

УДК 523.165

# ВОЗРАСТАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ И ДИНАМИКА ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ В ДЕКАБРЕ 2006 г.

© 2008 г. Л. В. Тверская<sup>1</sup>, С. В. Балашов<sup>2</sup>, Н. Н. Веденькин<sup>1</sup>, В. В. Иванов<sup>2</sup>, Т. А. Иванова<sup>1</sup>, Д. С. Карпенко<sup>2</sup>, С. Г. Кочура<sup>2</sup>, И. А. Максимов<sup>2</sup>, Н. Н. Павлов<sup>1</sup>, И. А. Рубинштейн<sup>1</sup>, М. В. Тельцов<sup>1</sup>, Д. А. Трофимчук<sup>2</sup>, В. И. Тулупов<sup>1</sup>, В. В. Хартов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына

Московского государственного университета, г. Москва

<sup>2</sup>ОАО “Информационные спутниковые системы” им. академика М.Ф. Решетнёва,

г. Железногорск, Красноярский край

e-mail: [tverskaya@taspd.sinp.msu.ru](mailto:tverskaya@taspd.sinp.msu.ru); [ivanova@taspd.sinp.msu.ru](mailto:ivanova@taspd.sinp.msu.ru)

Поступила в редакцию 08.05.2008 г.

После доработки 14.07.2008 г.

Исследуются возрастания солнечных протонов и вариации потоков электронов и протонов внешнего радиационного пояса по данным измерений на ИСЗ ГЛОНАСС (круговая орбита на высоте ~20000 км с наклонением ~ 65°) в декабре 2006 г. Анализируются показания каналов, регистрировавших протоны в диапазоне энергий  $E_p = 3\text{--}70$  МэВ и электроны с энергиями  $E_e > 0.04$  и  $> 0.8$  МэВ. Приведены также данные по электронам с  $E_e = 0.8\text{--}1.2$  МэВ, измеренным на геостационарном ИСЗ Экспресс-А3. Перед сильной магнитной бурей 14 декабря ( $|Dst|_{\max} = 146$  нТл) максимум внешнего пояса электронов с энергией  $> 0.7$  МэВ наблюдался на  $L \sim 4.5$ . После бури потоки этих электронов возросли более чем на порядок величины по сравнению с предбуревым уровнем, а максимум “нового” пояса сместился на  $L < 4$  (минимальное  $L$ , достигаемое орбитой ГЛОНАСС). В спокойных геомагнитных условиях солнечные протоны с энергиями  $> 3$  МэВ заполняют только высокоширотные области орбиты ГЛОНАСС. Во время сильной магнитной бури 15 декабря граница проникновения их в магнитосферу практически слилась с орбитальным максимумом протонного радиационного пояса.

PACS: 93.30.Xy, 94.30.Lg

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечным экстремальным событиям на фазе спада 23-го цикла солнечной активности посвящено много работ (см., например, [Панасюк и др.,

2004; Белов и др., 2004; Тверская и др., 2007]). В 2003–2005 гг. наблюдалось большое количество вспышек на Солнце, во время которых были генерированы мощные потоки солнечных космиче-

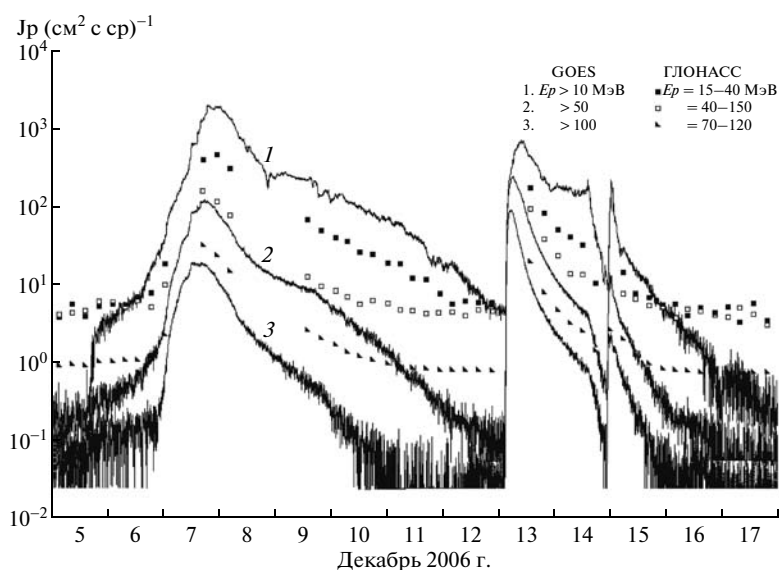


Рис. 1. Временной ход потоков солнечных протонов в декабре 2006 г. по данным ИСЗ ГЛОНАСС и GOES.

