

УДК 523.62_726, 550.385, 550.338

В.А. Пархомов

*Байкальский государственный университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

А.В. Михалёв

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Российская Федерация*

К.Г. Ратовский

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Российская Федерация*

ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ, ПОЛНОЕ ИНОСФЕРНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ И СВЕЧЕНИЕ СРЕДНЕШИРОТНОЙ АТМОСФЕРЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ МОЩНУЮ МАГНИТНУЮ БУРЮ

Аннотация. В статье рассматриваются закономерности динамики режимов геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.002–5 Гц, генерация которых отражает взаимодействие с магнитосферой Земли солнечного волокна, выброшенного мощной солнечной вспышкой балла 3В. Выполнено сопоставление динамики смены типов и режимов геомагнитных пульсаций с динамикой свечения атмосферы в двух спектральных линиях и полного ионосферного поглощения радиоволн. Предлагается возможная модель наблюдаемых явлений.

Ключевые слова. Солнечное волокно, внезапное начало магнитной бури, геомагнитные пульсации, свечение нижней атмосферы.

Информация о статье. Дата поступления: 1 декабря 2021 г.

V.A. Parkhomov

*Baikal State University,
Irkutsk, Russian Federation*

A.V. Mikhalev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation*

K.G. Ratovskyi

*Institute of Solar-Terrestrial Physics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation*

GEOMAGNETIC PULSATIONS, BLACKOUT AND LOW-LATITUDE AURORA ASSOCIATED WITH POWER MAGNETIC STORM

Abstract. The research analyzed the regularities of the dynamics of geomagnetic pulsation regimes in the frequency range 0.002–5 Hz, the generation of which reflects the interaction with the Earth's magnetosphere of the solar filament ejected by a powerful solar flare of 3B. We compared the dynamics of the change in the types and modes of geomagnetic pulsations with the dynamics of the atmosphere glow in two spectral lines and the total ionospheric absorption of radio waves. The study developed a possible model of the observed phenomenon.

Keywords. Solar filament, sudden onset of a magnetic storm, geomagnetic pulsations, glow of the lower atmosphere.

Article info. Received 1 December 2021.

Введение

Магнитная буря 21 января 2005 г. была необычна тем, что под действием большого скачка давления и флуктуаций межпланетного магнитного поля в интервале от 17.12 до 24.00 геосинхронные спутники в полуденном секторе оказались в переходном слое между отошедшей земной ударной волной и магнитопаузой (магнитослой). Уникальность бури определялась также тем фактом, что ее главная фаза развивалась на фоне северной ориентации ММП. Начало бури связано с приходом к земле выброса корональной массы (СМЕ), передний фронт которого имел сложную структуру. После ударной волны к магнитопаузе в 18.46 UT подошел тангенциальный разрыв, на фронте которого скачок давления составил ~ 200 нПа. В течение почти двух часов с 18.46 до 20.35 UT, внешняя магнитосфера на $L > 5$ была уничтожена. Область авральных высыпаний была сильно смещена к экватору в результате чего полное поглощение радиоволн в ионосфере (радио блекаут) наблюдалось в Иркутске на магнитной широте 34° mLat. Магнитная буря сопровождалась возмущениями в ионосфере, атмосфере и геомагнитном поле [1–3].

Результаты наблюдений геомагнитных пульсаций

Рассмотрим особенности режима геомагнитных пульсаций 21.01.2005 г. Обзорная сонограмма геомагнитных пульсаций представлена на рис.1.

