измененных значений $q_{v^{A'}}$ и q_{v^A} даны пунктирными линиями.

Рассчитаны соотношения объёмной интенсивности излучения для состояния $A^3\Sigma_u^+$, с которого происходит переход Герцберга I, и состояния $A^3\Delta_u$, с которого происходит переход Чемберлена, для колебательных уровней $v'=3-8$, за октябрь месяц 1976 и 1986 г.г., при низкой солнечной активности $F_{10.7}=75$. Интенсивность излучения полос Чемберлена составляет $\approx 40\%$ от интенсивности излучения полос Герцберга I, что показано авторами: [1, 2].

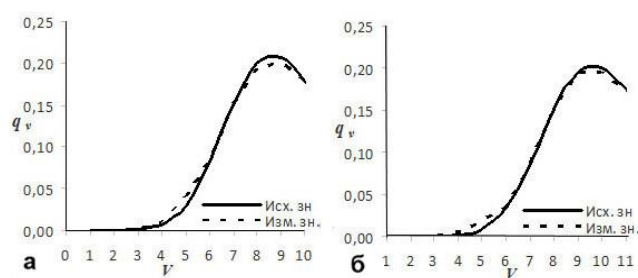


Рисунок 4. Исходные и изменённые значения квантовых выходов для состояний $A^3\Sigma_u^+$ (а) и $A^3\Delta_u$ (б).

4. Заключение

Получены значения интегральной светимости полос Герцберга I, обусловленных излучательными переходами с колебательных уровней $v'=3-8$ электронно-возбуждённого кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ для условий низкой ($F_{10.7}=75$, 1976 и 1986 г.г.) солнечной активности для средних широт. Проведено сравнение рассчитанных значений интегральной светимости полос Герцберга I в условиях низкой солнечной активности с экспериментальными данными, полученными в диапазоне длин волн 250-360 нм (2500-3600 Å) спектрографом с космического шаттла [2] в условиях низкой солнечной активности (сентябрь 1995 г.). Сравнение экспериментальных данных с рассчитанными значениями интенсивностей полос показало, что лучшее согласие наблюдается после коррекции квантовых выходов колебательных уровней q_{v^A} состояния $A^3\Sigma_u^+$ в результате тройных столкновений, которые были представлены в [5].

Получены значения интегральной светимости полос Чемберлена, обусловленных излучательными переходами с колебательных уровней $v'=3-6$ электронно-возбуждённого кислорода $O_2(A^3\Delta_u)$ для условий низкой ($F_{10.7}=75$, 1976 и 1986 г.г.) солнечной активности для средних широт. Проведено сравнение рассчитанных значений интегральной светимости полос Чемберлена в условиях низкой солнечной активности с экспериментальными данными, полученными в диапазоне длин волн 370-440 нм (3700-4400 Å), спектрографом с космического шаттла [2] и с обсерватории КИТТ – ПИК [7] в условиях низкой солнечной активности. Сравнение экспериментальных данных с рассчитанными значениями интенсивностей полос показало, что удовлетворительного согласия удалось достигнуть, благодаря коррекции коэффициентов Эйнштейна [3] и квантовых выходов q_{v^A} состояния $A^3\Delta_u$ в результате тройных столкновений, которые были представлены в [5].

Литература

1. Slinger T.G., Copeland R.A. Energetic Oxygen in the Upper Atmosphere and the Laboratory // Chem. Rev. V.103. №12. P.4731-4765. 2003.
2. Broadfoot A.L., Bellaire P.J., Jr. Bridging the gap between ground-based and space-based observations of the night airglow // Journal of Geophysical Research. V.104. №A8. P.17127-17138. 1999.
3. Bates D.R. Oxygen band system transition arrays // Planet. Space Sci.. V.37. №7. P.881-887. 1989.
4. Антоненко О.В., Кириллов А.С. Моделирование спектра свечения ночного неба Земли для систем полос, излучаемых при спонтанных переходах между различными состояниями молекулы электронно-возбуждённого кислорода // Известия РАН. Серия физическая. Т.85. №3. С.310-314. 2021.
5. Кириллов А.С. Моделирование населенностей колебательных состояний молекулярного кислорода, исходных для полос Герцберга, на высотах нижней термосферы и мезосферы // Геомагнетизм и Аэронавтика. Т.52. №2. С.258-264. 2012.
6. Krasnopolsky V.A. Excitation of the oxygen nightglow on the terrestrial planets // Planet. Space Sci.. V.59. №8. P.754-766. 2011.
7. Broadfoot A.L., Kendall K.R. The Airglow Spectrum, 3100-10,000 Å // J. Geophys. Res.. V.73. №1. P.426-428. 1968.
8. Broadfoot A.L., Hunten D.M. Excitation of N_2 band systems in aurora // Can. J. Phys.. V.42. №6. P.1212-1230. 1964.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.041

ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В ПРИБРЕЖНЫХ И ЦЕНТРАЛЬНЫХ РАЙОНАХ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

В.И. Демин, Б.В. Козелов, А.В. Лосев

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия

Аннотация. Рассмотрены сезонные и пространственные вариации поля температуры воздуха в пограничном слое атмосферы на территории Мурманской области. Временные вариации над Мурманском, Апатитами и Кандалакшей происходят в значительной степени синхронно на всех высотах. Пространственные различия в термической структуре ПСА в среднем достигают 1°C зимой и 2°C летом. Неоднородности вызваны большими расстояниями между пунктами измерений и с неодинаковым воздействием Баренцева и Белого моря на тепловой режим прибрежных территорий.

Введение

Информация о температуре воздуха в пограничном слое атмосферы используется в широком спектре прикладных задач. Фактически единственным источником ее получения является радиозондирование атмосферы. На территории Мурманской области оно проводится на аэрологических станциях в Мурманске и Кандалакше. Недостатком радиозондирования является низкое временное разрешение получаемых данных (как правило, выпуск зонда происходит только 2 раза в сутки). Ситуация осложняется также положением станций зондирования вблизи морских акваторий, которые искажают поле температуры не только в приземном слое, но и на высотах.

С августа 2020 г. в г. Апатиты установлен вертикальный температурный профилометр МТП-5РЕ. Микроволновой одноканальный радиометр с фиксированной частотой вблизи максимума поглощения молекулярного кислорода (60 ГГц или длина волны 5 мм) по характеристикам измеренного излучения (зависимости радиояркостных температур от угла наблюдения) восстанавливается профиль температуры) в слое до 1 км с разрешением по высоте от 10 до 50 м и с временным шагом 5 мин. Подробные характеристики прибора изложены на сайтах www.mtp5.ru и www.attex.net.

Целью данной работы является сравнение данных о вертикальном распределении температуры воздуха над Мурманском, Кандалакшей и Апатитами и оценка возможности привлечения данных радиозондирования в Мурманске и Кандалакше для описания высотного распределения температуры воздуха над центральных районами области.

Данные

В работе использованы данные аэрологического зондирования на станциях Мурманск и Кандалакша (сайт: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) и данные измерений температурным профиломером МТП-5РЕ в Апатитах (Полярный геофизический институт).

Результаты и обсуждение

Особенности сезонной и пространственной изменчивости температуры воздуха в пограничном слое атмосферы (ПСА) на севере и юге области отражены на рис. 1. Высота на рис. 1а и 1б отсчитывается от поверхности земли. Так как высотные отметки станций аэрологического зондирования в Мурманске и Кандалакше разные (121 и 26 м н.у.м. соответственно), а оба пункта аэрологического зондирования расположены вблизи морских акваторий, сравнение температур на рис. 1в выполнено на одинаковых высотах относительно уровня моря.

В теплое полугодие среднемесячная температура воздуха с высотой убывает. В холодное время года картина сложнее: температура, как правило, возрастает до некоторой высоты, над ним располагается слой изотермии или слабого изменения, и только далее она начинает понижаться. Эта закономерность прослеживается на обеих станциях зондирования (рис. 1а, б). Зимой температура воздуха в ПСА над Мурманском выше, чем над Кандалакшей. Это обусловлено воздействием теплых течений незамерзающего Баренцева моря – более сильным, чем тепляющее влияние Белого моря. Наибольшие термические различия между Мурманском и Кандалакшей проявляется не в нижних слоях ПСА (здесь поступающие морские

воздушные массы охлаждаются при контакте с выхолаженной поверхностью суши), а на высотах 400-800 м (рис. 1в). Выше отепляющее влияние Баренцева моря заметно снижается и уже к 2 км температуры над Мурманском и Кандалакшей близки. Летом температура воздуха на высотах уменьшается с юга на север и ее значения над Мурманском ниже, чем над Кандалакшей. Наибольшая разность наблюдается снова не у поверхности, а на некоторой высоте (рис. 1в). Это указывает на охлаждающее воздействие Белого моря – без этого влияния термический контраст между северным и южным побережьем был бы сильнее у поверхности. Весной и осенью влияние морей на тепловой режим прилегающих слоев атмосферы становится слабее, и контрасты температуры между побережьями сглаживаются.

Очевидные признаки морского воздействия на температурный режим атмосферы ставят вопрос о корректности использования данных, полученных на прибрежных станциях зондирования, для центральных (удаленных от морей) районов области. В 2020-21 гг. в г. Апатиты были проведены измерения вертикального распределения температуры воздуха с помощью микроволнового профилера МТП-5РЕ. Установка прибора позволяет проводить измерения в слое до 1200 м н.у.м. Для последующего сравнения характеристики температуры воздуха над Апатитами рассчитывались в те же сроки, что и запуски аэрологических зондов (0 и 12 UT).

По измерениям зимой 2020-21 гг. температура над Апатитами оказалась ниже, чем над Мурманском и Кандалакшей. Формирующаяся в центре Кольского п-ова небольшая область пониженных температур, обнаруживаемая в приземном слое по климатическим картам (см., например, [2]), по всей видимости, распространяется и на ПСА. В летний период температура воздуха по линии Мурманск-Апатиты-Кандалакша на высотах повышается с севера на юг: над Апатитами температура ниже, чем над Кандалакшей и выше, чем над Мурманском (рис. 2).

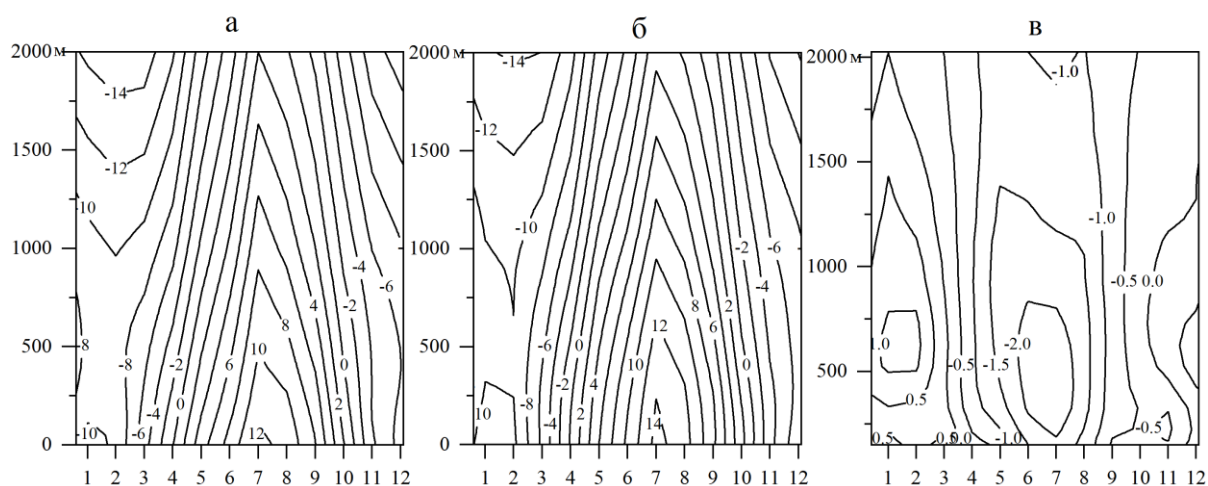


Рисунок 1. Среднемесячные (2007-2018 гг.) значения температуры воздуха на разных высотах: а – Мурманск, б – Кандалакша, в – разность между Мурманском и Кандалакшей.

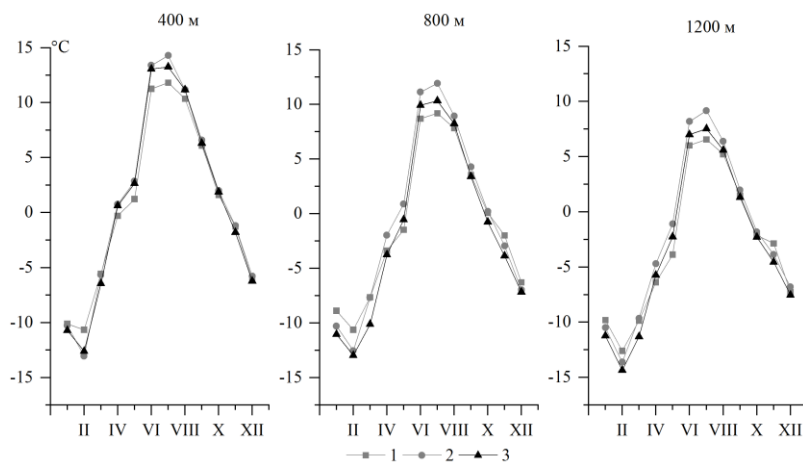


Рисунок 2. Годовой ход среднемесячных температур воздуха на разных высотах над Мурманском (1), Кандалакшей (2) и Апатитами (3), 2020-2021 гг.