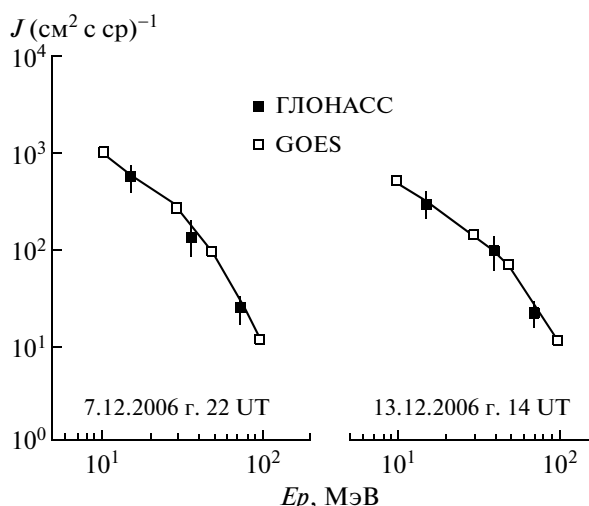


Рис. 2. Спектры солнечных протонов 07.12.2006 г. (22 UT) и 13.12.2006 г. (14 UT) по данным ИСЗ ГЛОНАСС и GOES.

ских лучей. В геомагнитном поле зарегистрировано несколько супербурь, в том числе вторая по величине амплитуды  $Dst$ -вариации бури (20 ноября 2003 г.) за весь период космических исследований.

Весьма неординарным событием следует считать несколько сильных вспышек на Солнце в декабре 2006 г. По некоторым прогнозам этот месяц относился уже к минимуму солнечной активности. Однако в период с 5 по 16 декабря наблюдалось несколько крупных возрастаний потоков солнечных протонов, а 14 декабря развилась сильная магнитная буря ( $Dst = -146$  нТл).

Такие непредсказуемые и редкие вблизи минимума солнечной активности события (например, минимум предыдущего, 22-го цикла, был “спокойным”) требуют особенно пристального изучения, так как во время сильной бури в глубокие области магнитосферы могут инжектироваться опасные для бортовой аппаратуры потоки релятивистских электронов, именуемых в мировой литературе “космическими киллерами”.

В настоящей работе представлены результаты измерений протонов и электронов радиационных поясов, солнечных протонов и дозы радиации на ИСЗ ГЛОНАСС в декабре 2006 г.—январе 2007 г. Используются также данные измерений электронов на геостационарном ИСЗ Экспресс-А3.

Предварительные данные измерений радиации на ИСЗ ГЛОНАСС во время солнечных экстремальных событий в декабре 2006 г. представлены в докладе на Международном симпозиуме SEE-2007 [Vedenkin et al., 2007].

