

## Отклик эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм на резкие вариации параметров солнечного ветра

Л.А. Леонович, А.В. Тащилин, В.А. Леонович\*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291*

Поступила в редакцию 22.12.2014 г.

Представлены результаты исследования реакции эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм на резкие изменения параметров солнечного ветра, вызванные ударными волнами. Для анализа использовались оптические и геомагнитные данные, полученные для региона Восточной Сибири, и данные параметров межпланетного магнитного поля и солнечного ветра. Найдено, что во время резких изменений скорости и плотности плазмы солнечного ветра для одних случаев наблюдалось увеличение интенсивности рассматриваемых эмиссий, тогда как в других случаях реакции не было. Показано, что наличие или отсутствие отклика в интенсивности этих эмиссий не связано с амплитудой возмущения параметров солнечного ветра. Предположено, что эти увеличения интенсивностей могли быть вызваны высыпанием электронов из магнитной ловушки во время взаимодействий распространяющихся в солнечном ветре ударных волн с магнитосферой.

*Ключевые слова:* ионосферное возмущение, свечение верхней атмосферы, геомагнитные бури; ionospheric disturbance, airglow, geomagnetic storm.

### Введение

Нестационарные процессы в солнечном ветре, такие как резкие вариации динамического давления плазмы солнечного ветра, возникновение тангенциальных разрывов и ударных волн, вызывают множество геофизических явлений в околоземном космическом пространстве. В геомагнитном поле генерируются внезапные импульсы (Sudden Impulse – SI). Если вслед за SI наблюдается магнитная буря, то этот импульс называется внезапное начало (Sudden Commencement – SC). В магнитосфере возбуждаются и распространяются быстрые магнитозвуковые волны. Они генерируют электромагнитные волны альфвеновского диапазона частот, которые приводят к ускорению частиц магнитосферной плазмы [1]. В авроральной зоне происходит высыпание заряженных частиц [2].

Реакция экваториальной и низкоширотной ночной ионосферы (от 10,2 до 34,25° с.ш.) на внезапный геомагнитный импульс SC изучалась в работе [3] на основе данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы. В указанной работе описаны совпавшие с импульсом SC доплеровские сдвиги частоты отраженного от ионосферы сигнала, которые свидетельствовали о наличии вертикального движения плазмы в этот момент. Авторы объяснили это движение влиянием проникшего в ионосферу магнитосферного электрического поля, обусловленного внезапным геомагнитным импульсом SC.

В работе [4] показано, что во время SI/SC импульсов магнитосферное электрическое поле может проникать в ионосферу низких широт. В работах [5–7] проведено статистическое исследование глобального отклика дневной и ночной ионосферы на импульсы SC на основе пространственного усреднения вариаций полного электронного содержания (ПЭС), полученных по сети данных GPS, и выявлено, что в среднем время задержки отклика вариаций ПЭС на импульс SC находится в диапазоне 3–10 мин.

В [8, 9] отмечены три события: 6 апреля 2000 г., 21 октября 2001 г. и 24 октября 2003 г., когда увеличение интенсивности эмиссии 630 нм последовало сразу за импульсом SC. Эти события появились в то время, когда индекс  $D_{st}$  еще не был достаточно развитым. В [9] предположено, что механизм появления этих возмущений может быть подобен механизму образования устойчивых авроральных красных дуг (stable auroral red arcs, или SAR-дуг) во время фазы восстановления магнитных бурь.

В настоящей статье представлены полученные для средних широт результаты исследования отклика эмиссий красной (630 нм) и зеленой (557,7 нм) линий атомарного кислорода на вызванные солнечными возмущениями ударные волны, распространяющиеся через плазму солнечного ветра со скоростями, превышающими скорость спокойного солнечного ветра.

### Данные измерений

Для анализа использовались данные геомагнитного поля, полученные в магнитной обсерватории «Иркутск»; данные межпланетного магнитного поля

\* Людмила Анатольевна Леонович (lal@iszf.irk.ru); Анатолий Васильевич Тащилин (avt@iszf.irk.ru); Виталий Анатольевич Леонович (leonkgb@mail.ru).

и параметров солнечного ветра, взятые с сайта <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>; данные эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм, полученные в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д.) на базе комплекса фотометров и спектрометров [8, 10].

