

ВЛИЯНИЕ РЕЗКОГО УМЕНЬШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ НОЧНЫХ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

В.Б. Белаховский, В.Г. Воробьев (Полярный геофизический институт, г. Апатиты)
e-mail: belakhov@mail.ru

Аннотация. Данные меридиональных сканирующих фотометров сети NORSTAR и камер всего неба сети THEMIS использованы для детального исследования отклика ночных полярных сияний на резкое уменьшение динамического давления солнечного ветра, наблюдаемое 28 сентября 2009 года. Уменьшение динамического давления сопровождалось соответствующей депрессией магнитного поля в индексе SYM-H и появлением отрицательного импульса длительностью 8-10 мин и амплитудой 150-200 нТл в горизонтальной компоненте магнитного поля на станциях ночного сектора авроральной зоны. Начало отрицательного SI импульса, определённое по вариациям магнитного поля в ~06:50 UT, в полуночном секторе авроральной зоны сопровождалось быстрым распространением к полюсу дискретных форм полярных сияния и увеличением их интенсивности. Примерно через 8 мин после SI в ночном секторе наблюдалось быстрое уменьшение интенсивности аврорального свечения в эмиссиях атомарного кислорода (OI) 557.7, 630.0 нм и водорода (H β) 486.1 нм. Таким образом, показано, что в рассмотренном событии отклик ночных полярных сияний на отрицательный SI импульс имел двухступенчатый характер: с одной стороны быстрое движение к полюсу дискретных форм сияний и резкое увеличение их интенсивности в начале отрицательного SI, с другой – резкое уменьшение интенсивности аврорального свечения с задержкой в ~8 мин относительно SI.

1. Введение. Изучению SSC (*storm sudden commencement*) импульсов и особенностям отклика магнитосферы на SSC посвящено достаточно много работ, поскольку именно SSC может являться индикатором начала геомагнитной бури. Импульсы SSC (а также положительные SI+ импульсы) обусловлены резким увеличением динамического давления солнечного ветра. С появлением SSC связан целый комплекс геофизических явлений, как-то поджатие магнитосферы, высыпание заряженных частиц различных энергий в атмосферу Земли, появление различных типов геомагнитных пульсаций и т.д. Характеристики полярных сияний во время SSC исследовались с помощью как наземных [Воробьев, 1974], так и спутниковых наблюдений [Zhou, 2003].

С другой стороны, резкое уменьшение динамического давления солнечного ветра приводит к появлению отрицательных SI импульсов. Работ, посвященных изучению особенностей взаимодействия магнитосферы с отрицательными SI, гораздо меньше. В работе [Takeuchi, 2000] было установлено, что причиной отрицательных SI могут также являться и тангенциальные разрывы в солнечном ветре. Импульсы SI- и SI+ часто наблюдаются в паре и могут идти в разной последовательности. В работе [Liou, 2007] было показано, что в отдельных случаях отрицательные SI могут быть триггером суббури.

В работе [Belakhovsky et al., 2010] было обнаружено резкое уменьшение риометрического поглощения при отрицательном SI в утреннем секторе, однако отклик в сияниях имел сложный характер. В работе [Sato, 2001] по наблюдениям на камере всего неба было обнаружено, что яркость дискретных дуг сияний после отрицательного SI увеличилась, и полярные сияния перемещались к полюсу. По мнению авторов к уярчению дискретных дуг сияний могло привести резкое увеличение интенсивности продольных токов, вызванное отрицательным SI, при возбуждении резонанса силовых линий внутри магнитосферы. Вместе с тем, в случаях, представленных в работе [Liou, 2006] по данным ультрафиолетового приемника на спутнике POLAR, наблюдалось уменьшение яркости полярных сияний с задержкой ~ 10 мин относительно момента SI.

В настоящей работе детально рассмотрен отклик ночных полярных сияний на отрицательный SI импульс в событии 28 сентября 2009 г. с использованием наземных оптических наблюдений сетей NORSTAR, THEMIS (Канада).

2. Данные наблюдений. В работе использованы 1-мин данные меридиональных сканирующих фотометров канадской сети NORSTAR (GILL ($\Phi=66.03^\circ$, MLT=UT-6.4), RANK ($\Phi=72.22^\circ$, MLT=UT-6.2), FSMI ($\Phi=67.28$, MLT=UT-8.1), PINA ($\Phi=59.98$, MLT=UT-6.5)). Эти фотометры регистрировали свечение в эмиссиях 557.7, 630.0, 486.1 и 470.9 нм. Также для наблюдения за полярными сияниями были использованы данные камер всего неба сетей THEMIS, которые регистрировали свечение ночного неба в интегральном свете. Вариации магнитного поля и риометрического поглощения анализировались по данным магнитометров CARISMA, THEMIS и сети риометров NORSTAR. В работе использованы данные геостационарных спутников GOES и спутников THEMIS, межпланетных спутников ACE, WIND, GEOTAIL. Параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) были взяты из базы данных OMNI.

