

УДК 550(385.37+385.4+388.8)

ВСПЛЕСКИ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ И ИЗЛУЧЕНИЯ НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫХ ИЗМЕНЕНИЯМИ ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ХОДЕ МАГНИТОСФЕРНОЙ БУРИ

© 2022 г. В. В. Мишин^{1,*}, Ю. Ю. Клибанова², член-корреспондент РАН А. В. Медведев¹, А. В. Михалев¹, Ю. В. Пенских¹, Р. А. Марчук¹

Поступило 25.02.2022 г.

После доработки 03.03.2022 г.

Принято к публикации 09.03.2022 г.

Исследуется динамика геомагнитных возмущений и оптического излучения атмосферы на среднеширотных обсерваториях вблизи Иркутска во время сильной магнитосферной бури в ночном секторе 21.10.2001. В ходе бури наблюдались три полуторачасовых интервала увеличения динамического давления солнечного ветра (СВ), которые вызвали усиления суббуревой активности, всплески широкополосных геомагнитных пульсаций и излучения атмосферы в авроральных эмиссиях 557.7 и 630.0 нм. Во время этих всплесков южная граница зоны продольных токов и аврорального овала приближалась к пунктам наблюдения, однако оставаясь севернее на 5° – 7° . Возможные механизмы усиления пульсаций и оптических эмиссий связаны с эффектами воздействия изменений давления СВ на магнитосферу: суббуревыми активизациями, изменениями продольных и ионосферных токов, высыпанием электронов. Особенности высокочастотной части спектра пульсаций и их пространственного распределения определяются свойствами ионосферного альвеновского резонатора и ионосферного МГД волновода.

Ключевые слова: динамическое давление, магнитосферная буря, широкополосные пульсации, излучение ночной атмосферы, продольные токи, авроральный овал

DOI: 10.31857/S2686739722060123

ВВЕДЕНИЕ

Главными объектами космической погоды – активно развиваемого направления солнечно-земной физики – являются магнитосферные суббури и бури. Суббуря – это интенсивное возмущение системы магнитосфера–ионосфера, вызванное вариациями параметров солнечного ветра (СВ). Суббури могут развиваться в течение 1–3 ч изолированно, а также во время более глобального возмущения – магнитосферной бури, которая продолжается в течение суток и вызывается крупными неоднородностями СВ, образующимися во время солнечных вспышек и выбросов корональной массы. На переднем фронте таких неоднородностей часто образуются ударные волны с резким перепадом динамического давления СВ (P_d) и межпланетного магнитного поля (ММП). Их воздействие на магнитосферу вызы-

вает внезапное начало бури (SSC), во время которого наблюдаются усиления электрических полей и токов в ионосфере и магнитосфере, высыпания энергичных частиц, полярные сияния и геомагнитные пульсации в широком диапазоне периодов ($T = 0.3$ – 600 с) [1–3]. В наших предыдущих работах [4–9] были исследованы сильные бури ($Dst < -100$ нТл), в ходе которых сильные вариации давления СВ наблюдались только в начале бурь, а затем отсутствовали. Было показано, что даже при постоянном P_d развитие суббурь может вызывать не только значительное усиление вытекающих продольных токов (ПТ) и полярных сияний, но и расширение их области на юг. Когда южная граница овала ПТ и авроры достигала широты Иркутска, там наблюдались всплески широкополосных пульсаций типа PiV и усиления излучения ночной атмосферы в авроральных эмиссиях атомарного кислорода [OI] 557.7 и 630.0 нм. Всплески пульсаций, полярных сияний и излучения атмосферы в эмиссии 557.7 нм обычно связывают с вариациями ПТ и высыпанием электронов с энергиями >1 кэВ, а излучения в эмиссии 630.0 нм – с высыпанием сверхтепловых (≤ 10 эВ) ([1]; см. также ссылки в [8]). Известно, что высы-

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

²Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, Иркутск, Россия

*E-mail: vladm@iszf.irk.ru

пания энергичных частиц и связанные с ними полярные сияния и геомагнитные пульсации могут стимулироваться вариациями давления СВ, что исследовалось чаще всего на дневной стороне [10] или в ограниченном частотном диапазоне [11, 12]. В данной работе исследуются особенности динамики широкополосных геомагнитных пульсаций, ПТ и свечения атмосферы в ночном секторе на широте Иркутска, вызванной несколькими сильными полуторачасовыми изменениями динамического давления СВ во время бури 21.10.2001.