Оптические данные являются интегральными величинами рассматриваемых эмиссий. Красная линия излучается в диапазоне высот 180–300 км ночной среднеширотной *F*-области ионосферы с максимумом интенсивности на высотах 250–270 км, зависящим от высоты пика электронной концентрации [11]. Основным механизмом ее возбуждения в спокойных условиях является диссоциативная рекомбинация  $O_2^+$  и электронов.

Излучение зеленой линии сосредоточено преимущественно в двух областях. Ночью на средних широтах она возбуждается в основном в области высот с наибольшей концентрацией атомарного кислорода 85–115 км (слой *E*) с максимумом интенсивности на ( $\sim 97 \pm 2$ ) км [12]. На сегодняшний день существуют два механизма возбуждения зеленой линии в нижней термосфере. Это механизм Чепмена [13] и механизм Барта [14]. Второй диапазон высот излучения зеленой линии расположен в *F*-области

ионосферы, и механизмом ее возбуждения в спокойных условиях является диссоциативная рекомбинация, как и для красной линии [15]. Однако вклад этой области в интегральную величину интенсивности эмиссии 557,7 нм не превышает 10% [16] при спокойных геомагнитных условиях.

## Анализ данных

Мы проанализировали поведение интенсивности эмиссий зеленой и красной линий атомарного кислорода во время 20 внезапных импульсов SC. Данные наблюдений параметров межпланетной среды и околоземного космического пространства представлены в табл. 1 и 2.

В табл. 1 приведены события SC, для которых был отмечен отклик в интенсивности рассматриваемых эмиссий. В табл. 2 перечислены события SC, для которых отклик в этих эмиссиях не наблюдался. В колонках таблиц указаны дата и время SC, максимальное значение  $K_p$ -индекса ( $K_{pmax}$ ) и минимальное значение  $D_{st}$ -индекса ( $D_{stmin}$ ) для рассматриваемой магнитной бури, величина кратковременного положительного скачка  $D_{st}$  на фазе SC ( $\Delta D_{st}$ ), приращения в интенсивности эмиссий 630 и 557,7 нм,

Таблица 1  
События SC, для которых наблюдался отклик в интенсивностях эмиссий 557,7 и/или 630 нм

Дата	SC, UT	$K_{pmax}$	$D_{stmin}$ , нТл	$\Delta D_{st}$ , нТл	$\Delta I_{630}$ , Рл	$\Delta I_{557,7}$ , Рл	$\frac{\Delta I_{630}}{\Delta I_{557,7}}$	$\Delta V_p$ , км/с	$V_{pmax}$ , км/с	$\Delta N_p$
27.01.2000	14:53	5	-41	25	15	55	0,3	35	621	30
06.04.2000	16:39	9	-221	50	45	40	1,1	196	589	7
11.10.2001	17:01	6	-70	35	30	—	—	200	570	23
21.10.2001	16:50	8	-187	45	30	100	0,3	190	635	22
05.02.2002	17:00	5	-80	9	25	130	0,2	75	540	7
18.03.2002	13:21	5	-37	53	30	50	0,6	150	490	40
17.01.2005	14:00	8	-120	47	30	38	0,8	0	800	20
21.01.2005	17:12	8	-97	50	—	110	—	260	940	12
21.01.2005	18:48	8	-97	60	120	125	1	—	940	32
07.05.2005	19:16	6	-100	15	—	50	—	25	430	15
12.04.2010	16:00	6	-56	15	16	—	—	45	430	20
26.09.2011	12:35	6	-103	40	50	40	1,3	130	730	30

Таблица 2  
События SC, для которых отклик в интенсивностях эмиссий 557,7 и 630 нм не был обнаружен

Дата	SC, UT	$K_{pmax}$	$D_{stmin}$ , нТл	$\Delta D_{st}$ , нТл	$\Delta V_p$ , км/с	$V_{pmax}$ , км/с	$\Delta N_p$
11.01.2000	14:26	5	-81	11	90	540	7
22.12.2000	19:25	6	-62	10	10	330	13
21.04.2001	16:01	6	-100	16	50	400	13
16.12.2004	13:40	4	-10	8	0	480	10
02.09.2005	14:20	7	-124	13	75	766	6
24.01.2012	15:03	5	-75	25	270	740	13
18.02.2012	16:42	5	-88	5	25	360	5
24.10.2011	18:31	7	-150	40	100	535	10

которые последовали за SC ( $\Delta I_{630}$  и  $\Delta I_{557,7}$  соответственно), соотношение приращений красной и зеленой линий ( $\Delta I_{630}/\Delta I_{557,7}$ ), приращение скорости протонов ( $\Delta V_p$ ), максимальная скорость солнечного ветра во время магнитной бури ( $V_{pmax}$ ), приращение плотности протонов ( $\Delta N_p$ ).