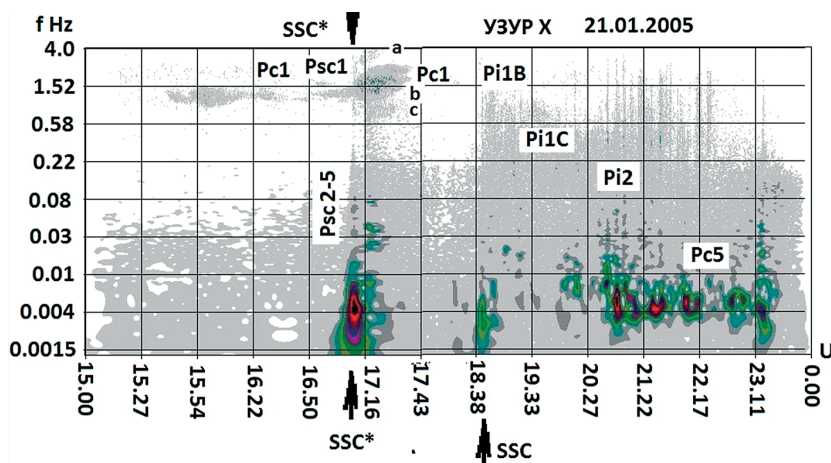


Рис. 1. Типы геомагнитных пульсаций, сопровождающих магнитную бурю 21.05.2005

Прежде всего отметим, что за 1.5 часа до внезапного начала бури на низкоширотной обсерватории Монды в полуночном секторе регистрируются пульсации Pc1 в частотном диапазоне $1 \div 1.4$ Гц. В вечернем секторе такие пульсации не наблюдались (рис. 2). SSC*, вызванное скачком давления на фронте ударной волны, сопровождается генерацией широкополосного всплеска во всем частотном диапазоне геомагнитных пульсаций Psc 1-5. На рис.1 усиление мощности сигнала видно на частотах, центрированных на $\sim 0.09\text{--}0.08$ Гц (Psc 2), ~ 0.03 Гц (Psc 3) и 0.004 Гц (Psc5).

Прежде всего, обращает на себя внимание режим пульсаций после SSC* в частотном диапазоне Pc1. На рис.2 приведены спектрограммы обсерваторий в вечернем и полуночном секторах. Разнос станций по долготе составляет $\sim 90^\circ$.

На обсерватории Монды частотная полоса Pc1, наблюдаемых до внезапного начала, расширяется с нарастанием частоты на переднем фронте от 1.3 Гц до 2.6 Гц. На обсерватории вечернего сектора Нурмиярви Pc1 до внезапного начала SSC* не наблюдались. Во время внезапного начала генерируются колебания в двух частотных полосах со средней частотой $f_1 \sim 0.5$ Гц и $f_2 \sim 1.5$ Гц. В ~ 17.30 генерируются колебания в частотной полосе $f_3 \sim 1.7\text{--}2.5$ Гц.