БАЗА ДАННЫХ

Для анализа используются данные измерений геомагнитного поля с временным шагом 1 мин обсерватории Иркутск (CGM: 47.26° Ф, 177.30° Л) и с частотным разрешением $\Delta f \geq 10$ Гц обсерватории Монды (CGM: 47.5° Ф, 177.5° Л). Собственное излучение верхней атмосферы Земли в эмиссиях атомарного кислорода [OI] 557.7 и 630.0 нм зарегистрировано при помощи зенитных фотометров с интерференционными качающимися светофильтрами ($\Delta\lambda/2 \sim 1-2$ нм) в Геофизической обсерватории Торы ИСЗФ СО РАН (CGM: 47° Ф, 177° Л) с временным шагом 28 с. Используются также данные спутниковых наблюдений параметров СВ, ММП (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) и наблюдений полярных сияний в ультрафиолетовом диапазоне на спутнике IMAGE (<http://supermag.jhuapl.edu>); значения AE индекса геомагнитной активности взяты с сайта (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc>). Временные ряды карт распределения ПТ в ионосфере получены техникой инверсии магнитограмм [13] по 1-мин данным мировой сети наземных магнитометров (<http://supermag.jhuapl.edu>).

ДАнные ГЕОМАГНИТНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Набегание на магнитосферу фронта неоднородности СВ со скачком динамического давления P_d от 2 до 20 нПа и южной компоненты ММП B_z от -5 нТл до -21 нТл вызвало внезапное начало магнитосферной бури SSC в 16:48 UT, 21.10.2001. Поворот ММП на юг в 15:20 UT вызвал начало подготовительной фазы суббури (рост AE). Поэтому SSC сопровождалось началом взрывной фазы суббури (скачок AE индекса от 300 нТл до 1350 нТл, рис. 1 а, 1 б). Главная фаза бури продолжалась до 22 UT, когда индекс D_{st} достиг своего минимума ($D_{st} = -159$ нТл) ([http://wdc.kyoto-u.ac.jp](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp)). Мы анализируем период бури от момента SSC и до конца ее главной фазы, вскоре после которой из-за утренней освещенности прекратилась регистрация излучения атмосферы в обсерватории Торы (22:21 UT или 05:21 MLT). В ходе главной фазы наблюдались три полтора-

часовых интервала, во время которых сильные увеличения давления СВ (до значений $P_d = 35$ нПа) почти синхронно сопровождалась активизациями геомагнитной активности (усилением AE -индекса до значений $AE = 1700$ нТл) и расширением границы овала ПТ и полярных сияний к средним широтам. Во время SSC на среднеширотной станции Монды наблюдался всплеск широкополосных пульсаций Psc, а на обсерватории Торы — слабый линейный рост интенсивности эмиссии 630.0 нм до $\Delta I_{630.0} \sim 30-40$ Рл (рис. 1, интервал 16:48–17:15 UT). После SSC спутник IMAGE зарегистрировал высокоширотные полярные сияния, южная граница которых (как и зон ПТ) находилась севернее Иркутска на $\Delta\Phi \leq 20^\circ$ (рис. 2).