На рис. 1 показан типичный пример поведения интенсивности интегральных эмиссий 630 (черная линия) и 557,7 нм (серая линия) в спокойных геомагнитных условиях. Видно, что в спокойных ночных условиях эти эмиссии изменяются независимо, согласно механизмам их возбуждения в слоях *F* и *E* соответственно.

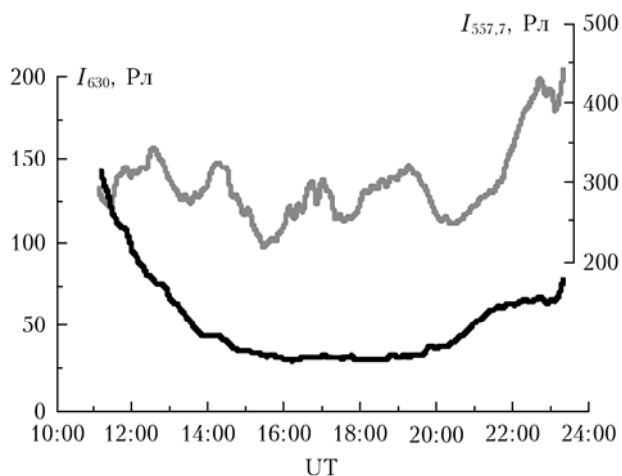


Рис. 1. Пример поведения интенсивности эмиссий 630 (черная линия) и 557,7 нм (серая линия) в спокойных геомагнитных условиях (2.12.2000 г.)

На рис. 2 приведены временные зависимости  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля, скорости  $V_p$  и плотности  $N_p$  протонов солнечного ветра, индекса  $D_{st}$ ,  $H$ -компоненты геомагнитного поля над Иркутском и интенсивности эмиссий атомарного кислорода 630 и 557,7 нм во время импульсов SC 6 апреля 2000 г. (пример из табл. 1) и 24 января 2012 г. (пример из табл. 2). Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты внезапного начала магнитной бури. Как видно из рис. 2, в момент SC параметры окружающей среды для этих двух событий имеют значения, близкие по величине, но увеличение в интенсивности эмиссий зеленой и красной линий ( $\sim 40$  Рл) наблюдалось только 6 апреля 2000 г.

События из табл. 1 в основном произошли либо на фазе восстановления предыдущей магнитной бури, либо им предшествовали суббури. Только два из них (18.03.2002 г. и 26.09.2011 г.) случились на фоне спокойных геомагнитных условий. Для половины событий из табл. 2 наблюдались возмущенные фоновые геомагнитные условия. Сравнительный анализ параметров межпланетной среды и околоземного космического пространства для событий, приведенных

в табл. 1, когда отклик на SC наблюдался, и табл. 2, когда отклика не было, показал, что нет принципиальной разницы между их величинами в момент SC. Из этого следует, что наличие или отсутствие отклика в интенсивности рассматриваемых эмиссий на SC не связано с амплитудой возмущения параметров солнечного ветра.

Для событий, имеющих отклик на SC-импульс, также не наблюдается взаимозависимости между амплитудой отклика интенсивности рассматриваемых эмиссий и амплитудами возмущения скорости и плотности солнечного ветра.

Наблюдаемое увеличение интенсивности свечения во время SC может быть аналогично авроральным сияниям, связанным с импульсами давления солнечного ветра [17, 18]. В работе [18] показано, что сияния, связанные с импульсами давления солнечного ветра, характеризуются интенсивными потоками низкоэнергичных электронов, которые превосходят по величине потоки, возникающие во время авроральных суббурь. Эти частицы могут вызывать излучение как 630, так и 557,7 и 427,8 нм.

С другой стороны, это увеличение может быть вызвано высыпанием электронов из магнитной ловушки, где они присутствовали еще до начала импульса SC. Это предположение согласуется с [19], где на основе измерений были выявлены области с высокой плотностью сверхтепловых электронов с энергиями в диапазоне 1–30 кэВ. Эти области в основном наблюдались на достаточно низких  $L$  оболочках (вплоть до  $L = 2$ ) и были относительно стабильными [19].