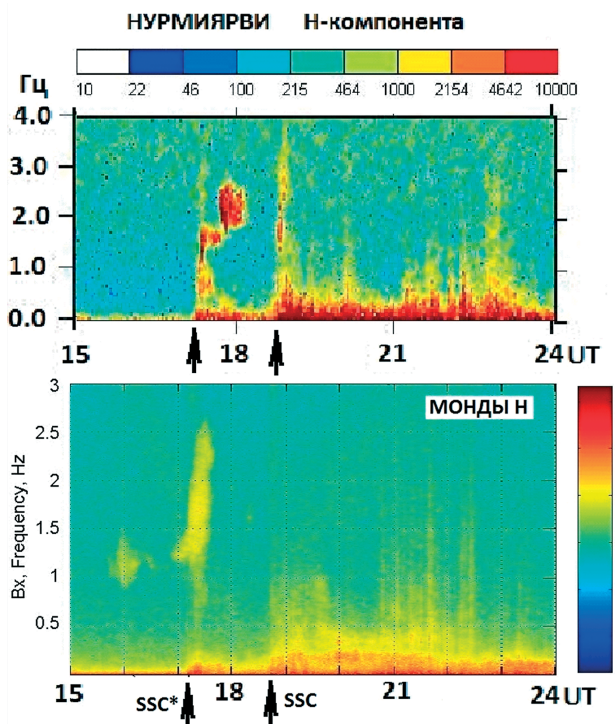


Рис. 2. Спектрограммы режима пульсаций на двух обсерваториях

На обеих обсерваториях смещение магнитопаузы под действием МУВ приводит к резким изменениям частоты колебаний, различающихся деталями и длительностью на двух обсерваториях. На обсерватории Нурмиярви, находящейся в вечернем секторе внезапное начало приводит к генерации пульсаций в двух частотных полосах $f_1 \sim 0.5$ и $f_2 \sim 1.5$ Гц и спустя ~ 20 мин. возбуждаются колебания в частотном диапазоне $f_3 \sim 1.7\text{--}2.5$ Гц. На спектрограмме пульсаций, регистрируемых на обсерватории в околополуденном секторе (Монды) (0-3 LT), виден непрерывный рост частоты Pc1, регистрируемых до внезапного начала. На сонограмме с высоким разрешением по частоте и времени

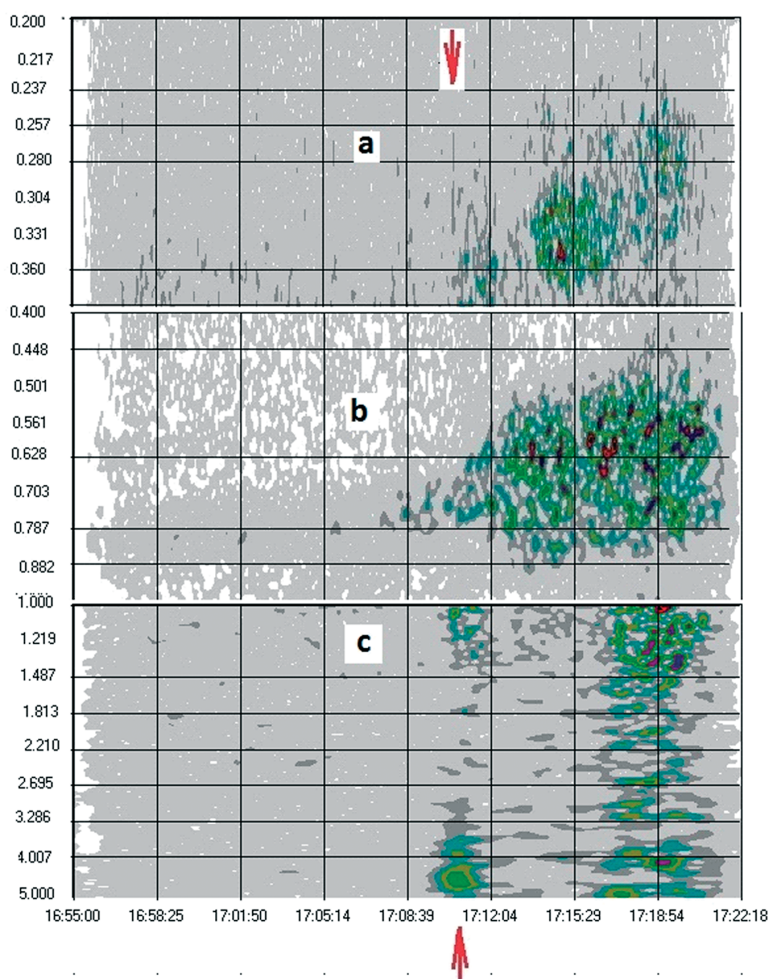


Рис. 3. Особенности в спектре Pc1

*a) $f_1 = (2.5 \div 3.1 \text{ Гц})$ колебания с резким нарастанием частоты, b) Pc1 $f_2 = (1.3 \div 2.5 \text{ Гц})$ и c) $f_3 = (1 \div 0.67 \text{ Гц})$ — низкочастотная полоса Pc1. Стрелка — начало SSC**

(рис. 3) на обсерватории, находящейся в около полуночном секторе в высокочастотном диапазоне можно выделить тонкие детали режима пульсаций — колебания одновременно генерируются в трех частотных полосах: а) $f_1 = (2.5 \div 3.1 \text{ Гц})$ колебания с резким нарастанием частоты, б) $Pc1 \ f_2 = (1.3 \div 2.5 \text{ Гц})$ и с) $f_3 = (1 \div 0.67 \text{ Гц})$ — низкочастотная полоса $Pc1$ (рис. 1 и 3). Возбуждение колебаний в трех частотных полосах может быть связано с одновременной инжекцией в область генерации частиц разного сорта — протонов и альфа-частиц.