Следующие мощные широкополосные всплески геомагнитных пульсаций PiB наблюдались в моменты 18:18 UT и 18:30 UT, когда резкие изменения AE -индекса в конце 1-го и начале 2-го интервалов вариаций AE вызвали два резких пика в вариации H -компоненты геомагнитного поля в обсерватории Иркутска. В это время интенсивность ПТ и полярных сияний усилилась, южная граница зоны R2 ПТ и аврорального овала приблизилась к Иркутску на $\Delta\Phi = 5^\circ$ (рис. 2). Около 18:10 UT начинает резко усиливаться интенсивность излучения в линии 630.0 нм, которая достигает максимума в момент второго всплеска пульсаций (18:30 UT, рост на $\Delta I_{630.0} > 500$ Рл) и начинает уменьшаться после нескольких колебаний. В третьем интервале (после 20 UT) два нарастающих по величине импульса давления СВ вызвали быстрые нарастающие по амплитуде периодические усиления геомагнитной активности, смещение овала сияний к Иркутску ($\Delta\Phi = 5^\circ$), усиление пульсаций PiB/PiC (рис. 1е) и излучения атмосферы в зеленой и красной линиях. В 20:10 UT зарегистрирован сильный скачок интенсивности эмиссии 557.7 нм на $\Delta I_{557.7} \approx 300-400$ Рл ($I_{557.7} \approx 800$ Рл) и опережавший его рост эмиссии 630.0 нм (рис. 1а, ж, з).

ОБСУЖДЕНИЕ

Для более полного анализа отклика внутренних параметров системы магнитосфера–ионосфера на изменения P_d были построены динамические спектры колебаний AE -индекса, геомагнитных пульсаций и эмиссий (рис. 1 г–з). Отклик в ходе главной фазы бури (16:48–22:00 UT) хорошо прослеживается в спектрах почти всех параметров. Границы трех интервалов вариаций P_d и AE (вертикальные пунктирные линии) совпадают с моментами резкого изменения амплитуды пульсаций, AE -индекса и H -компоненты в Иркутске. В эти моменты также резко меняются продольные и ионосферные токи, что обычно сопровождается высыпаниями энергичных частиц — два