Во время усиления геомагнитной активности, как показано в [20–22], увеличение крупномасштабного электрического поля утро–вечер может переносить электроны плазменного слоя ближе к Земле, вплоть до областей коротации.

На основе анализа экспериментальных данных в работе [19] показано, что электроны, которые были инжектированы ближе к Земле во время геомагнитоактивного периода, остаются захваченными в ловушке внутри плазмосферы в последующий спокойный период. Авторы [19] предположили, что эти захваченные популяции электронов могут переноситься далее в глубь плазмосферы до  $L \sim 2$  через радиальную диффузию благодаря всегда присутствующим флуктуациям магнитосферного электрического поля, которое проникает в плазмосферу, как показано в [23]. Также перенос частиц на более глубокую дрейфовую оболочку может происходить не только под действием крупномасштабного электрического поля, но и при единичном импульсном воздействии электрического поля  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ , например при импульсах SI/SC, а также аналогичный эффект возможен при многократном воздействии коротких импульсов [24].

Альфвеновские волны, возникающие во время взаимодействия магнитосферы с ударной волной солнечного ветра, приводят к питч-угловому рассеянию захваченных на низких оболочках частиц [1, 25].

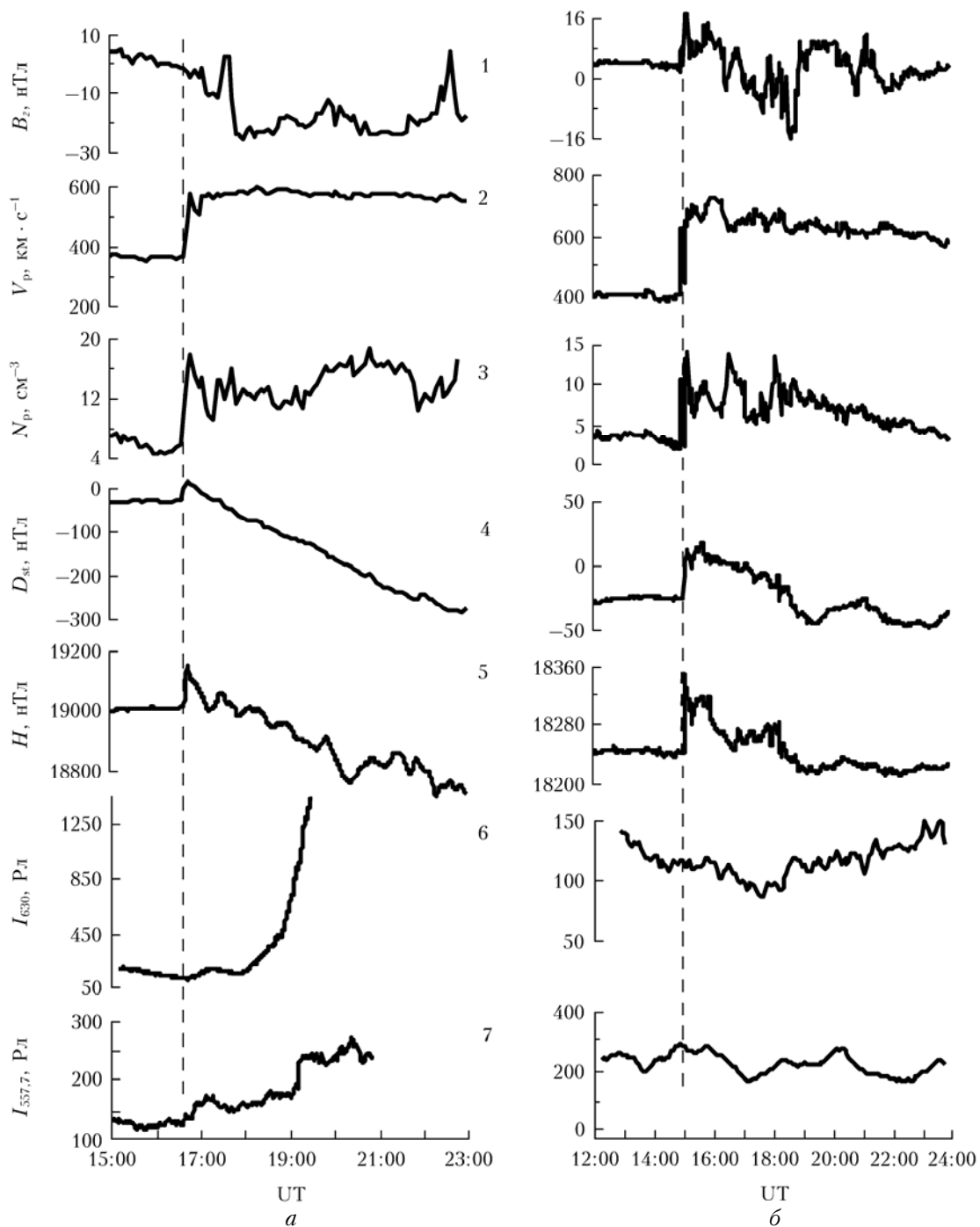


Рис. 2. Примеры вариаций геофизических и геофизических параметров во время импульсов SC 6.04.2000 г. (а) и 24.01.2012 г. (б). На панелях показаны вариации  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля (1); скорости протонов солнечного ветра  $V_p$  (2); плотности протонов солнечного ветра  $N_p$  (3); индекса  $D_{st}$  (4);  $H$ -компоненты геомагнитного поля (5); эмиссий атомарного кислорода 630 (6) и 557,7 нм (7)

### Заключение

Результаты исследования отклика эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм на резкие вариации параметров плазмы солнечного ветра, вызванные распространяющимися по ней ударными волнами, показали, что для одних случаев увеличение этих интенсивностей наблюдалось, тогда как для других

случаев этого не происходило, независимо от амплитуды возмущений параметров солнечного ветра.

Мы предполагаем, что увеличение интенсивности эмиссий зеленой и красной линий атомного кислорода во время внезапных импульсов SC могло быть вызвано потоками низкоэнергичных электронов, захваченных на низких оболочках ранее, еще до прихода импульсов. Эти потоки высыпавшихся электронов

могут быть обусловлены их питч-угловым рассеянием при взаимодействии с магнитозвуковыми волнами, возбуждаемыми в магнитосфере в моменты ее сжатия динамическими импульсами давления солнечного ветра [1, 25].