В моменты времени, когда пункты измерений оказывались по разные стороны атмосферных фронтов, разделяющих воздушные массы с контрастными термическими характеристиками, разность температур между ними достигала многих градусов. Но в среднем в период 2020-21 гг. над Апатитами в слое 200-1200 м н.у.м. оказалось холоднее, чем в Кандалакше, на 0.4°C зимой и на 0.9°C летом. По отношению к Мурманску разность оказалась неоднозначной: зимой над Апатитами на 1.2°C холоднее, летом на 1.1°C теплее. Приведенные количественные соотношения температур (Апатиты относительно Мурманска и Кандалакши) получены по наблюдениям, выполненным в течение всего одного года. Этого периода недостаточно для определения устойчивых средних многолетних оценок – значения могут быть искажены особенностями метеорологических условий конкретного сезона. По этой причине представленные результаты можно считать предварительными. Однако, так как вариации температуры воздуха над Мурманском, Апатитами и Кандалакшей на всех исследуемых высотах (до 1200 м н.у.м.) имеют очень схожий характер (рис. 3, табл.), можно предположить, что качественно картина не отличается сильно и в другие годы.

Особенности суточного хода температуры на разных высотах могут быть исследованы только по результатам измерений МТП-5РЕ над Апатитами. Амплитуда суточного хода температуры изменяется в зависимости от сезона и максимальна у поверхности земли (рис. 4). В ноябре - феврале суточный ход температуры практически отсутствует даже на нижних уровнях, но с апреля по август внутрисуточные колебания с разной амплитудой обнаруживаются во всем слое до 1200 м н.у.м.

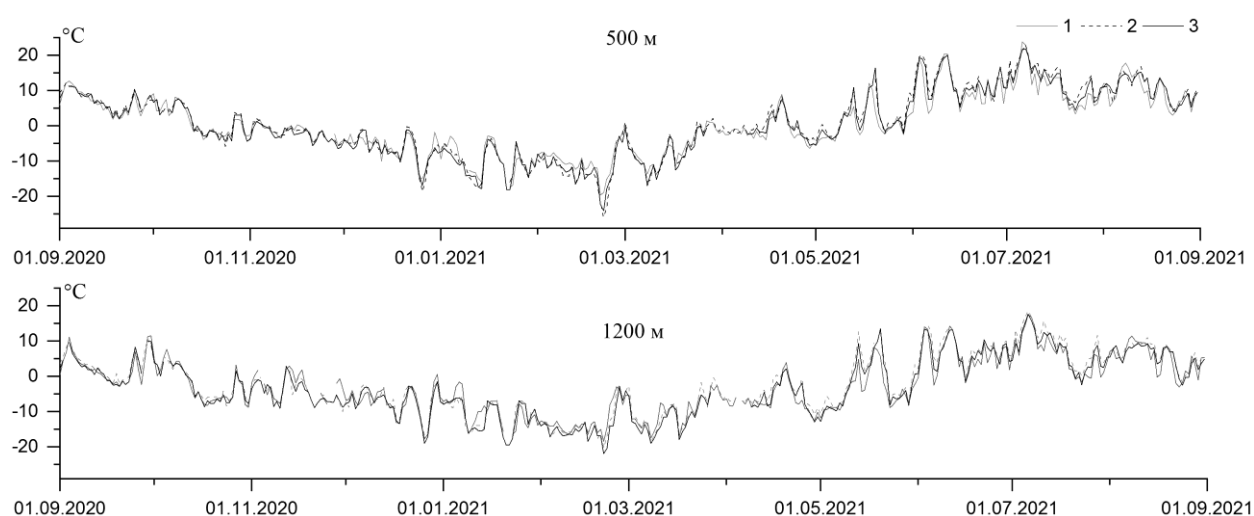


Рисунок 3. Среднесуточные температуры воздуха на разных высотах над Мурманском (1), Кандалакшей (2) и Апатитами (3).

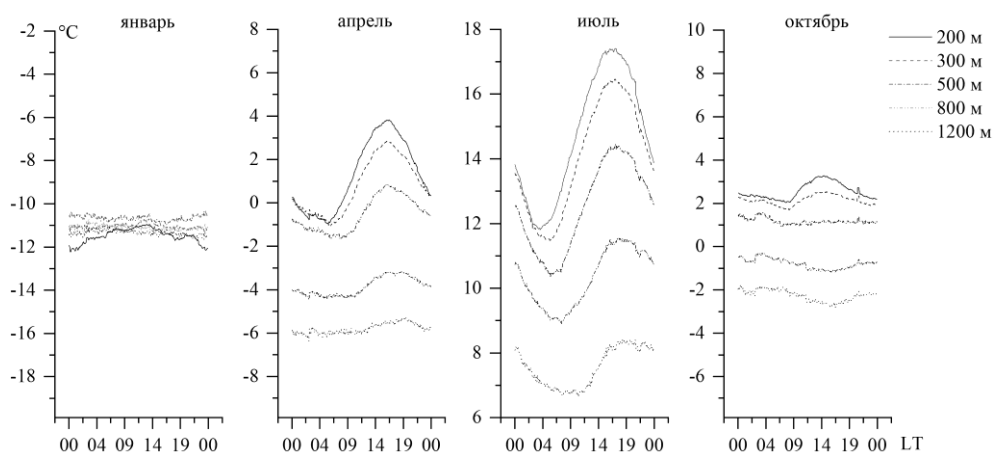


Рисунок 4. Суточный ход температуры воздуха на разных высотах над Апатитами (н.у.м.).

Наглядное представление о суточных изменениях термической стратификации ПСА дают вертикальные профили температуры воздуха в центральные месяцы сезонов (рис. 5). Наибольшее изменение формы профилей отмечается в приземном слое атмосферы; с высотой ночные и дневные профили постепенно сближаются. Зимой – при отсутствии солнечной радиации или ее низком значении, стратификация от ночных часов к дневным меняется слабо. Такая перестройка стратификации наблюдается во всех 3 пунктах измерений.

Особый интерес представляет сравнение температуры воздуха на высоте 200 м в Апатитах и на высоте 200 м н.у.м. над Кандалакшей. Температура на уровне 200 м н.у.м. – это температура воздуха в верхней части холма и, одновременно, в черте города. Зимой на вершинах изолированных холмов (без притока холодного воздуха с соседних вершин) образующийся у поверхности земли холодный воздух стекает вниз и заменяется воздухом из прилегающих слоев атмосферы. В результате этого температура воздуха на вершине холма должна быть близка к температуре на той же высоте в атмосфере над прилегающей равниной. Если допустить, что в городе существует антропогенный остров тепла, величина которого зимой достигает 4-8°C [3], горизонтальный градиент температуры между Апатитами и Кандалакшей, который на высотах 200-300 м в это время года около 0.5°C, не может помешать ее обнаружению. Однако распределения температур в верхней части городского холма и на той же высоте над Кандалакшей оказываются практически одинаковыми: положительная аномалия в городе существует только по отношению к окружающей холм равнине с более низкими температурами (рис. 6), но температура в городе соответствует температуре «теплого слоя», который зимой располагается над равниной на той же высоте. Положительная аномалия температуры в городе имеет, главным образом, естественную природу.

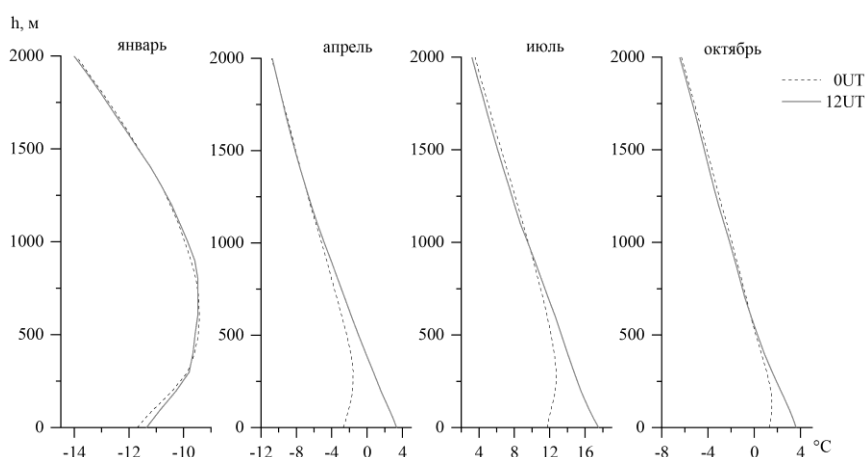


Рисунок 5. Вертикальные профили температуры воздуха в различные сезоны над Кандалакшей (2007-2018 гг.).

Таблица. Коэффициенты корреляции среднесуточных температур на разных высотах над Апатитами с данными зондирования в Мурманске и Кандалакше.

Сезон	Мурманск					Кандалакша				
	200 м	400 м	600 м	900 м	1200	200 м	400 м	600 м	900 м	1200
зима	0.93	0.93	0.89	0.89	0.89	0.95	0.97	0.96	0.96	0.97
весна	0.96	0.95	0.94	0.93	0.94	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99
лето	0.93	0.91	0.90	0.91	0.92	0.94	0.96	0.97	0.97	0.97
осень	0.97	0.97	0.97	0.95	0.94	0.99	0.99	0.98	0.97	0.98

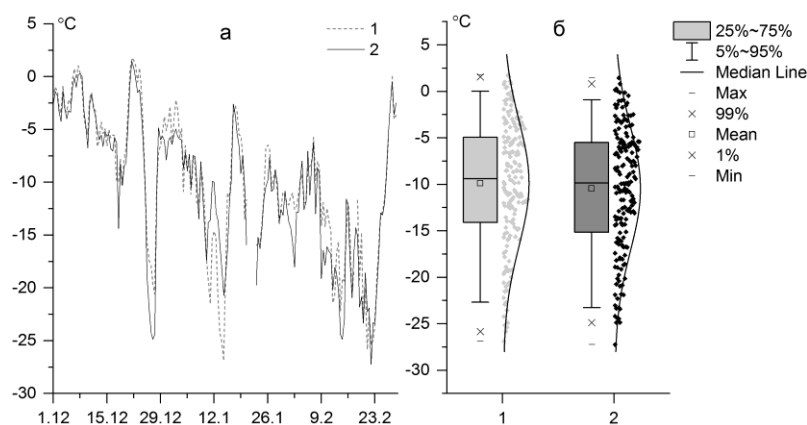


Рисунок 6. Вариации (а) зимних температур на высоте 200 м н.у.м. над Кандалакшей (1) и в г. Апатиты (200 м н.у.м. (2) и их статистические распределения; 2020-21 гг.

Заключение

По данным параллельных измерений вариации температуры воздуха в ПСА над Мурманском, Апатитами и Кандалакшей происходят в значительной степени синхронно. Однако в термической структуре ПСА обнаруживаются пространственные различия, вызванные большими расстояниями между пунктами измерений и неодинаковым воздействием Баренцева и Белого моря на тепловой режим прибрежных территорий. Средние неоднородности поля температуры в ПСА составляют 1°C зимой и 2°C летом. Следует отметить, что в холмистом рельефе зимой, а ночью во все сезоны, влияние микроклимата на распределения минимальной и зимней температуры могут перекрывать обычные широтные и вертикальные градиенты до относительных высот 100-200 м [1]. Это подразумевает существование гораздо более сильных вариаций в поле температуры воздуха в приземном слое, чем в целом по ПСА.

Литература

1. Гольцберг И.А. Микроклимат СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 282 с.
2. Яковлев Б.А. Климат Мурманской области. Мурманск: Кн. изд-во, 1961. 183 с.
3. Varentsov V., Konstantinov P., Baklanov A. et al. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 18, pp. 17573-17587, 2018.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.042

СВЯЗЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ХИБИНАХ С ТЕМПЕРАТУРОЙ НАД ПРЕДГОРНОЙ РАВНИНОЙ

В.И. Демин¹, Б.В. Козелов¹, Т.А. Муравьева²

¹ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты

²Отдел лавинной безопасности УГИ КФ АО «Апатит», г. Кировск

Аннотация. Проведено сравнение температуры воздуха в Хибинском горном массиве с температурой воздуха над предгорной равниной (по измерениям микроволнового температурного профилера). В зимний период изменения температуры происходят практически синхронно (коэффициенты корреляции 0.92-0.94), но в горах температура воздуха ниже: примерно на 0.3°C в нижнем ярусе гор (~400 м) и на 1.5°C на уровнях плато (~1000-1200 м н.у.м.). Эффект создается адиабатическим охлаждением воздуха при его вынужденном подъеме вдоль склонов. Летом суточные вариации температуры воздуха в горах и на той же высоте над равниной происходят с разной фазой. Разность температур зависит от времени суток, высоты и метеорологических условий. В общем виде утром и днем температура воздуха в горах близка или выше температуры воздуха на той же высоте над равниной, а ночью – ниже.