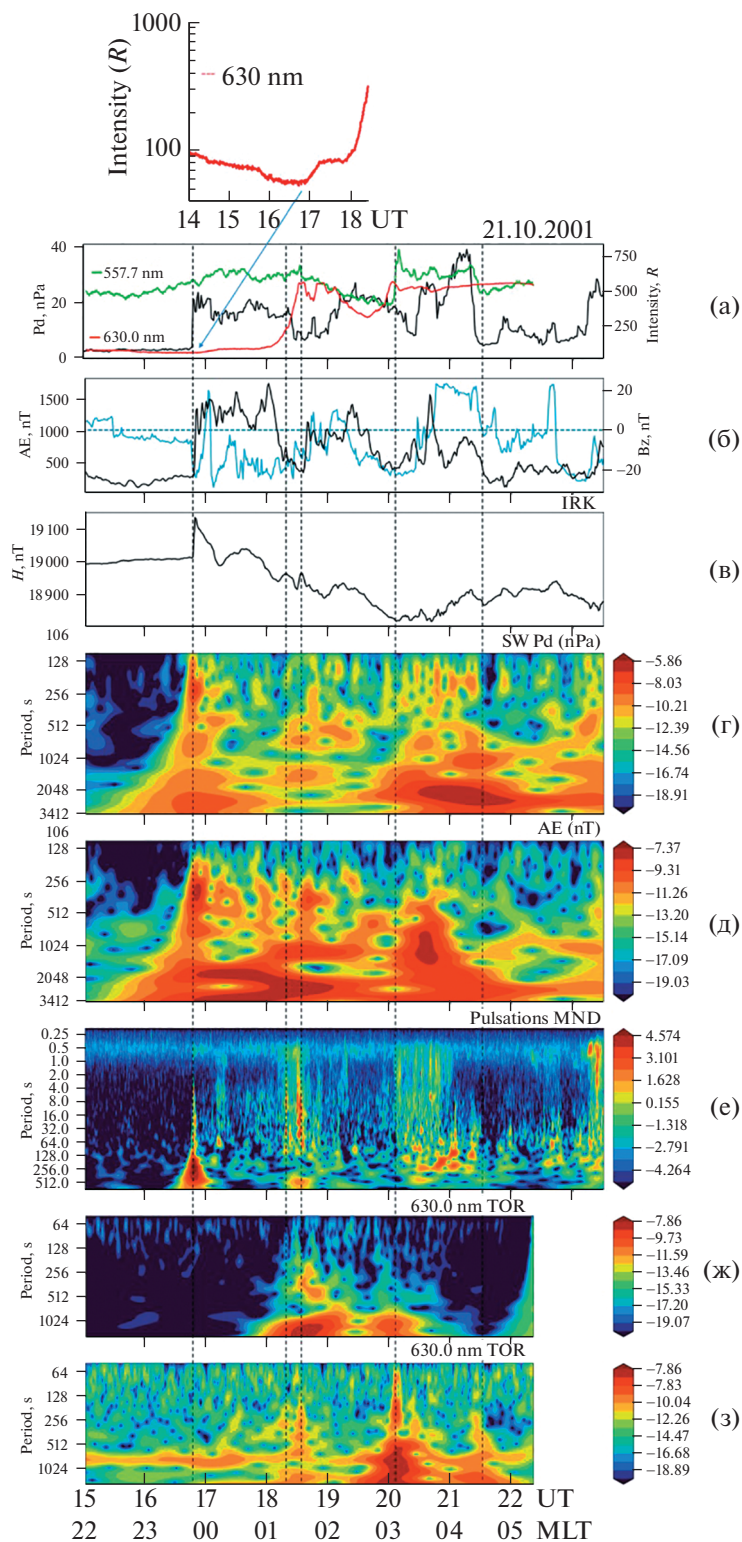


Рис. 1. Буря 21.10.2001. Вариации: (а) давления СВ P_d и интенсивностей эмиссий 557.7, 630 нм (сверху – поведение эмиссии 630.0 нм в логарифмическом масштабе вблизи Ssc); (б) индекса геомагнитной активности AE и компоненты ММП B_z ; (в) H -компоненты геомагнитного поля (1-мин данные обсерватории IRK); динамический спектр: (г) давления СВ, (д) AE -индекса, (е) геомагнитных пульсаций, (ж) и (з) – излучения ночного неба в красной и зеленой линиях. Вариации амплитуды (характеризуются цветной шкалой справа в относительных единицах) в зависимости от периода (ордината) и мирового времени UT и местного магнитного времени MLT (абсцисса).

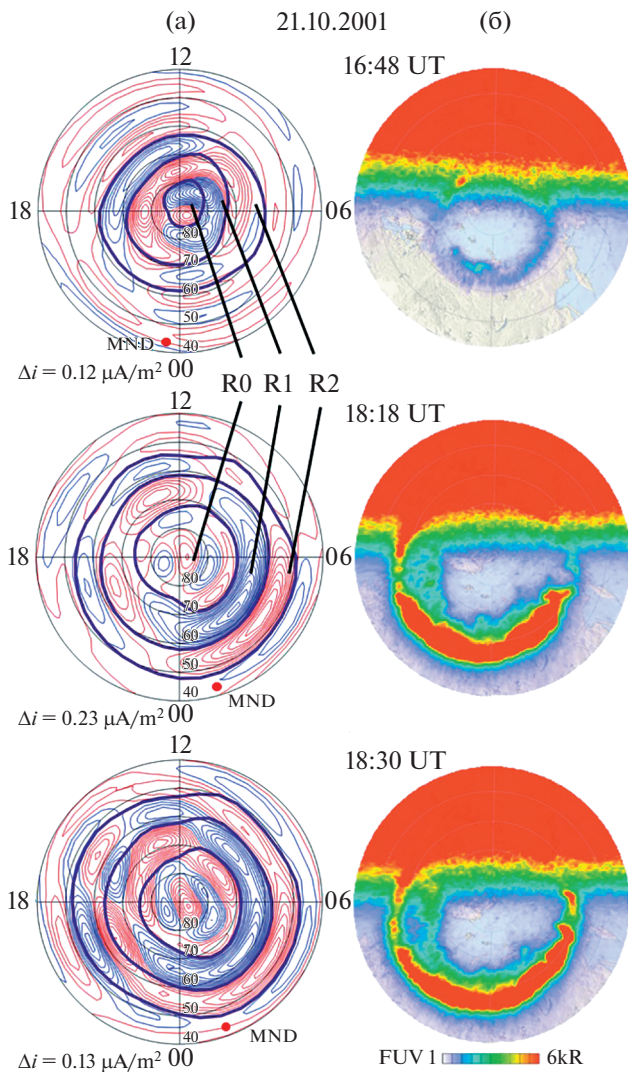


Рис. 2. Карты продольных токов. Жирные синие линии – границы зон ПТ R0, R1, R2, красный кружок – положение обсерватории Монды (MND) в координатах дипольная геомагнитная широта (41.93°) – MLT (а). Карты полярных сияний – данные наблюдений спутника IMAGE (б).