Режим геомагнитных пульсаций, сопровождающих второе SSC, которое генерировалось при набегании на магнитосферу тангенциального разрыва с большим скачком концентрации давления (200 нПа), отличается от предыдущего по типу, режиму и длительности генерируемых пульсаций.

Начало предваряет высокочастотный (2.75–3.1 Гц) всплеск пульсаций (обозначен буквой В на рис.4а). Затем генерируется широкополосный всплеск Psc с выделенными спектральными максимумами. На рис. 4б видно, что в 19.20 начинается генерация PiC в двух полосах частот. В верхней полосе $f \sim 0.33 \text{ Гц}$ и $f^{\text{cp}} \sim 0.163 \text{ Гц}$ — колебания с падающей частотой. Вторая полоса PiC 0.2–0.1 Гц (Прямоугольники на рис.4б обозначены соответственно цифрами 1 и 2).

На рис. 4 а, б приведена общая и детализированная картина геомагнитных пульсаций в интервале 18.40–21.00 UT, отражаю-

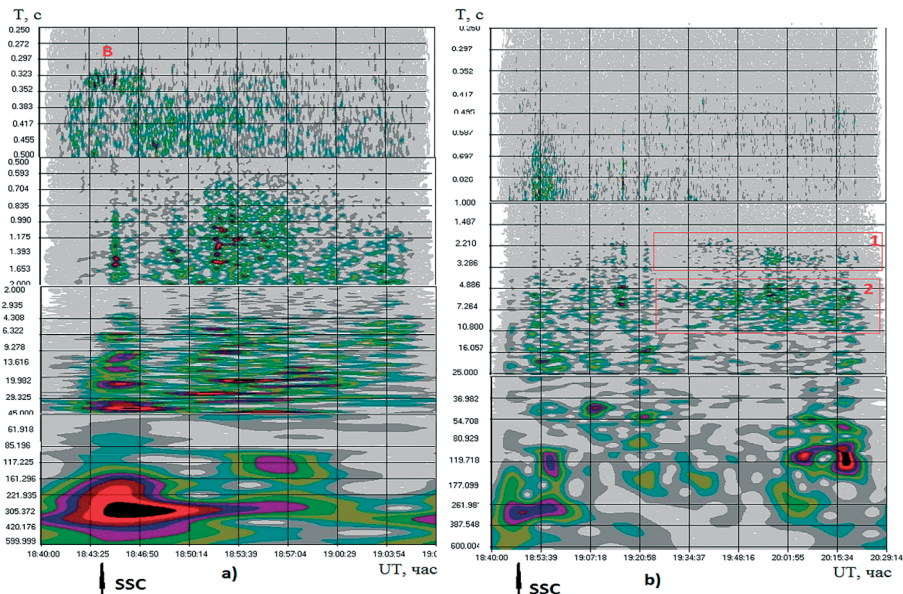


Рис. 4 а, б. Спектры пульсаций, сопровождающих второе внезапное начало

щая взаимодействие магнитопаузы с тангенциальным разрывом, сопровождающегося резким скачком давления СВ на 200 нПа. Контакт магнитосферы с разрывом отражается в виде широкополосного всплеска Psc 1-5, который отличается по спектральным особенностям от всплеска Psc 1-5, сгенерированного при взаимодействии магнитосферы с ударной волной. Отличие заключается в наличии в спектре явно выраженной резонансной структуры в диапазоне частот $0.022 \div 0.2$ Гц.