Введение

Метеорологические наблюдения в Хибинах начались более 100 лет назад (наиболее ранние данные на предгорной равнине (жд. станция «Имандра») доступны с 1900 г., а непосредственно горные (гора Хибин) с 1929 г.). Несмотря на продолжительную историю метеорологических измерений, вопросы о механизмах формирования горного климата Хибин остаются плохо изученными. В частности, нет ответа на вопрос о характере взаимодействия горного массива и нижней тропосферы. Это вызвано достаточно удаленным положением от Хибин ближайших станций аэрологического зондирования (Мурманск и Кандалакша), дающих информацию о распределении метеорологических параметров по высотам, а также положением последних на побережьях Баренцева и Белого морей, где поле температуры искажено во всем пограничном слое атмосферы (ПСА).

В 2020 г. в Апатитах был установлен микроволновой температурный профилимер МТП-5РЕ, который позволяет при любой погоде в автоматическом режиме восстанавливать профиль температуры воздуха в слое от 200 до 1200 м с разрешением по высоте от 10 до 50 м и с временным шагом 5 мин. Подробные характеристики прибора изложены на сайтах www.mtp5.ru и www.attex.net. Эти измерения охватывают весь диапазон высот расположенных рядом с Апатитами Хибин (наивысшая отметка 1200 м).

Целью данной работы является оценка характера теплового взаимодействия Хибинского горного массива на термодинамические характеристики находящегося над ним слоя атмосферы.

Данные

В работы использованы данные измерений микроволнового температурного профилера МТП-5РЕ (Полярный геофизический институт), данные аэрологических зондирований в Мурманске и Кандалакше (weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html), данные отдела лавинной безопасности УГИ КФ АО «Апатит».

Результаты и обсуждение

Между температурами воздуха в Хибинах и воздуха над равниной существует тесная корреляция (рис. 1). Это обусловлено тем, что из-за небольших горизонтальных размеров (примерно 30 на 40 км) и относительных высот (900-1000 м), Хибин не вызывают блокирования воздушных масс, и аномалии в поле температуры, создаваемые макроциркуляционными процессами, охватывают одновременно и горный массив, и прилегающие территории.

Зимой температуры воздуха в Хибинах ниже, чем над Мурманском и Кандалакшей, где во всем ПСА прослеживается отепляющее влияние Баренцева и Белого морей (рис. 2). Летом наиболее высокая температура в южных районах области и температура в Хибинах выше, чем на Мурманском, и ниже, чем в Кандалакше. Но последнее утверждение справедливо только для среднемесячных значений. При отдельном рассмотрении ночных (0 UT) и дневных (12 UT) сроков обнаруживается, что в дневные часы температура воздуха в Хибинах приближается и даже превышает значения температуры на той же высоте над расположенной южнее Кандалакшей (рис. 2в). Измерения над Апатитами показывают, что в ПСА градиент

температуры своего знака не меняет, а, следовательно, воздух в Хибинах подвержен дополнительному термическому воздействию.

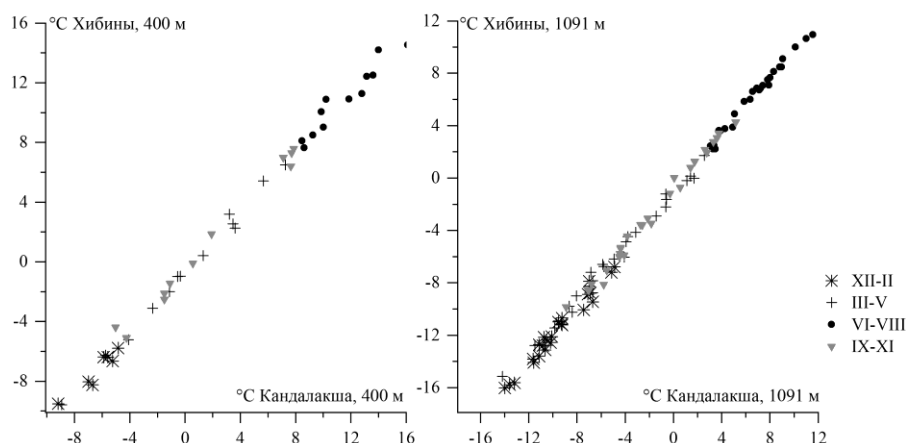


Рисунок 1. Связь среднемесячных температур воздуха в Хибинах и над Кандалакшей.

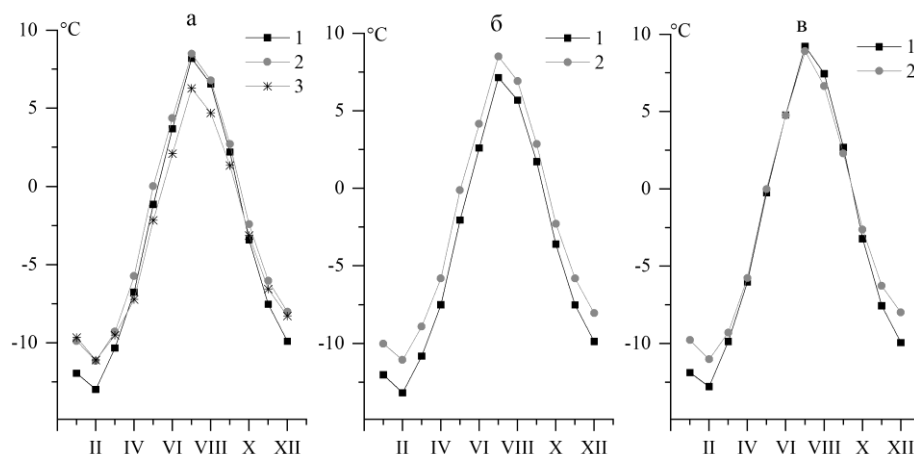


Рисунок 2. Среднемесячные температуры воздуха на г. Ловчор (Хибины) и на той же высоте над Кандалакшей и Мурманском (а); б и в – отдельно для Ловчор и Кандалакши для сроков 0 и 12 UT.

Температурный режим Хибин формируется под воздействием макроциркуляционных и радиационных процессов. Для изучения динамического воздействия горного массива на поле температуры наиболее удобным является зимний период, когда потоки солнечной радиации минимальны или даже отсутствуют (полярная ночь). На рис. 3 приведены вариации температуры на высоте 1075 м н.у.м. (г. Айкуайвенчорр) и на аналогичной высоте над равниной (расстояние между местом установки МТП-5РЕ и метеорологической станцией на г. Айкуайвенчорр около 16 км). Вариации температуры происходят схожим образом: коэффициент корреляции 0.94. Однако температура на горе практически всегда ниже, чем на той же высоте над равниной – в среднем за зимний период 2020-21 гг. на 1.5°C. Данный эффект можно объяснить адиабатическим охлаждением воздуха при его вынужденном подъеме при натекании воздушной массы на горное препятствие. Подтверждением этого механизма может служить тот факт, что в нижнем ярусе гор, где подъем воздуха незначительный, разность температур между воздухом в горах и на той же высоте над равниной всего 0.3°C (по измерениям в г. Кировске).

Очевидно, что данный механизм (называемый также эффектом подъема массы [1]) действует и в другие сезоны, хотя его численный эффект должен быть другим из-за разной стратификации. Однако при поступлении солнечной радиации картина в реальности становится более сложной, так как возникают периодические колебания температуры воздуха. Для иллюстрации на рис. 4 приведены вариации температуры воздуха в Хибинах на высоте 400 м и на той же высоте над равниной в июне-июле 2021 г. Межсуточные вариации происходят одинаковым образом – они отражают изменения синоптической ситуации. Но в какую-то часть времени суток в горах оказывается холоднее, а другую теплее, чем на той же высоте над равниной. Заметен также небольшой сдвиг по фазе.

Причины данного явления, на наш взгляд, заключаются в особенностях суточного хода температуры воздуха над деятельной поверхностью и на высотах в ПСА. Суточный ход температуры воздуха над деятельной поверхностью обусловлен суточными вариациями потоков солнечной радиации [2]. Минимальная температура отмечается ночью перед рассветом. В утренние часы температура воздуха быстро растет и между 14 и 16 час достигает своих максимальных значений. Типичный график суточного хода для нескольких пунктов приведен на рис. 5. Несмотря на разное положение по высоте (станция на равнине и горе), суточные вариации происходят практически синхронно, так как вызываются, главным образом, одним процессом – вариациями солнечной радиации. Суточная амплитуда с высотой убывает из-за усиления турбулентного обмена с окружающими слоями воздуха.

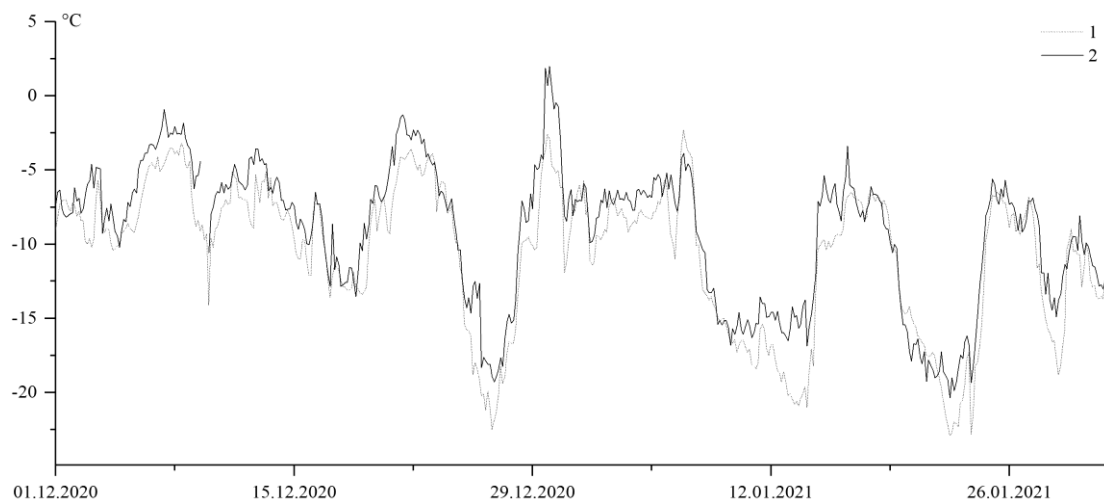


Рисунок 3. Температура воздуха на г. Айкуайвенчорр (1075 м) и на высоте 1075 м над Апатитами (МТП-5PE).

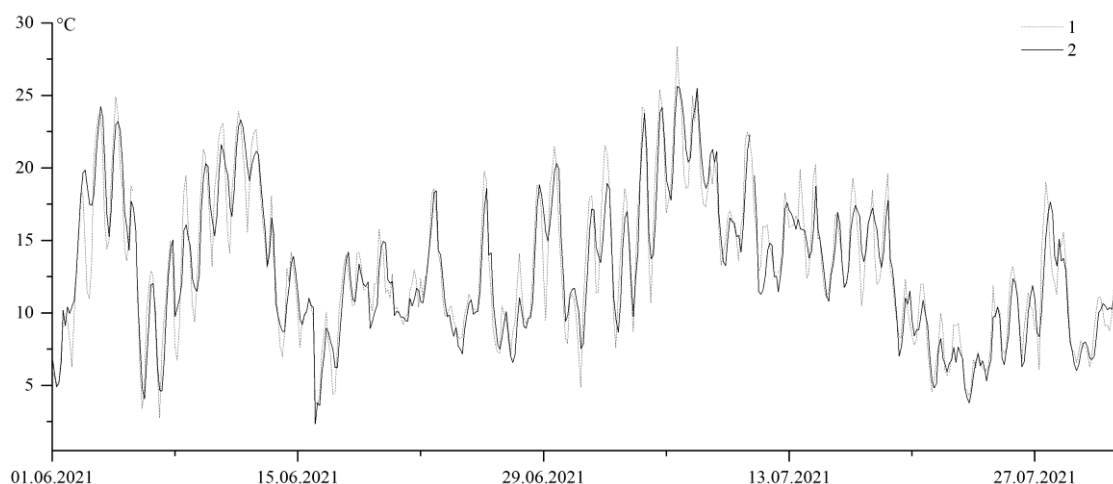


Рисунок 4. Температура воздуха в Хибинах на высоте 400 м н.у.м. и на той же высоте над равниной (МТП-5PE).

В ПСА на более высоких от поверхности уровнях периодические изменения температуры воздуха создаются суточными вариациями потоков тепла по вертикали. Так как скорость их распространения в воздухе конечна, экстремумы температуры на высотах наступают позже, чем в приземном слое (чем выше, тем сильнее запаздывание). Примеры суточных вариаций на разных высотах над равниной по данным измерений МТП-5PE в Апатитах приведены на рис. 6.