фактора, вызывающих раскачку короткопериодных всплесковых пульсаций типа Pi1B в ионосферном альвеновском резонаторе (см. ссылки в [8]). Резкие изменения интенсивности излучения (панель а) и спектра (панели ж, з) следуют такому же поведению в пульсациях. Исключение составляет момент SSC, когда скачок AE -индекса и H -компоненты сопровождался всплеском пульсаций Psc в Иркутске, что объясняется эффектом прохождения ударной волны через магнитосферу [14, 15]. Слабый отклик излучения ассоциируется с большой удаленностью овала полярных сияний и зоны высыпаний от обсерватории Торы ($\Delta\Phi = 20^\circ$). Так, в начале бури 06.04.2000 наблюдалось усиление излучения при $\Delta\Phi = 10^\circ$ [8].

Важно отметить характерную разницу в описанных выше явлениях от наблюдаемых нами в ходе других бурь. Ранее сильные всплески пульсаций и излучения атмосферы на обсерваториях ИСЗФ обычно наблюдались в ходе бурь при отсутствии заметных изменений P_d , когда южная граница зоны 2 ПТ достигала широты Иркутска. Теперь же, при сильных изменениях давления СВ, эти всплески наблюдались, когда граница приближалась до пунктов регистрации не ближе $\Delta\Phi = 5^\circ$. Однако в начале бури 06.04.2000 наблюдался рост интенсивности обеих эмиссий, когда это расстояние было ($\Delta\Phi = 10^\circ$) вдвое меньше [8], чем в SSC бури 21.10.2001. В [12] по данным большого набора станций показано, что всплесковые пульсации во время SSC наблюдаются глобально. Можно предположить, что в отличие от пульсаций Psc, отклик в свечении атмосферы на воздействие ударного фронта во время SSC проявляется при удалении от овала сияний и ПТ на $\Delta\Phi \leq 10^\circ - 12^\circ$, что нуждается в проверке по другим событиям.

Обсудим возможные механизмы усиления пульсаций и оптических эмиссий изменениями давления СВ на магнитосферу: суббуревыми активизациями, изменениями продольных и ионосферных токов, высыпанием как энергичных, так и тепловых/сверхтепловых электронов. В [10] показано, что вариации давления СВ могут вызывать сжатия дневной магнитосферы, развитие там циклотронной неустойчивости, раскачку ОНЧ- и ЭМИЦ-волн и высыпание частиц. Однако для околополуночной области вблизи зоны 2 вытекающих ПТ-генерацию пульсаций с ионами связать трудно. Поэтому мы полагаем, что здесь всплески пульсаций и эмиссии 577.7 нм излучения вызывались резкими изменениями ПТ, ионосферных токов и высыпаний энергичных электронов. Вклад в возбуждение эмиссии 630.0 нм наряду с известными механизмами среднеширотного излучения может давать механизм высыпания надтепловых электронов вблизи плазмопаузы резонансными альвеновскими волнами (в течение порядка их десяти периодов), возбуждаемыми ударной волной или быстрыми магнитозвуковыми волнами, которые создают в магнитосфере импульсы давления СВ [16].

Регистрацию всплесков пульсаций и излучения атмосферы в ночном секторе на средних широтах на расстоянии $\Delta\Phi = 5-7^\circ$ от границы овала ПТ можно связать с: а) эффектами сжатия магнитосферы [18], б) возможностью распространения МГД-волн в ионосферном альвеновском волноводе [17].