Другой особенностью режима геомагнитных пульсаций в интервале 19.18–20.30 является возбуждение колебаний в двух полосах частот $f_{cp} \sim 0.33$ Гц и $f_{cp} \sim 0.163$ Гц. В верхняя частотной полосе видно четкое падение частоты (нарастание периода) от 3.125 Гц до 2.84 Гц, что является индикатором нестационарности в области генерации колебаний. Такая нестационарность может быть связана либо с дрейфом источника, либо с изменением энергетического спектра частиц. Вторая полоса частот представляет собой P1C колебания, которые являются атрибутом восстановительной фазы суббури. Действительно, в интервале 19–20 UT AL индекс уменьшился от ~ 2000 нТл до ~ 1000 нТл. Такую динамику индексов авроральной магнитной активности можно интерпретировать двояко — либо началом восстановительной фазы суббури, либо смещением на юг зоны полярных сияний.

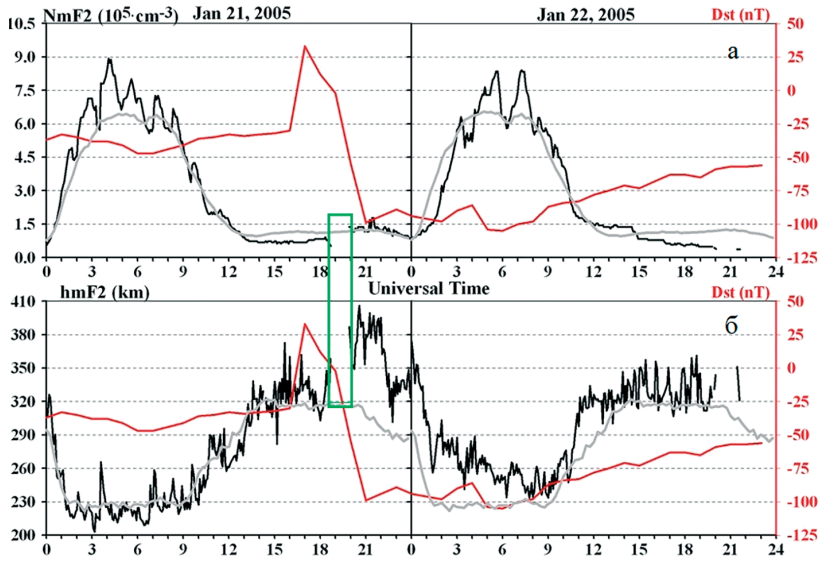
Максимум интенсивности P1C наблюдается на южной границе зоны полярных сияний и зависит от магнитной активности, смещаясь при возрастании геомагнитной активности от геомагнитной широты 67° до 60° . Геомагнитная широта Иркутска 34° . Следовательно, можно предположить, что граница авроральной зоны сместилась до широты Иркутска.

Полное ионосферное поглощение (блэкаут)

В интервале 18-20 UT резкое падение значения индекса западного электроджета, которое может наступить вследствие смещения к югу обсерваторий по которым он определяется, и начало резкого усиления интенсивности колебаний P1C в 18.43, можно интерпретировать как смещение границы высыпаний авроральных электронов к югу. Примечательно, что в этот интервал попадает время полного ионосферного поглощения (рис. 5 а, б) [4]. На рис. 5 а, б поглощение обозначено зеленым прямоугольником. В интервале, совпадающем с началом полного поглощения в слое D над Иркутском, регистрируются геомагнитные пульсации P1C (2 полосы частот ~ 0.35 Гц и ~ 0.163 Гц) (рис. 4 а, б).

Геомагнитные пульсации и свечение нижней атмосферы

Теперь рассмотрим вариации светимости нижней атмосферы. На верхней части Рис.6 приведена суммарная спектрограмма



The black-out at 1845 - 2000 UT on 21 Jan, was caused by precipitating particles

Рис. 5 а, б. Ионограммы Irkutsk Ionozone observations at (geo 53N, 103E; geom 34.1N, 152.6E). а) вариация электронной концентрации в слое F2 б) вариация максимальной высоты отражения. Зеленым прямоугольником выделен интервал полного поглощения (в этом интервале наблюдаются пульсации PiC). Красная кривая — ход Dst — индекса