## 2. ОРБИТА И АППАРАТУРА

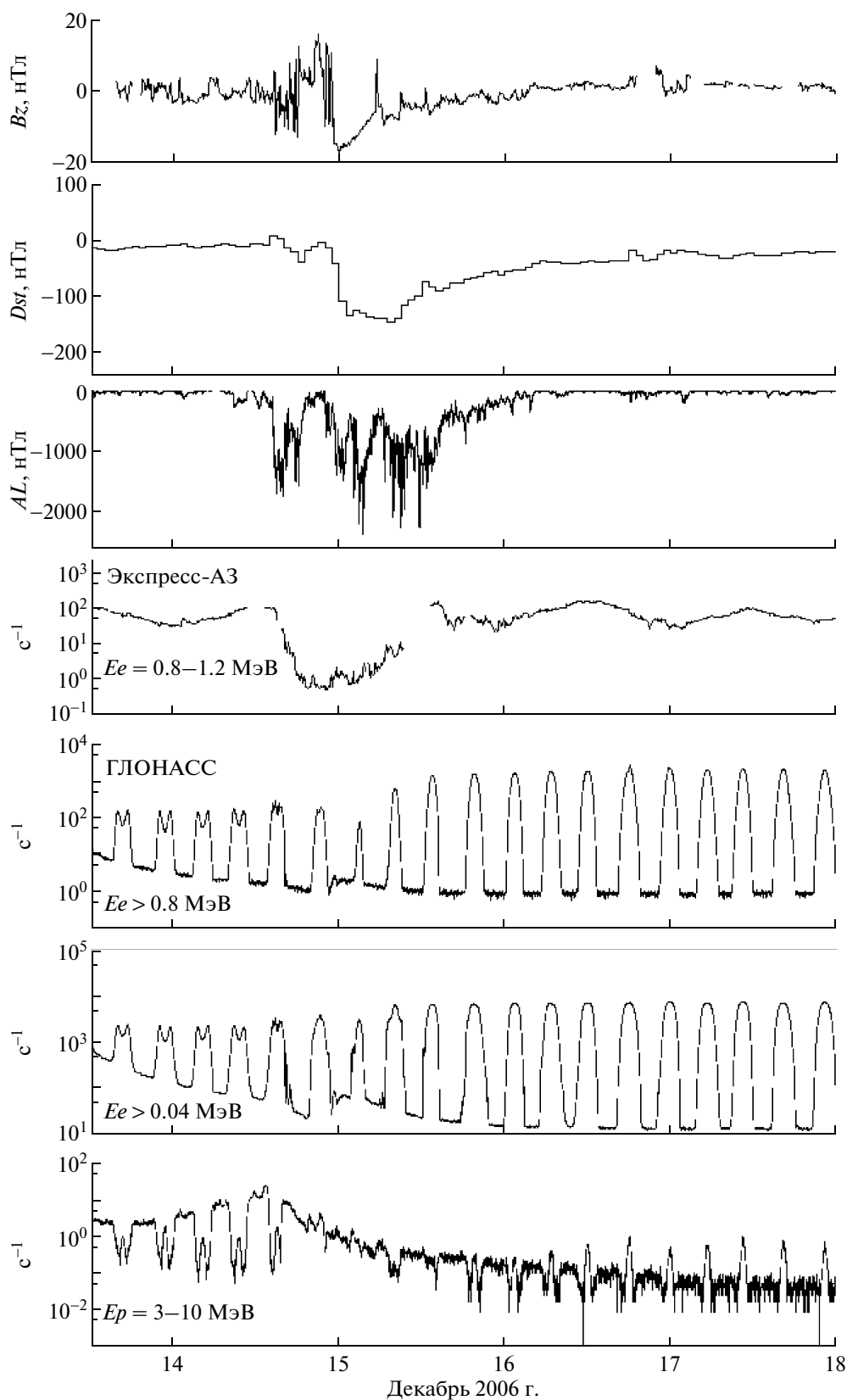
Спутники системы ГЛОНАСС имеют круговую орбиту на высоте ~20 тыс. км с наклонением ~65°. На ряде спутников этой серии установлена аппаратура контроля внешней среды, разработанная в НИИЯФ МГУ. В настоящей работе анализируются данные измерений протонов в диапазоне энергией  $E_p = 3\text{--}70$  МэВ и электронов с энергией  $E_e > 0.04$  и  $> 0.8$  МэВ. В состав аппаратуры также входит ионизационная камера интегрально-импульсного типа ИК-5 [Юртин и др., 1979 г.]. В телесном угле менее 1/4 пространства (за исключением мест, дополнительно защищенных расположенными рядом с прибором блоками другой аппаратуры и конструктивными элементами) в рабочий объем камеры могли проникать протоны с энергиями  $E_p > 30$  МэВ и электроны с  $E_e > 2.2$  МэВ.

Для исследования динамики электронов внешнего пояса во время магнитной бури 14 декабря 2006 г. привлечены данные измерений электронов с  $E_e = 0.8\text{--}1.2$  МэВ на геостационарном спутнике Экспресс-А3.