Наблюдаемую модуляцию вариаций геомагнитной активности сильными возрастаниями давления СВ без существенной задержки можно объяснить большой величиной переносимого в магнитосферу потока Пойнтинга, который обес-

печивался большими значениями южной и азимутальной компонент ММП (20 нТл) и P_d . Сжатия магнитосферы импульсами P_d могли вызывать: а) рост площади полярной шапки и увеличение потока энергии через нее в ионосферу [18] и б) уменьшение масштаба магнитного шира – толщины токового слоя на дневной магнитопаузе и в нейтральном слое хвоста и усиление скорости пересоединения.

Легко увидеть, что амплитуда модуляции AE -индекса импульсами P_d во время второго и третьего интервалов главной фазы ослаблялась вариациями ММП (рис. 1). Так, меньшая амплитуда третьего пика в вариации AE -индекса в 21 UT ассоциируется с поворотом ММП на север. Этот факт соответствует выводам [18] об усилении сжатия магнитосферы и расширении полярной шапки южным ММП при росте P_d .

ВЫВОДЫ

Развитие главной фазы магнитосферной бури 21.01.2001 модулировано мощными квазипериодическими полторачасовыми импульсами давления СВ, сопровождаемыми синхронными усилениями геомагнитной активности, которые вызывают всплески широкополосных пульсаций и излучения ночной атмосферы на средних широтах при приближении зоны ПТ и овала полярных сияний на расстояние $\Delta\Phi = 5^\circ - 7^\circ$. Усиления активности импульсами давления СВ могут ослабляться северным ММП.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” [http://ckprf.ru/ckp/3056]. Мы благодарны NASA CDAWEB за предоставление спутниковых данных, доступных на сайтах [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/], обладателям информации за возможность использования данных *World data center, Kyoto* [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc], а также 1-мин геомагнитных данных проекта *SuperMAG* [http://supermag.jhuapl.edu].

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A., Slater D.W.* Spectrometric and 747 Photometric Observations of Low-latitude Aurorae // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. № A5. P. 7695–7709.

2. *Heacock R.R.* Two Subtypes of Pi Micropulsations // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72 (15), P. 3905–3917. <https://doi.org/10.1029/JZ072i015p03905>
3. *KANGAS J.* Morphology and Physics of Short-period Magnetic Pulsations // *Space Sci. Revs.* 1998. V. 83. P. 435–512.
4. *Klibanova Y.Y., Mishin V.V., Tsegmed B.* Short-period Geomagnetic Pulsations and Optical Glows in the Mid-latitude Atmosphere during Superstorms // *Sol.-Terr. Phys.* 2008. V. 2, № 12. P. 334–335.
5. *Mishin V.V., Lunyushkin S.B., Mikhalev A.V., et al.* Extreme Geomagnetic and Optical Disturbances over Irkutsk during the 2003 November 20 Superstorm // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 2018. V. 181. P. 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.013>
6. *Klibanova Yu. Yu., Mishin V.V., Mikhalev A.V., et al.* Dynamics for Geomagnetic Pulsations, Field Aligned Currents, and Airglow at Mid latitudes within Substorm Activations during Superstorms // *Geodynamics & Tectonophysics.* 2019. V. 10. № 3. P. 673–685. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0434>
7. *Мухалев А.В.* Среднеширотные сияния в 23–24-х солнечных циклах по данным наблюдений на юге Восточной Сибири // *Солнечно-земная физика.* 2019. Т. 5. № 4. С. 80–89. <https://doi.org/10.12737/szf-54201909>
8. *Mishin V.V., Tsegmed B., Klibanova Yu. Yu., Kurikalova M.A.* Burst Geomagnetic Pulsations as Indicators of Substorm Expansion Onsets During Storms // *J. Geophys. Res.*, 2020. V. 125, № 10. <https://doi.org/10.1029/2020JA028521>
9. *Золотухина Н.А., Полех Н.М., Мухалев А.В. и др.* Особенности эмиссии 630.0 и 557.7 нм в области главного ионосферного провала: 17 марта 2015 г. // *Солнечно-земная физика.* 2021. Т. 7. № 3. С. 57–71. <https://doi.org/10.12737/szf-73202105>
10. *Яхнин А.Г., Тутова Е.Е., Демехов А.Г. и др.* Одновременные наблюдения ЭМИЦ- и КНЧ/ОНЧ-волн и высыпаний энергичных частиц во время множественных сжатий магнитосферы // *Геомагнетизм и аэронаука.* 2019. Т. 59. № 6. С. 714–726. <https://doi.org/10.1134/S0016794019060142>
11. *Mishin E.V., Foster J.C., Potekhin A.P., et al.* Global ULF Disturbances during a Stormtime Substorm on 25 September 1998 // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № A12. P. 1486. <https://doi.org/10.1029/2002JA009302>
12. *Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Яхнин А.Г. и др.* Глобальный импульсный всплеск геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2–5 Гц, как предвестник внезапного начала геомагнитной бури 17 марта 2015 г. // *Космич. исслед.* 2017. Т. 55. № 5. С. 323–336. <https://doi.org/10.7868/S0023420617050016>
13. *Lunyushkin S.B., Pensikh Yu.* Diagnostics of Auroral Oval Boundaries on the Basis of the Magnetogram Inversion Technique // *Sol.-Terr. Phys.* 2019. V. 5. № 2. P. 88–100. <https://doi.org/10.12737/stp-52201913>
14. *Samsonov A.A., Sibeck D.G., Imber J.* MHD Simulation for the Interaction of an Interplanetary Shock with the Earth’s Magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2007.