3. Событие 28 сентября 2009 года

3.1. Геофизическая обстановка и параметры межпланетной среды. Примерно в 06:50 UT на земной поверхности по вариациям SYM-H индекса был зарегистрирован отрицательный SI импульс, характеризующийся уменьшением магнитного поля от +9 до -20 нТл (Рис. 1). Резкое уменьшение динамического давления солнечного ветра примерно с 7 до 2 нПа, сопровождающееся резким увеличением модуля (V) межпланетного магнитного поля (ММП), было зарегистрировано примерно в 06:45 UT (Рис. 1). Скорость солнечного ветра в этот период была невысока и составляла ~ 325 км/с. Интересно, что Vz компонента ММП долгое время была отрицательна до и после SI импульса, что привело к развитию суббури в канадском секторе через полчаса после отрицательного SI. В момент SI импульса AE-индекс имел значение 250-350 нТл, указывая на то, что в этот период не наблюдалось значительной суббуревой активности.

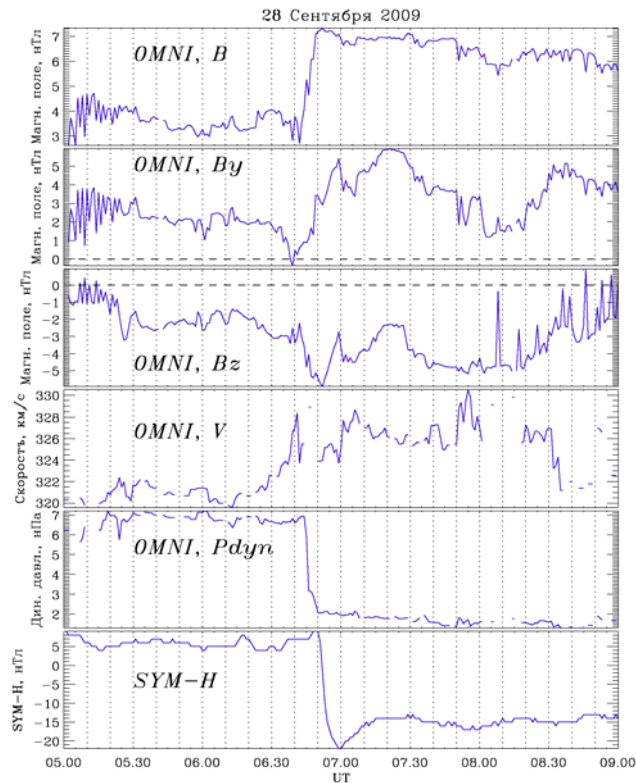


Рисунок 1. Параметры ММП (модуль V, B_y и B_z -компоненты) и солнечного ветра (скорость V, динамическое давление) по данным базы OMNI, SYM-H индекс 28.09.2009 г. в интервале 05:00-09:00 UT

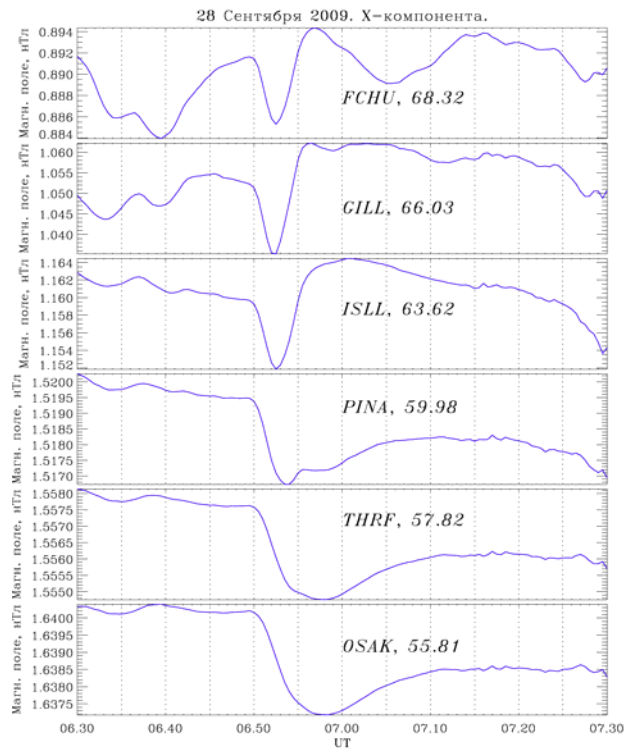


Рисунок 2. Вариации X-компоненты геомагнитного поля по данным станций THRF-OSAK-PINA-ISLL-GILL-FCHU на меридиональном профиле $\sim 330^\circ$ 28.09.2009 г. в интервале 06:30-07:30 UT