Мы искренне благодарим А.В. Михалёва за предоставленные оптические данные Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН и ценные замечания, а также И.В. Медведева за полезное обсуждение работы, Ю.В. Липко и С.А. Нечаева за данные магнитной обсерватории «Иркутск».

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 13-05-00733 и НШ-2942.2014.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

1. Leonovich A.S., Mazur V.A. Resonance excitation of standing Alfvén waves in an axisymmetric magnetosphere (monochromatic oscillations) // *Planet. Space Sci.* 1989. V. 37, N 9. P. 1095–1108.
2. Meurant M., Gérard J.-C., Hubert B., Coumans V., Blockx C., Ostgaard N., Mende S.B. Dynamics of global scale electron and proton precipitation induced by a solar wind pressure pulse // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, N 20. P. 2032. DOI: 10.1029/2003GL018017.
3. Sastri J.H., Huang Y.N., Shibata T., Okuzawa T. Response of equatorial-low latitude ionosphere to sudden expansion of magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22, N 19. P. 2649–2652.
4. Ikeda A., Yumoto K., Shinohara M., Nozaki K., Yoshikawa A., Shinbori A. SC-associated Ionospheric Electric Fields at Low Latitude: FM-CW Radar Observation // *Earth Planet. Sci.* 2008. V. XXXII, N 1. P. 1–6.
5. Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Leonovich L.A. The use of the international GPS network as the global detector GLOBDET simultaneously observing sudden ionospheric disturbances // *Earth, Planets Space.* 2000. V. 52, N 11. P. 1077–1082.
6. Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Leonovich L.A., Lesyuta O.S., Ushakov I.I. Novel technology for detecting atmospheric disturbances using GPS. Instantaneous response of the ionosphere to a sudden commencement of the strong magnetic storms // *Adv. Space Res.* 2001. V. 27, N 6–7. P. 1345–1350.
7. Afraimovich E.L., Lesyuta O.S. Instantaneous global ionospheric response to a sudden commencement of the strong magnetic storms // *Proc. Int. Beacon Satellite Sympos.* June 4–6. 2001. Boston College Institute for Scientific Research, Chestnut Hill. MA. USA. 2001. P. 413–417.
8. Михалев А.В., Леонович Л.А., Костылева Н.В., Леонович В.А., Мишин В.В. Отклик среднеширотного излучения верхней атмосферы на начальную фазу магнитных бурь // *Солнечно-земная физика.* 2012. Вып. 20. С. 116–120.
9. Shiokawa K., Ogawa T., Kamide Y. Low-latitude auroras observed in Japan: 1999–2004 // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A05202. DOI: 10.1029/2004JA010706.