- V. 112. № A12220.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012627>
15. *Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Eselevich V.G., et al.* Solar Wind Diamagnetic Structures as a Source of Substorm-like Disturbances // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 2018. V. 181. P. 55–67.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.010>
16. *Leonovich A.S., Kozlov D.A., Vlasov A.A.* Kinetic Alfvén Waves near a Dissipative Layer // *J. Geophys. Res.* 2021. V. 126. N e2021JA029580.
<https://doi.org/10.1029/2021JA029580>
17. *Pilipenko V.A., Chugunova O.M., Engebretson M.J., Les-sard M.* Trans-polar Propagation of Pi1 Wave Burst as Observed by an Antarctic Array during the Themis 2007/03/23 Substorm // “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. 24 Ann. Seminar, Apatity. PGI. 2011. P. 86–89.
18. *Mishin V.V., Mishin V.M., Karavaev Yu., et al.* Saturation of Superstorms and Finite Compressibility of the Magnetosphere: Results of the Magnetogram Inversion Technique and Global PPMLR-MHD Model // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 6734–6741.
<https://doi.org/10.1002/2016GL069649>

BURSTS OF GEOMAGNETIC PULSATIONS AND GLOW IN THE NIGHT ATMOSPHERE CAUSED BY SOLAR WIND PRESSURE CHANGES DURING A MAGNETOSPHERIC STORM

**V. V. Mishin^{a, #}, Yu. Yu. Klibanova^b, Corresponding Member of the RAS A. V. Medvedev^a, A. V. Mikhalev^a,
 Yu. V. Pensikh^a, and R. A. Marchuk^a**

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

^b*Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: vladm@iszf.irk.ru*

We study dynamics of geomagnetic disturbances and optical airglow at mid-latitude observatories near Irkutsk during the 21.10.2001 strong magnetospheric storm in the night sector. During the storm, three 1.5-hour intervals of the solar wind (SW) dynamic pressure increase were observed, which caused intensification of substorm activity, bursts of broadband geomagnetic pulsations, and airglow in auroral emissions at 557.7 nm and 630.0 nm. During these bursts, the southern boundary of the zone of field-aligned currents and the auroral oval approached the observation points, but remained 5°–7° to the north. Possible mechanisms of amplification of pulsations and optical emissions are related to the effects of SW pressure changes on the magnetosphere: substorm activations, changes in field-aligned and ionospheric currents, precipitation of both energetic and thermal/superthermal electrons. The features of the high-frequency part of the pulsation spectrum and their spatial distribution are associated with properties of the ionospheric Alfvén resonator and waveguide.

Keywords: dynamic pressure, magnetospheric storm, broadband pulsations, airglow, field-aligned currents, auroral oval