Так как вариации температуры в горах, где присутствует деятельная поверхность (поверхности склонов, плато, вершин), и над равниной смещены по фазе, разность температур между горным воздухом и воздухом, находящимся на той же высоте над прилегающей к горам равниной, не остается постоянной ни по величине, ни по знаку (рис. 7). Ночью температура воздуха над горами ниже, чем воздух на той же высоте над равниной. В утренние часы воздух над горами быстро нагревается, благодаря поглощению поверхностями

солнечной радиации и последующей отдаче тепла прилегающим слоям воздуха, в то время как воздух над равниной все еще остается холодным – тепло от поверхности земли до него еще не дошло из-за слабого в это время суток турбулентного обмена (на высотах в это время может даже отмечаться минимум температуры в суточном ходе). В послеполуденные часы при интенсивном турбулентном обмене разность температур уменьшается. Конкретные численные различия между температурами воздуха в горах и над равниной будут зависеть от сезона, высоты, времени суток и от метеорологических условий в атмосфере, определяющих интенсивность турбулентного обмена.

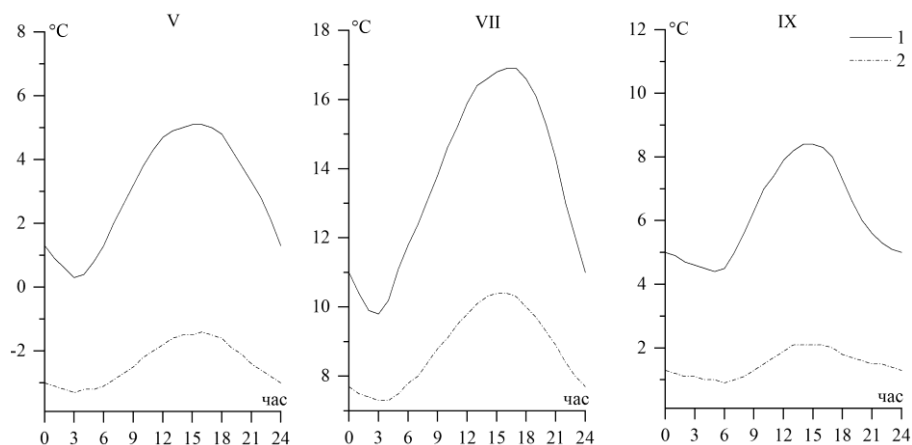


Рисунок 5. Суточный ход температуры воздуха на высоте 2 м от поверхности земли: 1 – Апатиты (132 м н.у.м.), 2– г. Юкспор (902 м н.у.м.); данные из [3].

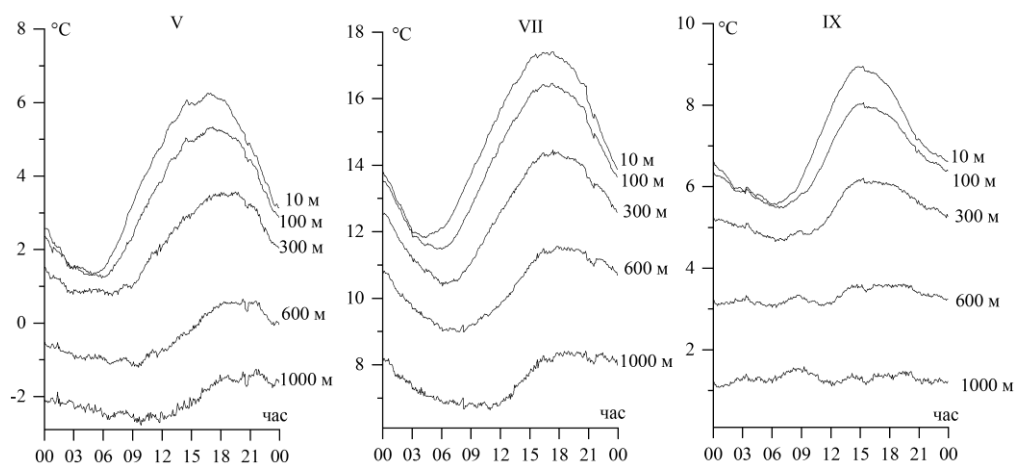


Рисунок 6. Суточный ход на разных высотах от поверхности земли по данным МТП-5PE (Апатиты).

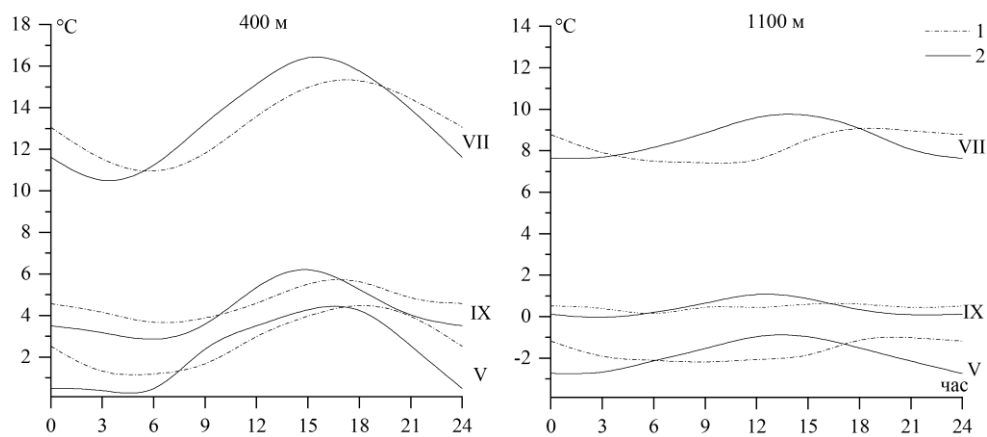


Рисунок 7. Суточный ход температуры воздуха в Хибинах и над прилегающей равниной.

Заключение

Сезонный ход температуры в Хибинах идентичен сезонным вариациям температуры воздуха на тех же высотах над прилегающей равниной. Зимой периодические суточные вариации практически отсутствуют. Температура воздуха на горах ниже, чем воздуха над равниной: в среднем на 0.3°C в нижнем ярусе гор (400 м н.у.м.) и на 1.5°C на уровне наиболее высоких плато. Эффект создается вынужденным подъемом воздуха и его адиабатическим охлаждением.

Из-за поглощения деятельной поверхностью гор солнечной радиации суточный ход температуры в Хибинах в теплое полугодие отличается от суточного хода температуры воздуха на той же высоте над равниной. Суточные вариации происходят с разной амплитудой и сдвигом по фазе. Разность температур не остается постоянной и зависит от сезона, времени суток, высоты (сдвиг фаз). В общем виде можно сказать, что температура воздуха в горах ночью ниже, а в утренние, полуденные и послеполуденные часы приближается и превышает температуру воздуха на той же высоте над прилегающей равниной.

Литература

1. Barry R.G. Mountain weather and climate. Cambridge University Press, Cambridge, 2008. 506 p.
2. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб, Гидрометеоздат, 2000. 780 с.
3. Справочник по климату СССР. Вып. 2. Мурманская область. Часть II. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 144 с.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.043

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОСНОВНЫХ АТМОСФЕРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВО ВРЕМЯ ВЫСЫПАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ В СРЕДНЮЮ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

А.С. Кириллов, В.Б. Белаховский, Е.А. Маурчев,
Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздевский

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты

Абстракт

В настоящей работе рассмотрена кинетика триплетных ($A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $V^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$) состояний молекулярного азота и синглетных ($a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$) состояний молекулярного кислорода на высотах средней атмосферы во время вторжения высокоэнергичных протонов. При этом были учтены процессы прямого электронного возбуждения вторгающимися в атмосферу высокоэнергичными протонами и вторичными электронами, процессы спонтанного излучения, а также перенос энергии возбуждения молекул между электронно-возбужденными состояниями N_2 и O_2 при молекулярных столкновениях. Константы скоростей переноса энергии возбуждения между электронно-возбужденными состояниями молекулярного азота и кислорода при столкновениях с молекулами N_2 и O_2 были теоретически рассчитаны согласно квантово-химическим приближениям. Впервые рассмотрена кинетика синглетных состояний O_2 на высотах средней атмосферы как с учетом прямого возбуждения высокоэнергичными протонами и вторичными электронами, так и с учетом процессов переноса электронного возбуждения с метастабильного молекулярного азота $N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0)$ на состояния Герцберга O_2 и перераспределения энергии возбуждения между колебательными уровнями синглетных состояний при неупругих молекулярных столкновениях. Показано, что доминирующий вклад в возбуждение $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ вносят процессы прямого электронного возбуждения.

Введение

При вторжении в атмосферу Земли первичных космических лучей (КЛ) протоны составляют около 85 % от их общего количества, остальные частицы – это ядра гелия и элементов с $Z > 2$, а также электроны с позитронами. При прохождении через верхние, разреженные, слои атмосферы преобладающим процессом является ионизация, причем наиболее активными здесь являются частицы с энергией до 1 ГэВ. При достижении высоты 10-30 км над уровнем моря все более вероятными становятся неупругие соударения с ядрами атомов воздуха (в основном частицы с энергией более 1 ГэВ с азотом и кислородом) [Дорман, 1975; Широков и Юдин, 1980; Simpson, 1983]. В результате ядерных взаимодействий возникают каскады вторичных частиц различного сорта, условно эту реакцию можно выразить через формулу генерации частиц:



где p – протоны; n – нейтроны; π^\pm , π^0 – пионы; k^\pm , k^0 – каоны.

Взаимодействие элементарных частиц, образованных в процессе (1), с молекулами составляющих средней атмосферы Земли приводит к образованию потоков вторичных электронов. Неупругие столкновения высокоэнергичных вторичных электронов с молекулами азота и кислорода приводят к образованию электронно-возбужденных молекул $N_2(A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $V^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$), $N_2(a^1\Sigma_u^-$, $a^1\Pi_g$, $w^1\Delta_u$), $O_2(c^1\Sigma_u^-$, $A^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+)$, $O_2(a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+)$. Поскольку молекулярный азот и молекулярный кислород доминируют в составе атмосферы Земли, спектры свечения атмосферы содержат множество полос азота и кислорода. В работах [Кириллов и Белаховский, 2020; Kirillov and Belakhovskiy, 2019, 2021] были проведены расчеты профилей интенсивностей свечения полос первой (1PG) и второй положительных (2PG) систем молекулярного азота, а также полос Инфракрасной Атмосферной (IRAtm) и Атмосферной (Atm) систем молекулярного кислорода, обусловленных спонтанными излучательными переходами между электронно-возбужденными состояниями молекул N_2 и O_2



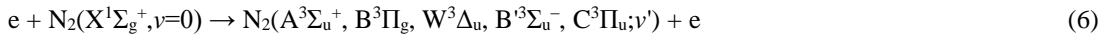


на разных высотах верхней и средней атмосферы во время высыпания высокоэнергичных электронов в атмосферу Земли.

В настоящей работе рассмотрена кинетика триплетных ($A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $V^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$) состояний молекулярного азота и синглетных ($a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$) состояний молекулярного кислорода на высотах средней атмосферы во время события GLE (Ground level enhancement) №69 от 20 января 2005 г., при котором произошло возрастание скорости счета нейтронных мониторов, возникшее вследствие увеличения числа протонов (в основном с энергией до 10 ГэВ) в потоке первичных КЛ.

Моделирование электронной кинетики молекулярного азота и молекулярного кислорода в средней атмосфере Земли

Кинетическая модель электронно-возбужденного триплетного молекулярного азота для высот средней атмосферы Земли во время высыпания высокоэнергичных электронов (ВВЭ) представлена в работах [Kirillov and Belakhovsky, 2019; Кириллов и Белаховский, 2020]. В настоящих расчетах при вторжении КЛ аналогично рассмотрены процессы возбуждения пяти триплетных состояний N_2 вторичными электронами, образованных в процессах ионизации элементарными частицами, образованными в процессах (1):

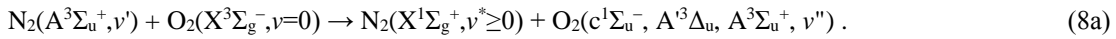


При этом учтены следующие колебательные уровни указанных пяти состояний: $A^3\Sigma_u^+(v'=0-29)$, $B^3\Pi_g(v'=0-18)$, $W^3\Delta_u(v'=0-21)$, $V^3\Sigma_u^-(v'=0-15)$, $C^3\Pi_u(v'=0-4)$. Кроме спонтанных переходов (2) и (3) с излучением 1PG и 2PG полос, также было учтено излучение полос Ву-Бенеша (WB) (переход $W^3\Delta_u, v' \leftrightarrow V^3\Pi_g, v''$) и полос инфракрасного послесвечения (IRAG) (переход $V^3\Sigma_u^-, v' \leftrightarrow B^3\Pi_g, v''$), а также спонтанные переходы $A^3\Sigma_u^+, v' \rightarrow X^1\Sigma_g^+, v''$ (полосы Вегарда-Каплана) (VK) [Gilmore et al., 1992].