3.2. Геомагнитные вариации на земной поверхности и в магнитосфере. На рис. 2 показаны вариации X компоненты геомагнитного поля по данным меридиональной цепочки станций сети CARISMA. На низкоширотных станциях (OSAK, THRF) отрицательный SI импульс виден достаточно четко. Однако на более высокоширотных станциях вслед за резким уменьшением X компоненты следует такой же резкий рост. Во время SI станций располагалась в ночном секторе (~ 01 MLT). Резкое уменьшение геомагнитного поля наблюдалось также на станциях сети IMAGE и 210-Meridian (не показано). Таким образом, импульс SI имел глобальный характер.

На спутнике GOES-12 (MLT=UT-5), сопряженная точка которого располагалась вблизи меридиональной цепочки станций сети CARISMA, азимутальная h_p -компонента геомагнитного поля в момент SI-импульса резко уменьшается (не показано). То есть азимутальная компонента геомагнитного поля коррелирует с горизонтальной X компонентой геомагнитного поля на Земле. Это говорит о повороте оси эллипса поляризации SI-импульса на $\pi/2$ при переходе через ионосферу. При этом на GOES-12 наблюдается рост модуля геомагнитного поля B.

Спутник THEMIS-A до SI, по-видимому, располагался в переходном слое магнитосферы с координатами (9, 5, 1) Re в системе GSM, о чем свидетельствуют сильные флуктуации магнитного поля (не показано). После SI вариации магнитного поля стали менее зашумленными, что, по всей видимости, говорит о

расширении магнитосферы после SI и прохождении магнитопаузы через спутник THEMIS-A, который оказался уже в магнитосфере.

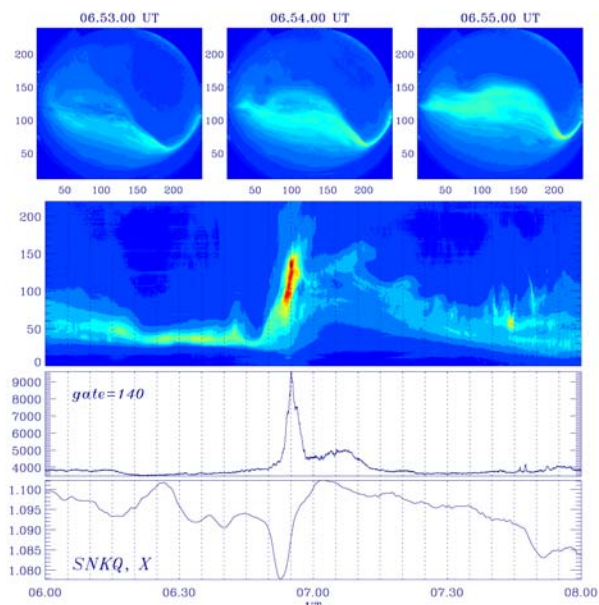


Рисунок 3. Кадры камеры всего неба на станции SNKQ, кеограмма по данным на станции SNKQ [отн. ед.], широтный разрез интенсивности полярных сияний [отн. ед.], X-компонента геомагнитного поля [$\text{нТл}\cdot 10^4$] на станции SNKQ 28.09.2009 г. в интервале 06:00-08:00 UT