*L.A. Leonovich, A.V. Tashchilin, V.A. Leonovich. The 557.7 and 630-nm atomic oxygen emission responses to sharp solar wind variations.*

The paper presents the study of the 557.7 and 630-nm atomic oxygen emission responses to sharp variations in solar wind parameters, caused by shocks. The optical and geomagnetic data of the Eastern Siberia and interplanetary magnetic field and solar wind data were used for the analysis. It has been found that the considered emission intensity was increased for some cases, whereas in other cases there were no responses during sudden sharp variations in solar wind plasma speed and density. It has been shown that the presence or absence of the responses in the emissions was not related to the disturbance amplitude of the solar wind parameters. It has been suggested that the emission intensity increase could be caused by the electrons precipitation from the magnetic trap during interaction between the solar wind shock and magnetosphere.

10. Михалев А.В. Яркость ночного неба и собственное излучение верхней атмосферы в регионе Восточной Сибири после падения Челябинского метеорита // *Солнечно-земная физика.* 2014. Вып. 24. С. 54–57.
11. Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 270 с.
12. Bates D.R. Forbidden oxygen and oxygen lines in the nightglow // *Planet. Space Sci.* 1978. V. 26, N 10. P. 897–912.
13. Chapman S. The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth. Part II. Grazing incidence // *Proc. Phys. Soc.* 1931. V. 43, N 26. P. 483–501.
14. Barth C.A., Hildebrandt A.F. The 5577 Å airglow emission mechanism // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66, N 3. P. 985–986.
15. Bates D.R. Airglow and auroras // *Appl. Atomic Collision Phys.* N.Y.: Academic Press, 1982. V. 1. P. 149–224.
16. Gullede I.S., Packer D.M., Tilford S.G., Vanderslice J.T. Intensity profiles of the 6300-Å and 5577-Å OI lines in the night airglow // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73, N 17. P. 5535–5547. DOI: 10.1029/JA073i017.
17. Spann J.F., Brittnacher M., Elsen R., Germany G.A., Parks G.K. Initial response and complex polar cap structures of the aurora in response to the January 10, 1997 magnetic cloud // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25, N 14. P. 2577–2580.
18. Chua D., Parks G., Brittnacher M., Peria W., Germany G., Spann J., Carlson C. Energy characteristics of auroral electron precipitation: A comparison of substorms and pressure pulse related auroral activity // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N 4. P. 5945–5956.
19. Li W., Thorne R.M., Bortnik J., Nishimura Y., Angelopoulos V., Chen L., McFadden J.P., Bonnel J.W. Global distributions of suprathermal electrons observed on THEMIS and potential mechanisms for access into the plasmasphere // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, N 12. A00J10. DOI: 10.1029/2010JA015687.
20. Maynard N.C., Chen A.J. Isolated cold plasma regions: Observations and their relation to possible production mechanisms // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80, N 3. P. 1009–1013.
21. Korth H., Thomsen M.F., Borovsky J.E., McComas D.J. Plasma sheet access to geosynchronous orbit // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, N 11. P. 25047–25061. DOI: 10.1029/1999JA900292.
22. Friedel R.H.W., Korth H., Henderson M.G., Thomsen M.F., Scudder J.D. Plasma sheet access to the inner magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N 4. P. 5845–5858. DOI: 10.1029/2000JA003011.
23. Rowland D.E., Wygant J.R. Dependence of the large-scale inner magnetospheric electric field on geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, N 7. P. 14959–14964. DOI: 10.1029/97JA0352.
24. Лазутин Л.Л. Мировые и полярные магнитные бури / Под ред. Ю.И. Логачева. М.: Изд-во МГУ, 2012. 214 с. URL: <http://www.kosmofizika.ru/kniga.htm>.
25. Goertz C.K. Kinetic Alfvén waves on auroral field lines // *Planet. Space Sci.* 1984. V. 32, N 11. P. 1387–1392.