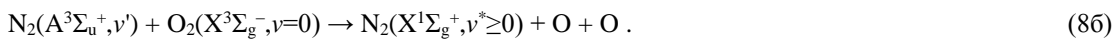
Кинетическая модель электронно-возбужденного синглетного молекулярного кислорода для высот средней атмосферы Земли во время ВВЭ представлена в работе [Kirillov and Belakhovsky, 2021]. В настоящих расчетах интенсивностей свечения полос молекулярного кислорода при высыпании КЛ аналогично [Kirillov and Belakhovsky, 2021] рассмотрены процессы возбуждения двух синглетных состояний O_2 вторичными электронами:



а также процесс переноса энергии электронного возбуждения метастабильного молекулярного азота при столкновении с молекулами O_2 и возбуждение состояний Герцберга $c^1\Sigma_u^-$, $A^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$ у молекулярного кислорода



В дальнейшем в результате излучательных процессов и внутримолекулярных и межмолекулярных переносов энергии при неупругих молекулярных столкновениях энергия электронного возбуждения состояний Герцберга $c^1\Sigma_u^-$, $A^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$ трансформируется в энергию возбуждения синглетных состояний $a^1\Delta_g$ и $b^1\Sigma_g^+$ молекулярного кислорода. Сравнение рассчитанных констант процесса (8a) со всеми имеющимися в мировой научной литературе экспериментальными данными приведено в [Kirillov and Belakhovsky, 2021]. Как показали теоретические расчеты, при исследовании роли межмолекулярных процессов переноса энергии электронного возбуждения (8a) в возбуждении молекул кислорода необходимо учитывать только нулевой колебательный уровень $N_2(A^3\Sigma_u^+, v'=0)$. Для неупругих столкновений молекул $N_2(A^3\Sigma_u^+, v' > 0)$ с O_2 доминирующим каналом взаимодействий является процесс диссоциации молекулы O_2 и образование двух атомов кислорода [Kirillov and Belakhovsky, 2021]



Результаты расчетов интенсивностей полос N_2 и O_2

В настоящей работе рассмотрено событие GLE, которому сопутствовало увеличение скорости образования пар ионов на высотах от 0 до 80 км. Для расчетов прохождения частиц КЛ через атмосферу Земли используется пакет для разработки программ GEANT4, при помощи которого создаются соответствующие модели. В Полярном геофизическом институте был разработан программный пакет RUSCOSMICS, который как более современный инструмент для замены PLANETOCOSMICS [Маурчев и др., 2015, 2019; Маурчев и Балабин, 2016]. Описание методики получения данных спектров первичных КЛ, используемых в моделировании, приводится в работе [Vashenyuk et al., 2011].

При расчете объемных интенсивностей свечения полос первой и второй положительных систем молекулярного азота воспользуемся решением систем уравнений [Kirillov and Belakhovsky, 2019; Кириллов и

Белаховский, 2020] для получения концентраций электронно-возбужденных молекул $N_2(B^3\Pi_g, v')$ и $N_2(C^3\Pi_u, v')$. При этом воспользуемся спектром вторичных электронов и набором данных поперечных сечений для молекул N_2 и O_2 [Itikawa, 2006, 2009]. Кроме того, при расчете концентраций $N_2(C^3\Pi_u, v')$ учтем гашение данного состояния [Kirillov, 2019], поскольку на нижних высотах рассматриваемого диапазона столкновительные времена жизни состояния $C^3\Pi_u$ становятся порядка излучательных времен или меньше. При расчете объемных интенсивностей свечения полос Инфракрасной Атмосферной и Атмосферной систем молекулярного кислорода воспользуемся решением систем уравнений [Kirillov and Belakhovsky, 2021] для получения концентраций электронно-возбужденных молекул $O_2(a^1\Delta_g, v')$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+, v')$.

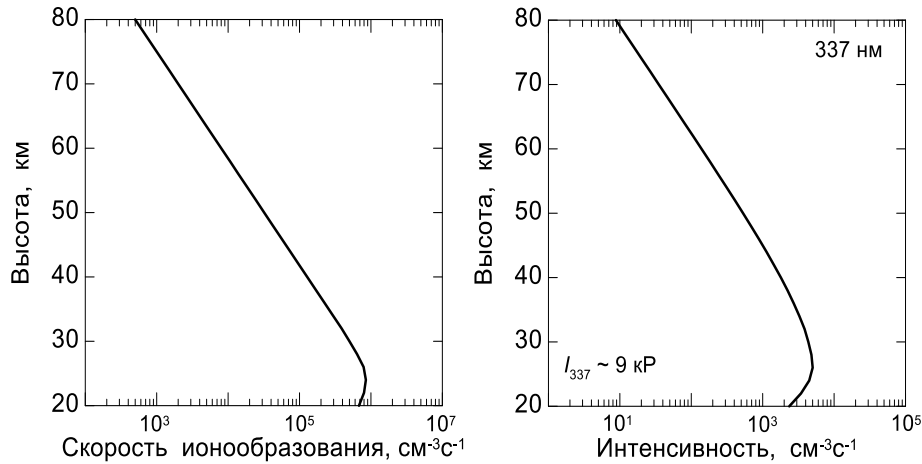


Рисунок 1. Профили рассчитанных скоростей ионообразования и скоростей объемной интенсивности свечения полосы 337 нм молекулярного азота.

На рис.1 показаны профили рассчитанных скоростей ионообразования и скоростей объемной интенсивности свечения полосы 337 нм второй положительной системы N_2 , связанной со спонтанными излучательными переходами (3) с $v'=0 \rightarrow v''=0$. Как видно из рис.1, профиль объемной интенсивности полосы 337 нм во многом повторяет профиль скорости ионообразования. Лишь на нижних высотах рассмотренного интервала высот начинается сказываться гашение состояния $C^3\Pi_u$ [Kirillov, 2019]. Интегральная интенсивность свечения полосы 337 нм согласно расчетам $I_{337} \sim 9$ кР (1 Рэлей = 10^6 фотон/см²·с). На рис.2 показаны профили рассчитанных скоростей объемных интенсивностей свечения полос 749 и 669 нм первой положительной системы, обусловленных спонтанными излучательными переходами (2) с $v'=4 \rightarrow v''=2$ и $v'=5 \rightarrow v''=2$, соответственно. Как видно из рис.2, процессы гашения состояния $B^3\Pi_g$ достаточно эффективны на высотах средней атмосферы Земли. Поэтому рассчитанные интегральные интенсивности свечения полос 749 и 669 нм составляют $I_{749} \sim 290$ Р и $I_{669} \sim 130$ Р, а отношения к интенсивности свечения полосы 337 нм второй положительной системы $I_{749}/I_{337} \sim 3.2 \cdot 10^{-2}$ и $I_{669}/I_{337} \sim 1.4 \cdot 10^{-2}$. Эти значения намного меньше соответствующих величин 1.6 и 0.7, рассчитанных в [Кириллов и Белаховский, 2020] для выпадений авроральных электронов и полученных с помощью результатов измерений оптических спектров полярных сияний во время запусков ракет на острове Хейса в 1972-1973 г.г. [Кириллов и др., 1987].

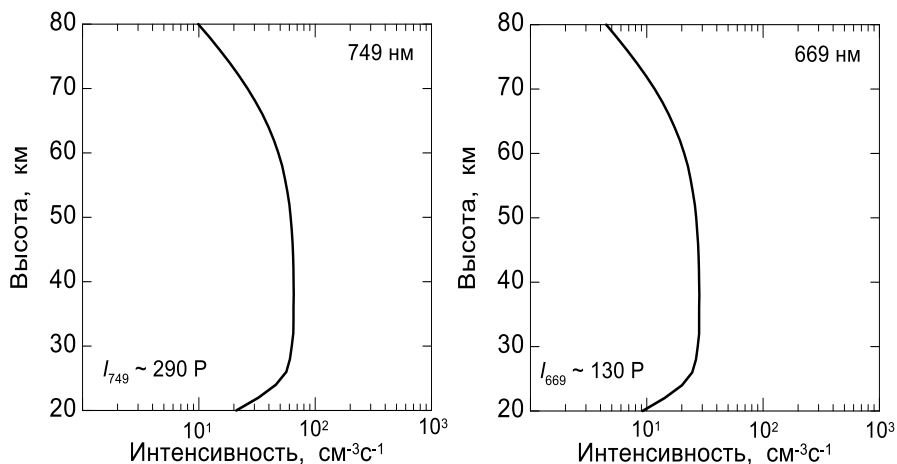


Рисунок 2. Профили рассчитанных скоростей объемной интенсивности свечения полос 749 и 669 нм молекулярного азота.

На рис.3 приведены профили рассчитанных скоростей объемных интенсивностей свечения полос 762 и 1270 нм молекулярного кислорода, связанных со спонтанными излучательными переходами (5) и (4) с $v'=0 \rightarrow v''=0$, соответственно. При этом для полосы 1270 нм расчеты приведены для времен $t=1, 3, 10$ и 30 минут после начала высыпания высокоэнергичных протонов. Поскольку излучательное время жизни состояния $a^1\Delta_g$ больше часа, а константа скорости гашения состояния $a^1\Delta_g$ принимает очень маленькие значения, для высот выше ~ 40 км наблюдается рост $O_2(a^1\Delta_g, v=0)$ на протяжении десятков минут высыпания КЛ. Рассчитанная интегральная интенсивность Инфракрасной Атмосферной полосы I_{1270} варьируется от ~ 1 кР при $t=1$ минута до ~ 2 кР при $t=30$ минут.

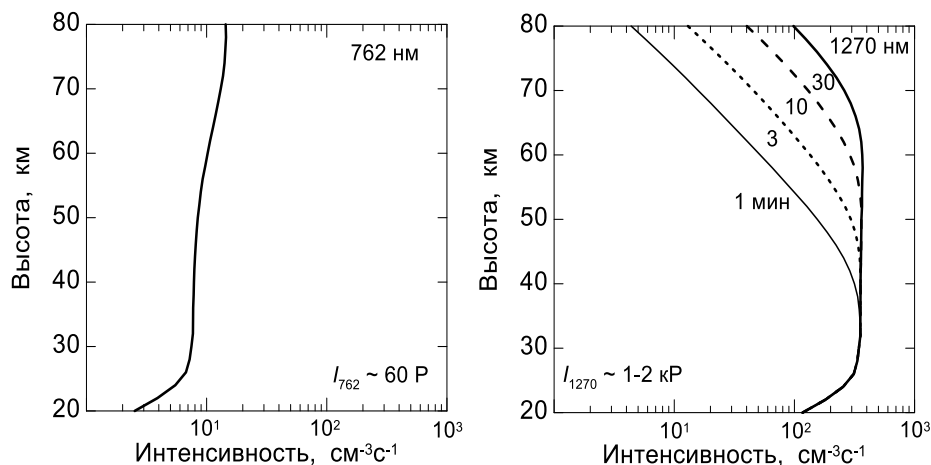


Рисунок 3. Профили рассчитанных скоростей объемной интенсивности свечения полос 762 и 1270 нм молекулярного кислорода.

Заключение

На основании моделей электронной кинетики триплетных состояний молекулярного азота и синглетных состояний молекулярного кислорода для средней атмосферы Земли, представленных в [Кириллов и Белаховский, 2020; Kirillov and Belakhovsky, 2019, 2021], проведен расчет профилей интенсивностей свечения полос первой и второй положительных систем N_2 , Инфракрасной Атмосферной и Атмосферной систем O_2 в случае высыпания в атмосферу Земли высокоэнергичных протонов во время события GLE (Ground level enhancement) №69 от 20 января 2005 г. Расчеты показали, что практически на всем рассматриваемом интервале высот 20-80 км имеется значительный вклад процессов гашения состояния $B^3\Pi_g$ при молекулярных столкновениях. Это приводит к существенному уменьшению отношения интегральных интенсивностей I_{749}/I_{337} и I_{669}/I_{337} по сравнению с авроральными высыпаниями электронов [Кириллов и др., 1987; Кириллов и Белаховский, 2020]. Кроме того, кинетика синглетных состояний O_2 на высотах средней атмосферы во время высыпания протонов рассмотрены как с учетом прямого возбуждения высокоэнергичными частицами, так и с учетом межмолекулярных процессов переноса электронного возбуждения. Показано, что процессы гашения состояния $b^1\Sigma_g^+$ во время неупругих молекулярных столкновений приводят к значительному понижению интенсивностей свечения Атмосферных полос на высотах средней атмосферы.

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10018) «Потоки высокоэнергичных заряженных частиц в околоземном космическом пространстве, и их воздействие на атмосферу Арктики».

Литература

- Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. 1975, М.: Наука, 462 с.
- Кириллов А.С., Белаховский В.Б. Свечение полос молекулярного азота в атмосфере Земли во время высыпания высокоэнергичных электронов // Геомагнетизм и аэронавигация, 2020, т.60, №1, с.93–98.
- Кириллов А.С., Ягодкина О.И., Иванов В.Е., Воробьев В.Г. Механизмы возбуждения 1PG системы N_2 в полярных сияниях // Геомагнетизм и аэронавигация, 1987, т.27, №3, с.419-427.
- Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Вашенюк Э.В. Новая численная модель для исследования космических лучей в атмосфере Земли // Известия РАН. Серия физическая, 2015, т.79, №5, с.711-713.