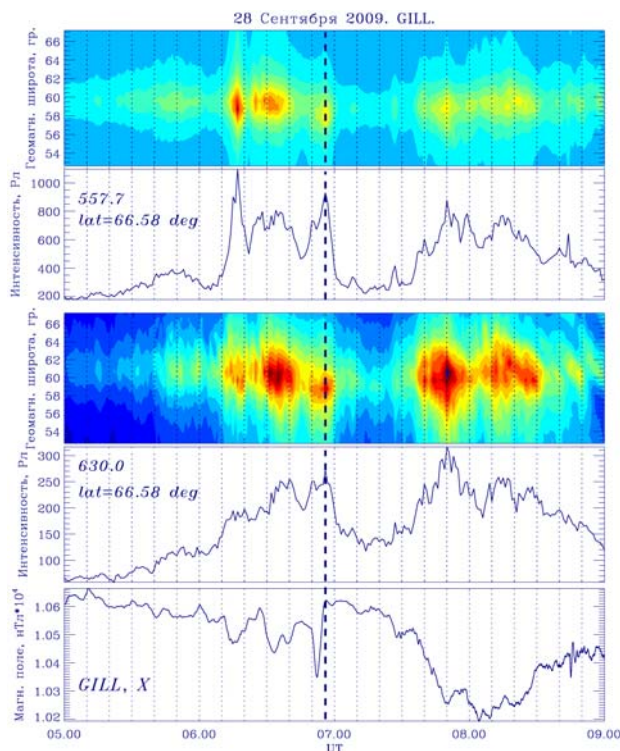


Рисунок 4. Кеогаммы интенсивности полярных сияний по данным меридионального сканирующего фотометра на станции GILL [Рл] в эмиссиях 557.7, 630.0 нм, широтные разрезы интенсивности сияний [Нк], X-компонента геомагнитного поля [$\text{нТл}\cdot 10^4$] по данным станции GILL 28.09.2009 г. в интервале 05:00-09:00 UT

3.3. Отклик полярных сияний и риометрического поглощения. Отклик в полярных сияниях на SI импульс был виден далеко не на всех станциях сетей THEMIS, NORSTAR, что свидетельствует о его локальном характере. Сразу же после SI по данным камеры всего неба на станции SNKQ ($\Phi'=66.45^\circ$; $\text{MLT}=\text{UT}-4.8$) наблюдается возбуждение дуги полярного сияния (Рис. 3), при этом интенсивность аврорального свечения увеличилась более чем в 2.5 раза. Наблюдалось быстрое перемещение дуги сияний к полюсу. По данным камеры всего неба дуга была вытянута в направлении восток-запад (Рис. 3). Небольшое увеличение интенсивности и некоторое продвижение к полюсу наблюдалось на станции KUJ ($\Phi'=66.89^\circ$, $\Lambda'=13.23^\circ$, $\text{MLT}=\text{UT}-3.7$).

По данным фотометра на станции GILL примерно через 8 минут после SI началось резкое уменьшение интенсивности аврорального свечения в эмиссиях (OI) 557.7, 630.0 нм (Рис. 4), а также в эмиссии водорода 486.0 нм (не показано). На станции GBAУ ($\Phi'=60.73^\circ$, $\Lambda'=23.08^\circ$, $\text{MLT}=\text{UT}-3$), расположенной восточнее и в более низких широтах, также наблюдалось резкое уменьшение интенсивности диффузного свечения (не показано), распространяющегося к полюсу.

Интересно, что по данным скандинавских риометров и риометров сети NORSTAR не было зарегистрировано никакого изменения в риометрическом поглощении в период отрицательного SI. Это свидетельствует об отсутствии отклика на SI в потоках высыпающихся в ионосферу энергичных электронов с $E > 30$ кэВ. К сожалению, в нашем распоряжении не было данных спутников LANL, измеряющих потоки энергичных электронов на геостационарной орбите. Но поскольку риометрическое поглощение хорошо коррелирует с потоками энергичных электронов на LANL, то можно предположить, что не было отклика и в потоках захваченных электронов в магнитосфере на этот SI импульс. Отсутствие отклика в риометрическом поглощении на отрицательный SI импульс в различных секторах MLT, по-видимому, связано с низким общим уровнем поглощения, который, в свою очередь, был обусловлен низким уровнем геомагнитной активности в течение нескольких часов до появления SI.

4. Обсуждение. Рассмотренный в работе отрицательный SI импульс 28 сентября 2009 г., связанный с резким уменьшением динамического давления солнечного ветра, имел глобальный характер и наблюдался в различных секторах магнитосферы. При этом по данным спутника THEMIS-A во время SI импульса произошло резкое увеличение размеров магнитосферы, и было зафиксировано прохождение магнитопаузы через этот спутник.

Проведенные исследования показывают, что в рассмотренном событии отклик ночных полярных сияний на отрицательный SI импульс имел двухступенчатый характер. Сразу же после отрицательного SI импульса было зарегистрировано быстрое распространение к полюсу дискретных форм сияний и увеличение их интенсивности. Такое поведение сияний имело локальный характер и было зарегистрировано только на нескольких станциях. Затем с задержкой в 6-8 мин относительно момента SI началось быстрое уменьшение интенсивности аврорального свечения в эмиссиях, связанных как с электронными, так и с протонными вторжениями. Эти выводы в определенной мере согласуют противоречивые выводы, полученные в двух ранее опубликованных работах [Sato et al., 2001] и [Liou, 2006] и свидетельствуют о том, что во время отрицательного SI в магнитосфере Земли могут запускаться различные геофизические процессы, что и приводит к сложному отклику полярных сияний отрицательный импульс.