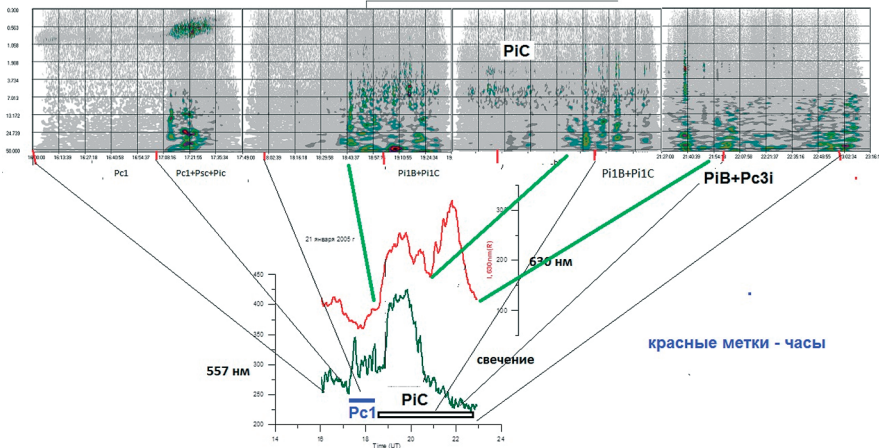


Рис. 6. Спанограмма геомагнитных пульсаций и свечение нижней атмосферы

геомагнитных пульсаций в интервале, от предшествующему началу бури и до ее затухания. В нижней части рисунка 6 даны вариации свечения верхней атмосферы в линиях 557 нм и 630 нм. Вид-

но, что максимум свечения в обеих линиях, также как и интервал максимального поглощения, совпадают с интервалом наблюдения геомагнитных пульсаций PiC (обозначено прямоугольником в нижней части рис.6). Заметим, что Золотухина Н.А. в статье [5] показала, что в Иркутске во время геомагнитной бури 16.04.2000 г. происходит последовательная смена режима геомагнитных пульсаций в диапазоне 0.1–1.5 Гц, определяемых тремя различающимися по спектральному составу типами электромагнитных волн. По морфологическим признакам эти волны могут быть определены как геомагнитные пульсации Pi1C, IPDP и полуструктурированные Pc 1, 2. В рассматриваемом событии наблюдаются геомагнитные пульсации одного типа, что может служить подтверждением предположения о единственности источника и типа генерируемого им излучений.

Модель связи режима геомагнитных пульсаций, ионосферного поглощения и сечения нижней атмосферы

Поскольку поглощение и свечение совпадают с интервалом наблюдения PiC, приведем сведения о морфологии пульсаций PiC и известных механизмах их генерации. Колебания этого типа обычно наблюдаются на широтах аврорального овала спустя 10–20 мин. после взрывной фазы суббури. Частота колебаний 0.1–0.3 Гц, амплитуда $0.1^2\text{--}5^3$ нТл. Согласно [6] колебания такого типа могут возбуждаться электронами с энергиями $\sim 10\text{--}20$ кэВ. Теория генерации таких пульсаций предложена в работах [6,7] согласно которым пульсации возбуждаются в магнитосфере в результате дрейфовой неустойчивости внутренней границы плазменного слоя. Альвеновские волны на границе плазменного слоя, модифицированные ларморовским дрейфом электронов могут стать неустойчивыми [6,7]. Инкремент неустойчивости пульсаций

$$\gamma / \omega = \beta(L / a),$$

где γ — инкремент, ω — угловая частота; β — отношение давления плазмы ($nmV^2/2$) к магнитному давлению ($B^2/8\pi$); L — параметр Мак-Илвейна; a — характерный масштаб неоднородности плазмы поперек магнитного поля.

Можно предложить следующую качественную интерпретацию связи ионосферного поглощения и геомагнитных пульсаций. Резкое сжатие магнитосферы приводит к смещению внутренней кромки плазменного слоя до широты Иркутска. В плазменном слое возрастает параметр β , что приводит к резкому возрастанию инкремента и усилению интенсивности пульсаций. Волны приводят к изменению пич-углового распределения частиц, их попаданию в конус потерь и резкому усилению потоков электронов.

Возрастание ионизации в D-слое ионосферы приводит к полному поглощению радиоволн и свечению атмосферы.