- Маурчев Е.А., Балабин Ю.В.** Модельный комплекс для исследования космических лучей RUSCOSMICS // Солнечно-земная физика, **2016**, т.2, №4, с.3-8.
- Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Германенко А.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б.** Программный комплекс RUSCOSMICS как инструмент для оценки скорости ионизации вещества атмосферы Земли протонами космических лучей // Известия РАН. Серия физическая, **2019**, т.83, №5, с.712-716.
- Широков Ю.М., Юдин Н.П.** Ядерная физика, учебное пос.. **1980**, М.: Наука. 729 с.
- Gilmore F.R., Laher R.R., Espy P.J.** Franck-Condon factors, r-centroids, electronic transition moments, and Einstein coefficients for many nitrogen and oxygen band systems // J. Phys. Chem. Ref. Data, **1992**, v.21, №5, p.1005-1107.
- Itikawa Y.** Cross sections for electron collisions with nitrogen molecules // J. Phys. Chem. Ref. Data, **2006**, v.35, №1, p.31-53.
- Itikawa Y.** Cross sections for electron collisions with oxygen molecules // J. Phys. Chem. Ref. Data, **2009**, v.38, №1, p.1-20.
- Kirillov A.S.** Intermolecular electron energy transfer processes in the quenching of $N_2(C^3\Pi_u, v=0-4)$ by collisions with N_2 molecules // Chem. Phys. Lett., **2019**, v.715, p.263-267.
- Kirillov A.S., Belakhovsky V.B.** The kinetics of N_2 triplet electronic states in the upper and middle atmosphere during relativistic electron precipitations // Geophys. Res. Lett., **2019**, v.46, №13, p.7734-7743.
- Kirillov A.S., Belakhovsky V.B.** The kinetics of O_2 singlet electronic states in the upper and middle atmosphere during energetic electron precipitation // J. Geophys. Res.: Atmosphere, **2021**, v.126, №5, e2020JD033177.
- Simpson J.A.** Introduction to the galactic cosmic ray radiation // Composition and origin of cosmic rays, **1983**, p.1-24.
- Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B.** Features of relativistic solar proton spectra derived from ground level enhancement events (GLE) modeling // Astrophysics and Space Sciences Transactions, **2011**, v.7, №4, p.459-463.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.044

SOLAR-TERRESTRIAL EFFECTS REVEALED THROUGH LONG-TERM OBSERVATION ON BIORHYTHMS IN PLANTS AND EXPERIMENTAL RANDOM EVENTS OCCURRENCE

P.A. Kashulin and N.V. Kalacheva

Polar-Alpine Botanical Garden-Institute, RAS, Apatity, Russia; e-mail: falconet1@yandex.ru

Abstract

The comparative long-term observation of vascular *Marantha leoconeura* plant circadian biorhythms and some random processes in the mechanical and in electronic systems were carried out throughout winter and autumn months at the current year. The winter periods with relatively quiet Solar state were characterized by circaseptan and circasemiseptan multi-diurnal cycles in multi-diurnal time-course in plant leaves daily movement, and in deviation of obtained random numbers and coins toss counts from theoretically expected values. Solar active days at August and at September correlated with accumulated deviation of expected probability of random processes, and resulted in 5 days cycles prevalence in multi-diurnal time-course for both systems. The revealed discrepancy in seasonal dynamics observed is presumably caused by solar and cosmophysical driving agents the physical nature of which is badly expected to be unraveled.

Introduction

Solar-terrestrial links were always intriguing cross-field of synthetic intellectual interactions and attracted researchers with various scientific approaches. To explore the question the both biological and nonliving systems were studied simultaneously, their comparative long-term observe was carried out under lab indoor conditions during the some months of the current year. The highly environment sensitive vascular decorative plants *Marantha leoconeura*, var. "Facinator" cultivated under lab controlled conditions were used. The leaf-petiole changeable angles of leaf blades in these genera species are susceptible to change of atmosphere pressure, humidity etc. and presumably to cosmic weather also. The species are widely considered as "living biological barometer" due to their important properties to response on abrupt atmospheric pressure and humidity changes via special baro-sensitive cells in the leaf blade – petiole conjunction. In the results of the time-course of plant leaf-petiole angle change measurements the presence of circaseptan and circasemiseptan cycles in the multi-diurnal dynamics of plant blades movement have been demonstrated earlier [1].

But it isn't simple task to identify what namely a kind of factors might be responsible for unusual plant behavior at any time elsewhere. To select the cosmophysical factors and to detect the cosmic influence, S.E. Shnol' and colleagues used the radioactive decay long-term counts [2]. For the same aim we did attempts here to explore the long-term monitoring of random events on the base of simple mechanical and electronic systems simultaneously with biological systems to detect the plausible effects of cosmic factors.

Biological objects and methods

The vascular decorative plants *Marantha leoconeura* "Facinator" cultivated under lab controlled conditions were used as a sensitive biological indicator of external environment fluctuations and cosmic influence. The leaf-petiole changeable angles of their leaf blades (N=10) were measured twice daily during noon and evening hours. The mechanical and electronic systems produced random digital output, namely random number generation and coins toss were used also. The ten random numbers with nine random digits were generated twice daily, firstly about noon and 12 h afterwards with portative generator "CITIZEN" SRP-285II. The deviation from most probable value for generation of either first 5 to 7 consequent various digits were obtained for every experiment. For example, expected probability P for the generation of 5 consequent different digits should be as $P = 0,3024$ [3], i.e. one expects that every three of any ten numbers generated would include 5 different digits under ordinary normal conditions. As a mechanical model the coin cohorts in 100 coins each of three different denominations toss were used. The coins of each denomination were tossed daily with 5 repeats at noon and 12 h afterwards at the horizontal surface the strictly fixed high level off with following evaluation the degree of deviation from most probable cross or pile distribution.

Results and discussion

The important peculiarity of *Marantha* genera plants the presence of eigen circadian biorhythms of folia dynamics under background normal conditions. Meanwhile it is widely known that cosmic and geophysical factor capable to influence such rhythms among plethora of living organisms of microbotic ones [4] to humans [7]. Because of that

we conducted daily diurnal and nocturnal angles measurements, the results for some of which presented here, fig. 1. First of all, the much higher blade deviations in nocturnal hours as compared to diurnal ones were revealed. For the demonstration of plausible cosmic effects, the September 2021st, a month with periods of elevated solar activity intermitted by quiet days, was selected. The 12 h temporal gaps since 28 August to 26 September at abscissa and the 5 leaf blades angles deviation dynamics, respectively, are presented. The folea run show explicit difference between the solar quiet days at 15-18 at September, and days marked high solar activity, which were as follows: 8-12 and 22-24 September. During the quiet periods the plant blades show robust circadian rhythm which abruptly disturbed by solar activity characterized by C type flares. The elevation for maximal amplitude in nocturnal position for 4-5 blades on the eve of 9th September maximum and their follow smooth decrease are found also.

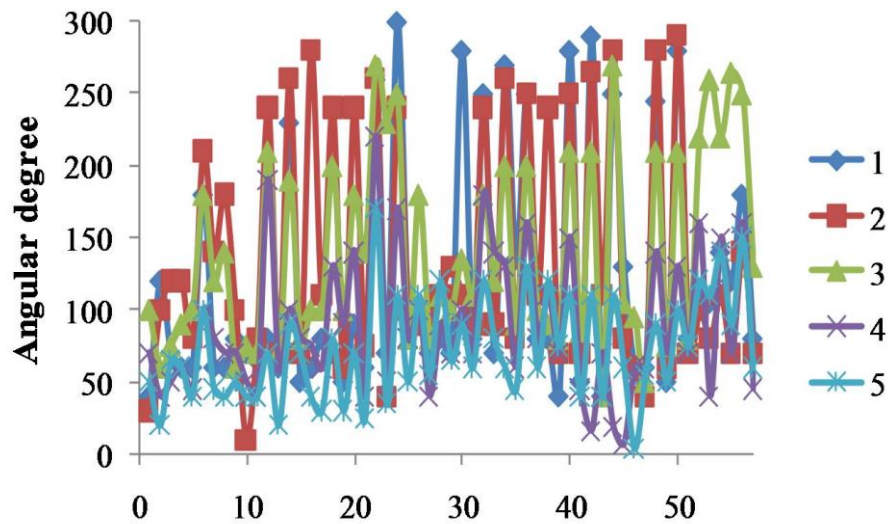


Figure 1. The 12 h temporal gaps since 28 August to 26 September at abscissa and the 5 different leaf blades angles deviation dynamics for *Marantha*.

The September rise in solar activity have induced the change in multi-diurnal dynamics of plant blades also, the respective temporal spectra show the presence of circasemiseptan (half week length) and 5 days cycles, meanwhile during the quite winter months the circaseptan (week length) cycles were prevailed, fig.2.

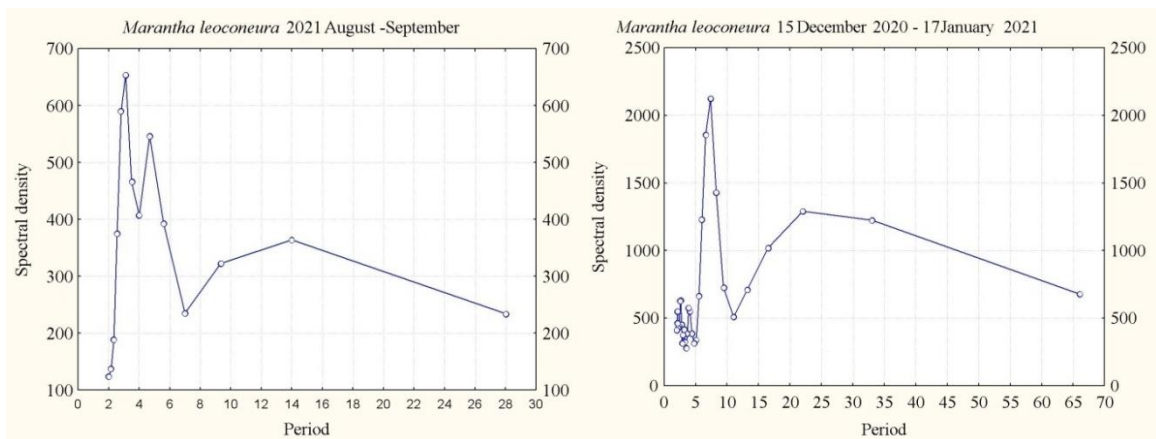


Figure 2. Power spectra for the multi-diurnal leaf blade run in *Marantha* plant at winter months and at August-September 2021st.

The difference in dynamics between winter and autumn seasons found can be provoked by increasing of solar activity. It is widely known the difference and temporal signature of solar activity dynamics in quiet and active years [5, 6].

The analogous difference in parameters of multi-diurnal cyclicality was obtained for daily generation of random numbers. Thus, at 2020-2021 yr winter months the explicit circaseptan cycles in dynamics temporal spectra were prevailed, fig. 4, meanwhile in follow August-September days run the 5 days cycles were prevailed.

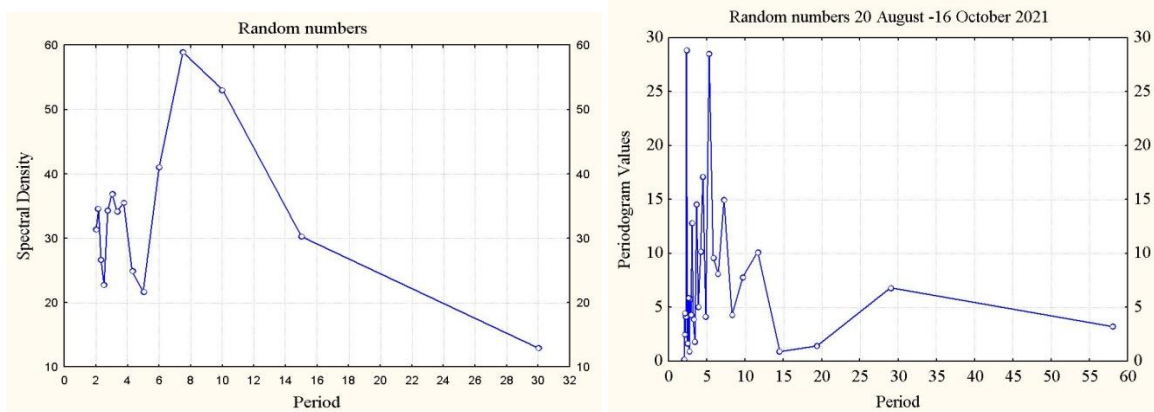


Figure 3. Power spectra for the multi-diurnal random number count deviations from expected values for the winter months (left) and for August-September.

The change in multi-diurnal dynamics for the results of coins toss deviation was found also. Moreover the high correlation between accumulated count sum deviation of most probable, theoretically expected values and the main solar activity parameters were found. The cross-correlation between solar emission of 10.7 cm radio flux and accumulated deviation, i.e. algebraic sum of consequent tosses count results have showed significant direct and about a week time shifted correlation, fig. 4. The analogous significant correlation were observed for daily Wolf Numbers run at these months as well for total solar square of sunspots.