Одним из возможных источников для возбуждения дискретных форм полярных сияний может быть резонанс силовых линий внутри магнитосферы [Lyatsky, 1999]. В пользу такого механизма говорит распространение дуги полярных сияний к высоким широтам. Отрицательный SI импульс мог быть триггером для возбуждения резонанса силовых линий. К тому же, к моменту SI магнитосфера была уже достаточно “загружена” энергией солнечного ветра вследствие длительной отрицательной Vz компоненты ММП.

Более позднее уменьшение интенсивности аврорального свечения, по-видимому, связано с резким расширением хвоста магнитосферы и соответствующим изменением условий высыпания заряженных частиц в ионосферу. Расширение магнитосферы привело к увеличению вертикальной компоненты геомагнитного поля на геостационарной орбите и, как следствие, к изменению питч-углового распределения заряженных частиц. В работе [Liou, 2006] отмечается, что уменьшением интенсивности сияний происходило примерно через 10 минут после SI импульса, что согласуется с нашими наблюдениями.

Другим возможным сценарием развития авроральных явлений может быть магнитосферная суббуря, триггерированная отрицательным SI импульсом, фаза развития которой была прервана чрез ~8 мин вследствие резкого уменьшения магнитного давления в долях хвоста магнитосферы. Фронт декомпрессии, перемещающийся вдоль магнитопаузы со скоростью ~325 км/с через 8 мин достигнет расстояния $X \approx -15 \text{ Re}$. Это является как раз той областью хвоста магнитосферы, где протекают процессы, связанные с генерацией суббури и высыпаниями авроральных частиц.

5. Вывод. Показано, что в рассмотренном событии отклик ночных полярных сияний на резкое уменьшение динамического давления солнечного ветра имел двухступенчатый характер. Сразу же после отрицательного SI импульса было зарегистрировано быстрое распространение к полюсу дискретных форм сияний и увеличение их интенсивности. Затем с задержкой в ~8 мин относительно момента SI началось быстрое уменьшение интенсивности аврорального свечения в эмиссиях, связанных как с электронными, так и с протонными вторжениями.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-4210.2015.5 (БВ) и Программы Президиума РАН № 9. Выражаем благодарность за предоставленные данные проектов NORSTAR, CARISMA, спутника GOES сотрудникам соответствующих центров.

Список литературы

- Воробьев В.Г. Эффекты в полярных сияниях, связанные с SC // *Геомагнетизм и аэрономия*, Т.14. №1. С. 90-92, 1974.
- Belakhovsky V.B., Safargaleev V.V., Yagodkina O.I. // Response of the morning auroras and cosmic noise absorption to the negative solar wind pressure pulse: a case study // *Optica Pura Apl.* 44 (4). P. 611-615. 2011.
- Liou K., P. T. Newell, T. Sotirelis, C.-I. Meng. Global auroral response to negative pressure impulses // *Geophys. Res. Lett.* 33. L11103. 2006.
- Liou K. Large, abrupt pressure decreases as a substorm onset trigger // *Geophys. Res. Lett.* 34. L14107. 2007.
- Lyatsky W., R.D. Elphinstone, Q. Pao, L.L. Cogger. Field line resonance interference model for multiple auroral arc generation // *J. Geophys. Res.* Vol.104. A1, P. 263-268. 1999.
- Sato N., Y. Murata, H. Yamagishi, A. S. Yukimatu, M. Kikuchi, M. Watanabe, K. Makita, H. Yang, R. Liu, F. J. Rich. Enhancement of optical aurora triggered by the solar wind negative pressure impulse (SI) // *Geophys. Res. Lett.* 28. 127. 2001.
- Takeuchi T., Araki T., Viljanen A., Watermann J. Geomagnetic negative sudden impulses: Interplanetary causes and polarization distribution // *J. Geophys. Res.* V. 107. A7. P. 900152. 2002.
- Zhou X.-Y., Strangeway R.J., Anderson P.C., Sibeck D.G., Tsurutani B.T., Haerendel G., Frey H.U., Arballo J.K. Shock aurora: FAST and DMSP observation // *J. Geophys. Res.* V. 108. A4. P. 009701. 2003.