Подтверждением нашей гипотезы может служить анализ подобного события в [7] по данным мировой сети магнитометров с использованием техники инверсии магнитограмм. В цитируемой статье показано, что во время двух суббуревых активизаций в 17:20 и 19:40 UT в ходе супербури 20.11.2003 наблюдались всплески геомагнитных пульсаций P11B/P11C рекордной интенсивности, которые совпали с усилением свечения в линиях 557.7 и 630.0 нм. Наблюдаемая динамика интенсивности пульсаций и свечения связывается в [8] со смещением зоны продольных токов до широты Иркутска и высыпаниями электронов с энергиями $E \sim 0.1\text{--}3$ кэВ. Однако, в событии, рассмотренном нами, на спутниках серии LANL в этом временном интервале зарегистрировано резкое возрастание потока электронов в диапазоне энергий 1-20 кэВ. И такое расхождение требует дальнейшего анализа.

Выводы

Во время бури 21.01.2005 генерировалось два SSC — первое относится к типу SSC* и вызвано взаимодействием с магнитосферой МВБ, на фронте которой скачок давления вызван одновременными скачками скорости и плотности СВ. Второе SSC генерировалось при взаимодействии с магнитосферой тангенциального разрыва с большим скачком давления, на фронте которого скачок давления определялся только скачком концентрации. Во время обоих SSC генерировались широкополосные всплески Psc 1-5, различающиеся по морфологическим признакам. Различие, вероятно, связано с различием причин скачка давления.

Полное ионосферное поглощение и свечение в верхней атмосфере, наблюдаемые на среднеширотной станции, возможно, связано с высыпанием электронов с энергиями 10-20 кэВ, поток которых резко возрастает вследствие развития неустойчивости альвеновских волн на внутренней границе плазменного слоя, проекция которого смещается до средних широт. Волны, генерируемые на внутренней кромке плазменного слоя, распространяясь до ионосферы и трансформируясь в ней, наблюдаются на Земле в виде геомагнитных пульсаций типа P11C.

Благодарности

Работа Пархомова В.А. выполнена в рамках госбюджетной темы ФГБОУ ВО «БГУ» на 2021–2022 гг. «Системный анализ и методы обработки информации в космических исследованиях». Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара». URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abnormal Ionospheric Dynamics During Extreme Magnetospheric Compression / A.V. Dmitriev, A.V. Suvorova, L.L. Lazutin [et al.] // The 40th COSPAR Scientific Assembly, 2–10 August 2014. — Moscow, 2014. — URL: <https://www.cospar-assembly.org/admin/congress.php?congress=5>.
2. Du A.M. Anomalous Geomagnetic storm of 21–22 January 2005: A Storm main Phase during Northway IMFs / A.M. Du, B.T. Tsuruytani, W. Sun. — DOI 10.1029/2008ja013284 // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. — 2008. — Vol. 113, iss. A10.
3. Anomalous Dynamics of the Extremely Compressed Magnetosphere during 21 January 2005 Magnetic Storm / A.V. Dmitriev, A.V. Suvorova, L.L. Lazutin [et al.]. — DOI 10.1002/2013JA019534 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2014. — Vol. 119, iss. 2. — P. 877–896.
4. Отклик параметров среднеширотной атмосферы на геомагнитную бурю 21.01.2005 г. по данным оптических магнитных и радиофизических измерений / Л.А. Леонович, А.В. Михалёв, А.В. Ташилин [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. — 2013. — Т. 26, № 1. — С. 75–80.
5. Золотухина Н.А. Динамика магнитосферы при смене режима генерации Pc1,2 по данным геостационарных спутников / Н.А. Золотухина // *Солнечно-земная физика*. — 2005. — № 8 (121). — С. 96–98.
6. Гульельми А.В. МГД-волны в околоземной плазме / А.В. Гульельми. — Москва : Наука, 1979. — 139 с.
7. Михайловский А.Б. Новый механизм генерации геомагнитных пульсаций быстрыми частицами / А.Б. Михайловский, О.А. Похотелов // *Физика плазмы*. — 1975. — Т. 1, № 5. — С. 786–792.
8. Mishin V.V., Lunyushkin S.B., Mikhalev A.V., Klibanova Yu.Yu., Tsegmed B./ Extreme Geomagnetic and Optical Disturbances over Irkutsk during the 2003 November 20 Superstorm — DOI 10.1016/j.jastp.2018.10.013 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2018. — Vol. 151, pt. A. — P. 68–78.