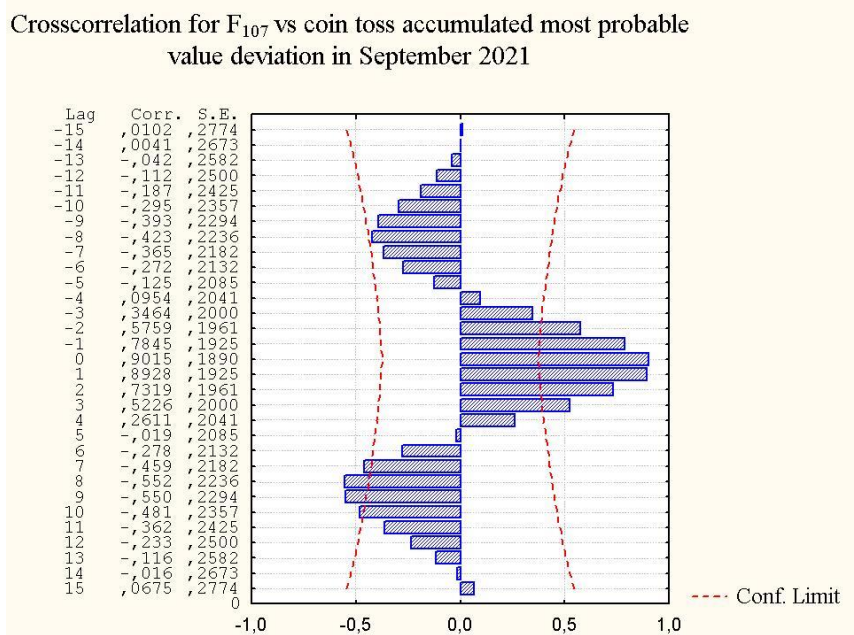


Figure 4. Cross-correlation for 10.7 cm solar radio flux time-course and accumulated coin toss counts.

The revealed discrepancy in time-course pattern and cycles length in power spectra between quiet winter and solar active autumn seasons suggests the solar and cosmic effects on the both systems considered. The effects were appeared as plant circadian rhythm disturbance, as different temporal pattern, the specific for solar activity 5 days etc. or for quiet state circaseptan, circasemiseptan cycles presence, and as either direct or postponed correlation of accumulated random coin toss counts with solar activity parameters.

The considered seasonal recurrent changes in plant folea circadian rhythms, results of experiments with random number generation, and coin toss counts suggest its exogenous, presumably solar and cosmic provenance/ And also

cosmophysical agents rhythms driving. The results obtained are in accordance with [5] that the recurrent changes of physical agents responsible for solar-terrestrial links most expected during the quiet solar years. The circaseptan and circasemiceptan cycles found might be driven either environmental terrestrial factors or cosmic ones also [6, 7]. The results suggest the presence of driving pace-makers of exogenous cosmic provenance which are able to modulate daily rhythms and control multi-diurnal dynamics of living and mechanical or electronic systems.

The advanced changes in the amplitude of *Marantha* leaves daily movement circadian cycles on the eve of large-scale solar disturbance allow one to consider and possibly to use these plant species as a sensitive short-term living predictor for abrupt changes in solar activity.

References

1. Kashlin P.A., Kalacheva N.V., Zhurina E.Y. (2018). Advanced vascular plant reactions on the large-scale earth directed solar CME's // *Physics of Auroral Phenomena*, Proc. XLI Annual Seminar, 207-210 (in Russian).
2. Snol' S.E. (1995). Shape of spectrum realized in the course of macroscopic fluctuations depends on the Earth rotation // *Biofizika*, V. 40, 4, 861-874 (in Russian).
3. Feller W. (1970). An introduction to probability theory and its applications // John Wiley & Sons, Vol. 1, p. 51. 1970. New York, Chichester, Brisbane, Toronto.
4. Chizhevsky A.L. (1963). Some microorganisms as indicators of solar activity and predictors of solar flares // *Avian and Space Medicine*, M.: Science, 76-89 (in Russian).
5. Dubov E.Y., Khromova T.P. (1992). Indices of solar and geomagnetic activity // *Biofizika*, 37, 4, 785-804 (in Russian).
6. Breus T.K., Komarov F.I., Naborov I.V., Rapoport S.I. (1989). Heliogeophysical factors and their influence on cyclic processes in biosphere // *Itogi Nauki I Techniki: Medicinskaya Geografya*, V. 18, M.: VINITI, 138-142, 172-174 (in Russian).
7. Breus T.K., Cornelissen G., Halberg F., Levitin A.E. (1995). Temporal associations of life with solar and geophysical activity // *Annales Geophysicae*, 13, 3, 1211-1222.

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.045

COVID-19: ОСОБЕННОСТИ ПАНДЕМИИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

М.В. Рагульская

ИЗМИРАН, Москва, Россия; e-mail: ra_mary@mail.ru

Аннотация. В 2019-2020 годах наблюдался одновременный глубокий минимум квази-столетнего и минимум 11-летнего цикла солнечной активности. Это сказалось на эпидемиологической обстановке в мире и особенностях течения пандемии COVID-19. Существуют дополнительные факторы внешней среды и особенностей генетики населения в каждом конкретном регионе, которые могут ускорить развитие локальной эпидемии, а также увеличить тяжесть ее протекания и уровень летальности. В докладе рассматриваются три основных фактора, модулирующих развитие пандемии: динамика солнечной активности и галактических космических лучей, геногеографическое распределение населения (в частности, характерные для данной местности гаплогруппы), и температурный режим окружающей среды. Текущая пандемия COVID-19 наиболее тяжело протекает в странах с доминантной гаплогруппой R1b. На европейской территории России доминантной гаплогруппой является R1a, для которой оказалось характерно быстрое развитие эпидемии при низкой летальности и большом количестве бессимптомных больных. В северных областях России удельный вес R1a сокращается почти вдвое, уступая место гаплогруппе Nc1. Различия в генетическом составе населения может объяснить существенную разницу развития первой волны эпидемии COVID-19 в Москве и Санкт-Петербурге, а также особенности вакцинации и приобретения коллективного иммунитета в различных странах и регионах (необходимо вакцинировать около 80% для гаплогруппы R1b против 40% для гаплогруппы N).

В ближайшие 30 лет предполагается сохранение крайне низкой солнечной активности. В этих условиях можно ожидать двукратное увеличение числа пандемий (каждые 5-6 лет вместо 10-11 лет) с выраженными геногеографическими отличиями в развитии локальных эпидемий.

Ключевые слова: пандемии гриппа, SARS-CoV-2, гаплогруппы R1b и R1a, экстремумы солнечной активности, ультрафиолетовое излучение, космические лучи

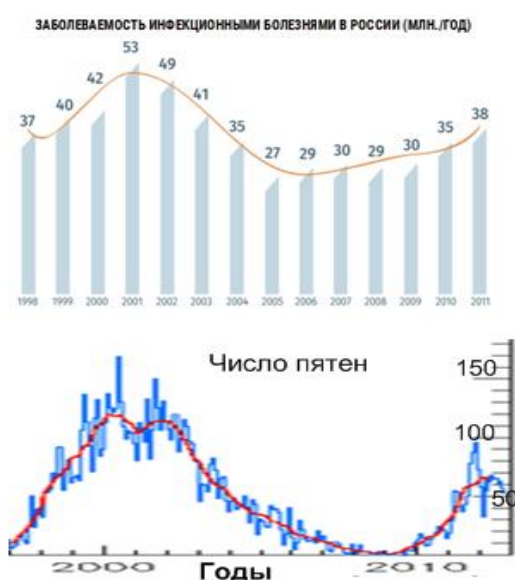


Рисунок 1. Число инфекционных заболеваний в России по годам (млн человек) и динамика солнечной активности за 1998 -2011 годы (Рагульская М.В., 2019).

Солнечная активность и пандемии гриппа.

Солнечная активность и интенсивность УФ-излучения имеют периоды различной длительности, из которых наибольшее эпидемиологическое значение имеют около 11-летний цикл и около-100 летний цикл динамики. Такая же цикличность характерна для космических лучей. Регуляторные механизмы биосферы откликаются как на высокие, так и на низкие периоды солнечной активности (СА), меняется только удельный вклад основных действующих факторов космической погоды [1]. Во время кратковременных вариаций СА (период – несколько дней) основными биотропными факторами являются скорость изменения параметров и частотный состав возмущений, в более долговременной перспективе (до 10 лет) – длительность максимума или минимума. В максимуме СА существенным оказывается вклад вариаций геомагнитного поля, вариаций ультрафиолетового излучения Солнца и солнечных космических лучей, а в минимуме на роль основного регуляторного биотропного фактора претендуют галактические космические лучи.

Статистика инфекционных заболеваний внутри 11-летнего цикла показывает почти двукратное увеличение числа заболевших в максимуме солнечной активности (Рисунок 1).

В России в 2001 году, являющемся максимумом 23 цикла солнечной активности (Max 23) число заболевших инфекционными заболеваниями составило 53 миллиона человек (данные Федеральной службы государственной статистики России). В затянувшемся минимуме СА между 23 и 24 циклами (min 24) в 2006-2010 годах количество заболевших держалось на уровне 27-30 миллионов человек. На Рисунке 1 видно практически точное временное совпадение динамики обоих процессов. По-видимому, в России, в стране с плохим климатом, постоянная зависимость числа инфекционных заболеваний от фазы цикла солнечной активности проявляется особенно ярко.

В 20 веке все пандемии гриппа происходили в максимумах солнечной активности, в 19 и 21 веке – только в максимумах и минимумах солнечной активности. Рассмотрим период с 1890 по 2020 годы. В последние 130 лет, совпавшие с бурным развитием современных принципов организации медицины и эпидемиологии, наблюдался период достаточно высокой общей долгопериодной активности Солнца. Поэтому и с медицинской точки зрения, и с точки зрения солнечно-земной физики будет корректно рассмотрение пандемий именно за период с 13 по 25 солнечный цикл. При сопоставлении данных динамики солнечной активности и пандемий этого периода можно отметить:

1. Четкие границы начала и конца пандемий присутствуют только у пандемий гриппа и некоторых эпидемий тифа. Все пандемии гриппа развивались только в экстремумах 11-летнего цикла солнечной активности.

2. При общем высоком уровне солнечной активности все пандемии гриппа 20 века приходятся на максимумы 11-летних циклов солнечной активности. Пандемии тифа 1847-1848 гг, 1899 г, и гражданской войны 1918-1919 г также приходятся на максимум солнечной активности.

3. На фазах роста и спада длиннопериодного максимума солнечной активности в 19 и 21 веках в условиях более низких циклов СА пандемии развивались и в минимумах солнечной активности (пандемия гриппа 1889-1990 годов, пандемия свиного гриппа 2009 года, пандемия COVID-19 2019-2020 годов).

В Таблице 1 представлены годы пандемий и штаммов гриппа и соответствующие им экстремумы солнечной активности. Можно предположить, что оптимальная адаптация организма человека происходит на фазах роста и спада солнечной активности за счет постоянной активации иммунитета градиентом факторов внешней среды. В максимуме СА организм находится в фазе гиперкомпенсации, а в минимуме уходит ниже порога чувствительности, и не успевает вовремя и адекватно отреагировать на внедрение вируса. При этом как очень высокая, но постоянная солнечная активность в максимуме, так и длительное постоянное отсутствие значительных вариаций геомагнитного поля и излучения Солнца в минимуме активности способствуют перерастанию локальных эпидемий в пандемию.

Таблица 1. Пандемии гриппа 19-21 веков и соответствующие им экстремумы солнечной активности. Обозначения: максимум цикла номер 23 – Max 23; минимум между 23 и 24 циклами СА – min 24 (Из работы [2]).

Годы	Заболевание	Фазы цикла СА
1889-1890	Грипп	min13
1918-1920	Испанский грипп, H1N1	Max15
1957-1958	Азиатский грипп, H2N2	Max19
1968-1970	Гонконгский грипп	Max20
1995-1996	Грипп	min23
2002-2003	SARS, SARS-CoV	Max23
2004-2005	Грипп	Max23
с 2004	Птичий грипп, H5N1	Max23
2009-2010	Свиной грипп, H1N1	min24
2019	COVID-19, SARS-CoV-2	min25

Резкое ухудшение эпидемиологической ситуации и возникновение в 20 веке пандемий гриппа в максимумах цикла солнечной активности может быть соотнесена с увеличением мутаций вируса гриппа под влиянием вариаций ультрафиолетового излучения. Мягкий ультрафиолет Солнца проходит через атмосферу и участвует в биосферных процессах. Вариации УФ на длине волны 2000 А составляют до 7% в течении 11-летнего цикла, вариации на более коротких длинах волн могут достигать до 50%. Общее изменение интенсивности излучения Солнца на всех длинах волн не велико, и составляет около 0,1%.

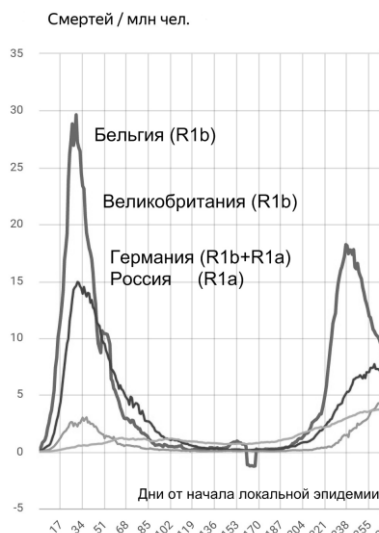


Рисунок 2. Развитие пандемии COVID-19 в различных странах до начала массовой вакцинации, в расчете на 1 миллион населения: число смертей в странах с гаплогруппами R1b и R1a (на базе данных Johns Hopkins University).

Северной Италии, Испании, Франции, Бельгии, Швейцарии, Великобритании, и США, т.е. в странах с высоким уровнем медицины. Все эти страны объединяют генетические особенности населения - доминантная гаплогруппа R1b. Число смертей на миллион человек имеет прямую корреляцию с процентным содержанием представителей гаплогруппы R1b среди населения страны. Страны, имеющие больше 60% такого населения, являются лидерами по смертности до начала массовой вакцинации (Бельгия, Великобритания, Португалия). Уровень достижения коллективного иммунитета при всеобщей вакцинации для этих стран также значительно выше, чем, например, для скандинавских (80% против 40%).

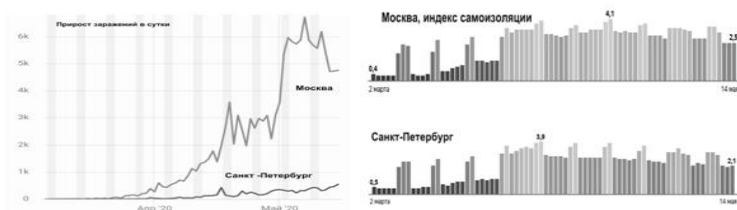


Рисунок 3. Слева сверху - прирост числа заболевших в Москва и Санкт-Петербурге в марте-мае 2020; справа сверху – индекс самоизоляции; внизу - генетический состав населения в северных, центральных и южных районах европейской части России.

В годы максимума СА основным мутагенным фактором является УФ-излучения Солнца и солнечные космические лучи. В годы минимума солнечной активности, при минимальном уровне ультрафиолета, на первый план выходят галактические процессы. Существенным биотропным фактором оказываются вариации галактических космических лучей [3]. При длительном отсутствии рентгеновских вспышек и пониженной интенсивности УФ-излучения Солнца во время затянувшихся минимумов (например, в 2008-2009 годах) озоновый слой атмосферы Земли существенно уменьшается. При этом интенсивность галактических космических лучей и их мутагенная и регуляторная роль для биосферы существенно увеличивается [4].

Особенности пандемии COVID-19. Текущая пандемия вируса SARS-CoV-2 происходит одновременно в минимуме 25-го цикла 11-летней солнечной активности (СА) при общем низком уровне квазистолетнего цикла СА. Ее особенностью является значительная вариабельность числа летальных исходов на 1 млн населения в разных странах, причем максимальные значения летальности наблюдаются в достаточно благополучных странах с высоким уровнем развития и организации медицины (Рисунок 2). При этом самые строгие карантинные меры оказываются неэффективными. Более того, относительная летальность в Иране в 5-8 раз меньше, чем в Швейцарии и Бельгии. Парадоксальная разница в летальности (более чем в 5-15 раз) требует поиска факторов, не связанных с эпидемиологическими мерами и медицинским обслуживанием в конкретной стране.

Наиболее тяжело заболевание протекает на территориях доминантной гаплогруппой является R1a, для которой оказалось характерно быстрое развитие эпидемии при низкой летальности и большом количестве бессимптомных больных. В северных областях России удельный вес R1a сокращается почти вдвое, уступая место гаплогруппе N1c. Различия в генетическом составе населения может объяснить существенную разницу развития первой волны эпидемии в Москве и Санкт-Петербурге.

Генетические вариации объясняют различия в силе иммунных реакций лейкоцитарных антигенов. Данная концепция находит свое подтверждение в статье (A. Nguyen с соавт., 2020). Гаплотип и индивидуальная генетическая изменчивость влияет на иммунные реакции и на способность населения реагировать на вирус SARS-CoV-2. Исследовался потенциал защитного иммунитета человеческих лейкоцитарных антигенов (ЧЛА – в

русской транскрипции, и HLA – в английской), соответствующего различным гаплогруппам в комплексном анализе *in vitro* эффективности связывания 145 генотипов HLA: -A, -B и -C для всех пептидов SARS-CoV-2. Выявлено, что HLA-B * 46: 01 (соответствующий одной из ветвей гаплогруппы R1b) имел наименьшее связывание пептидов для SARS-CoV-2, как и для SARS-CoV в ходе эпидемии, протекавшей в 2003 году. Эта группа может быть особенно уязвима для COVID-19. Обнаружено, что аллели HLA-B * 15: 03; HLA-A * 02: 02; HLA-C * 12: 03 (гаплогруппа R1a) показали наибольшую способность связывать пептиды SARS-CoV-2, а значит - большую устойчивость к вирусу [5].

Погодный режим местности оказывает влияние на локализацию очагов коронавируса и длительность периода первичного активного заражения населения. Оптимум распространения коронавируса наблюдается при +9 С (Бергамо в феврале 2020, Москва в марте-апреле-мае 2020). При этом сибирская часть России в первую волну коронавируса имела температуру преимущественно ниже нуля, и распространение эпидемии там практически отсутствовало. Однако температура является менее значимым фактором, чем генетический состав населения, который определяет скорость распространения, тяжесть протекания заболевания и летальность в локальных очагах пандемии COVID-19.

Выводы. Пандемия COVID-19 показала, что в условиях глубокого минимума СА развитие эпидемиологических процессов существенно зависит от геногеографического состава населения и погодных условий значительно больше, чем от строгости карантинных мер, уровня медицины или возрастного состава населения. Одним из самых существенных факторов распространения COVID-19 и уровня летальности является геногеографическое распределение населения. Уровень достижения коллективного иммунитета путем вакцинации также зависит от генетического состава населения. Он наиболее высок для стран и регионов с доминантной гаплогруппой R1b (около 80% для гаплогруппы R1b против 40% для гаплогруппы N). Понимание роли генетических вариаций лейкоцитарных антигенов различных гаплогрупп на течение COVID-19 поможет выявить лица с более высоким риском заболевания. Сочетание типизации HLA с тестированием COVID-19 позволит улучшить оценку вирусной тяжести в популяции, и адаптировать будущие стратегии вакцинации к генотипически уязвимым группам населения. Генетическая диагностика медицинского персонала способствует выявлению сотрудников больниц и скорой помощи, более устойчивых к SARS-CoV-2, при оптимизации оказания медицинской помощи населению и защиты самих медиков. Также понимание геногеографических особенностей распространения и тяжести протекания пандемии может помочь в планировании эпидемиологических и организационно-карантинных мероприятий, в заблаговременном распределении средств и медицинских ресурсов по регионам.

По-видимому, роль космофизических факторов и генетических различий населения усиливается после искусственной медицинской и социальной ликвидации основного управляющего фактора - естественной конкуренции среди жертв вирусов. В ближайшие 30 лет предполагается сохранение крайне низкой солнечной активности. В этих условиях можно ожидать двукратное увеличение числа пандемий (каждые 5-6 лет вместо 10-11 лет) с выраженными геногеографическими отличиями в развитии локальных эпидемий.

Список литературы

1. Рагульская М.В., Солнце и биосфера: миллиарды лет вместе. М.: Радиофизика, 2019, 147 с. <http://www.izmiran.ru/pub/izmiran/Ragulskaya-Sun-2019.pdf>
2. Ragulskaya M.V., Space weather and COVID-19 pandemic genogeography. J Nov Physiother Phys Rehabil, 2020, 7(1): 031-032.
3. Рагульская М.В., Обридко В.Н., Храмова Е.Г., Галактические факторы, молодое Солнце, Земля и биофизика живых систем. Биофизика, 2020, Т.65, № 4, С.804-817.
4. Рагульская М.В., Белишева Н.К., Космические лучи как фактор эволюционного отбора. Physics of Auroral Phenomena, Proc. 42 Annual Seminar, Apatity, 2019, P.250-252.
5. Nguyen A., David J.K., Maden S.K., Wood M.A., Weeder B.R., Nellore A., Thompson R.F., Human leukocyte antigen susceptibility map for SARS-CoV 2, Journal of Virology, 2020. DOI: 10.1128/JVI.00510-20

AUTHOR INDEX

A

Abunin A.A.	154
Abunina M.A.	154
Akhmetov O.I.	67
Andriyanov A.F.	168
Antonenko O.V.	172
Antonova E.E.	7, 59

B

Balabin Yu.V.	186
Barishev P.E.	146
Barkhatov N.A.	32
Barkhatova O.M.	52
Belakhovsky V.B.	63, 67, 186
Bessarab F.S.	130
Bhargawa A.	100
Bojilova R.	28
Borisenko A.V.	92
Budnikov P.A.	141

C

Comedi E.S.	79
------------------	----

D

Danilova O.A.	111
Dashkevich Z.V.	118
de Haro Barbas B.F.	79
Demin V.I.	168, 176, 181
Demkin V.M.	168
Despirak I.V.	12, 16, 20, 28, 36
Dolgacheva S.A.	133

E

Efishov I.I.	24, 55
Elias A.G.	79
Eselevich M.V.	46
Eselevich V.G.	46

F

Fedorenko Yu.V.	75, 141
Filatov M.V.	24, 55, 141
Fujii R.	126

G

Germanenko A.V.	186
Gromov S.V.	107
Gromova L.I.	107
Guinea V.	28, 122
Gutierrez Falcon A.R.	79
Gvozdevsky B.B.	186

H

Hosokawa K.	126
------------------	-----

I

Ivanov V.E.	118
------------------	-----

K

Kalacheva N.V.	191
Kalinin M.S.	115
Kalishin A.S.	146
Kashulin P.A.	191
Khomutov S.Yu.	46
Kirillov A.S.	122, 168, 172, 186
Kirpichev I.P.	7, 59
Kleimenova N.G.	12, 36, 75
Kozelova T.V.	16
Kozelov B.V.	16, 118, 141, 176, 181
Krainev M.B.	115
Kulikov Y.Y.	168
Kurita S.	126
Kuznetsova M.V.	75

L

Larchenko A.V.	75, 141
Losev A.V.	176
Lubchich A.A.	12, 16, 36
Lubchich V.A.	71

M

Makarov G.A.	42
Makarova L.N.	133
Manninen J.	75
Maurchev E.A.	186
Meshalkina N.S.	92
Mingalev I.V.	67
Mingalev O.V.	67
Mirmovich E.G.	137
Miyoshi Y.	63, 126
Mochalov A.A.	46
Moldavanov A.V.	81
Muravieva T.A.	181

N

Nikitenko A.S.	75
Nikolaev A.V.	133, 146
Novikov S.V.	146

O

Obridko V.N.	85
Ogawa Y.	126

Ovchinnikov I.L.	7
Oyama S.-I.	126

P

Panchenko V.A.	163
Parkhomov V.A.	46
Pilgaev S.V.	46, 75, 141
Pilipenko V.A.	63
Pipin V.V.	85
Podgorny A.I.	92
Podgorny I.M.	92
Ptitsyna N.G.	111
Pulinets M.S.	7

R

Radievsky A.V.	130
Ragul'skaya M.V.	195
Raita T.	46
Rakhmatulin R.A.	46
Raykova L.	28
Rogov D.D.	146, 154
Roldugin A.V.	141
Rozhdestvenskaya V.I.	96
Rozhdestvensky D.B.	96
Revunov S.E.	52
Revunova E.A.	32
Ryskin V.G.	168

S

Safargaleev V.V.	126
Sakharov Ya.A.	20
Sdobnov V.E.	111
Selivanov V.N.	20
Serebrennikova S.A.	150
Sergienko T.I.	126
Setsko P.V.	12, 20
Shagimuratov I.I.	24, 55
Sheiner O.A.	158
Shibalova A.S.	85
Shiokawa K.	63
Shishaev V.A.	168

Singh A.K.	100
Sokoloff D.D.	85
Sotnikov N.V.	7
Stepanova M.V.	7
Suvorova Z.V.	67
Svirzhevskaya A.K.	115
Svirzhevsky N.S.	115

T

Telegin V.A.	96, 163
Tepenitsyna N.Yu.	24, 55
Timchenko A.V.	130
Tsegmed B.	46
Tyasto M.I.	111

U

Ugrumov J.V.	146
Ul'iev V.A.	154
Undalova I.S.	32

V

Vorobjev V.G.	7, 32, 52, 59, 163
--------------------	--------------------

W

Werner R.	12, 28, 36, 122
----------------	-----------------

Y

Yagodkina O.I.	7, 32, 52, 59, 163
Yakimova G.A.	24, 55

Z

Zagainova Iu.S.	107
Zakharenkova I.E.	24, 55
Zbankov G.A.	163
Zossi B.S.	79
Zuboreva A.A.	52

ПОЛЯРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
183010, г.Мурманск, ул.Халтурина,15

POLAR GEOPHYSICAL INSTITUTE
15, Khalturina str., Murmansk, 183010, RUSSIA