REFERENCES

1. Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Lazutin L.L., Kovtyukh A.S., Ratovsky K.G., Parkhomov V.A. Abnormal Ionospheric Dynamics during Extreme Magnetospheric Compression. *The 40th COSPAR Scientific Assembly, August 2–10, 2014*. Moscow, 2014. Available at: <https://www.cospar-assembly.org/admin/congress.php?congress=5>.
2. Du A.M., Tsuruytani B.T., Sun W. Anomalous Geomagnetic Storm of 21–22 January 2005: A Storm main Phase during Northway IMFs. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, vol. 113, iss. A10. DOI: 10.1029/2008ja013284.
3. Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Lazutin L.L., Kovtyukh A.S., Ratovsky K.G. Anomalous Dynamics of the Extremely Compressed Magnetosphere during 21 January 2005 Magnetic Storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, vol. 119, iss. 2, pp. 877–896. DOI: 10.1002/2013JA019534.
4. Leonovich L.A., Mikhalev A.V., Tashchilin A.V., Rahmatulin R.A., Leonovich V.A., Pashinin A.Yu. The Response of Mid-Latitude Upper Atmospheric Parameters to January 21, 2005 Geomagnetic Storm as Deduced from Optical, Magnetic and Radio-Physical Measurements. *Optika atmosfery i okeana = Atmospheric and Oceanic Optics Journal*, 2013, vol. 26, no. 1, pp. 75–80. (In Russian).
5. Zolotukhina N.A. Magnetosphere Dynamics under the Generation Regime PC 1, 2 Change According to the Data of Geostationary Satellites. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*, 2005, no. 8, pp. 96–98. (In Russian).

6. Guglielmi A.V. *MHD Waves in the Near-Earth Plasma*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 139 p.

7. Mikhailovskii A.B., Pokhotelov O.A. New Mechanism for Generation of Geomagnetic Pulsations by fast Particles. *Fizika plazmy = Plasma Physics Reports*, 1975, vol. 1, no. 5, pp. 786–792. (In Russian).

8. Mishin V.V., Lunyushkin S.B., Mikhalev A.V., Klibanova Yu.Yu., Tsegmed B. Extreme Geomagnetic and Optical Disturbances over Irkutsk during the 2003 November 20 Superstorm. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, vol. 151, pt. A, pp. 68–78. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.10.013.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пархомов Владимир Александрович — доктор физико-математических наук, профессор, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: pekines_41@mail.ru.

Михалёв Александр Васильевич — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: mikhalev@iszf.irk.ru.

Ратовский Константин Георгиевич — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: ratovsky@iszf.irk.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir A. Parkhomov — D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: pekines_41@mail.ru.

Aleksandr V. Mikhalev — D.Sc. in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: mikhalev@iszf.irk.ru.

Konstantin G. Ratovsky — PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: ratovsky@iszf.irk.ru.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Пархомов В.А. Геомагнитные пульсации, полное ионосферное поглощение и свечение среднеширотной атмосферы, сопровождающие мощную магнитную бурю / В.А. Пархомов, А.В. Михалёв, К.Г. Ратовский. — DOI 10.17150/2713-1734.2021.3(4).279-289 // *System Analysis & Mathematical Modeling*. — 2021. — Т. 3, № 4. — С. 279–289.

FOR CITATION

Parkhomov V.A., Mikhalev A.V., Ratovsky K.G. Geomagnetic Pulsations, Blackout and Low-Latitude Aurorae Associated with Power Magnetic Storm. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2021, vol. 3, no. 4, pp. 279–289. DOI: 10.17150/2713-1734.2021.3(4).279-289.