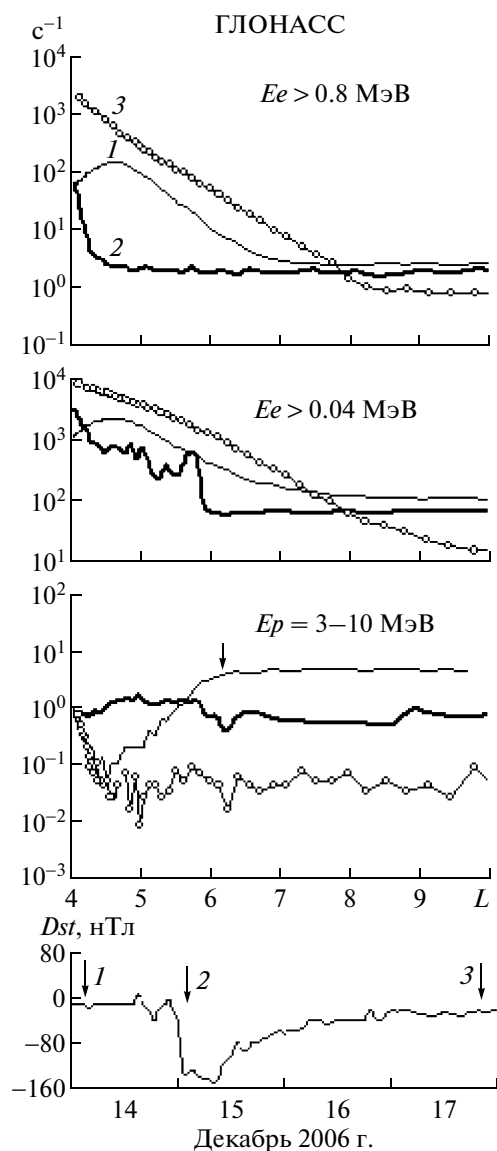
## 3. ПРОТОНЫ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ДЕКАБРЕ 2006 г.

Ниже представлены данные о солнечных вспышках в первой половине декабря 2006 г. Указаны дата, время начала, максимума и окончания вспышек, координаты, рентгеновский и оптический баллы.

Дата вспышки, декабрь 2006 г.	Время вспышки UT (Hα)			Координаты	Балл
	Начало	Максимум	Окончание		
05	10:28	10:38	11:00	S07 E79	X9.0/2N
06	18:32	18:45	21:35	S06 E63	X6.5/3B
07	18:41	19:03	20:59	S07 E47	M2.0/1N
13	02:20	02:34	06:18	S06 W24	X3.4/4B
14	22:06	22:15	00:11	S06 W48	X1.5/2B



**Рис. 3.** Вариации потоков протонов и электронов на ИСЗ ГЛОНАСС и Экспресс-А3 во время бури 14.12.2006 г. Сверху вниз:  $B_z$ -компонента межпланетного магнитного поля;  $Dst$ -вариация;  $AL$ -индекс; электроны с  $E_e = 0.8-1.2$  МэВ (Экспресс-А3); электроны с  $E_e > 0.8$  МэВ (ГЛОНАСС); электроны с  $E_e > 0.04$  МэВ (ГЛОНАСС) протоны с  $E_p = 3-10$  МэВ (ГЛОНАСС).



**Рис. 4.** Профили потоков электронов с  $E_e > 0.04$ ,  $> 0.8$  МэВ и протонов с  $E_p = 3\text{--}10$  МэВ, зарегистрированные на ИСЗ ГЛОНАСС в период 14–17.12.2006 г. Моменты пролетов ИСЗ указаны стрелками на графике  $Dst$ -вариации.

Все перечисленные вспышки произошли в одной активной области (№ 10930) по мере её перемещения по видимой стороне Солнца от восточного лимба до западных долгот, близких к оптимальным для прямого распространения частиц СКЛ к Земле по силовым линиям межпланетного магнитного поля.

В процессе распространения в межпланетной среде потоков СКЛ, генерированных в различных солнечных вспышках, произошло их наложение, особенно заметное для потоков от восточных вспышек.

На рис. 1 представлен временной ход потоков солнечных протонов, зарегистрированных на ИСЗ GOES-11 ( $E_p > 10, 50, 100$  МэВ) и ГЛОНАСС ( $E_p = 15\text{--}40, 40\text{--}150, 70\text{--}120$  МэВ). Для ИСЗ ГЛОНАСС приведены средние значения потоков, наблюдавшихся вне радиационных поясов ( $L > 10$ ).

На рис. 2 даются примеры спектров солнечных протонов, измеренных на ИСЗ GOES и ГЛОНАСС 7 и 13 декабря 2006 г. Видно хорошее согласование спектров.

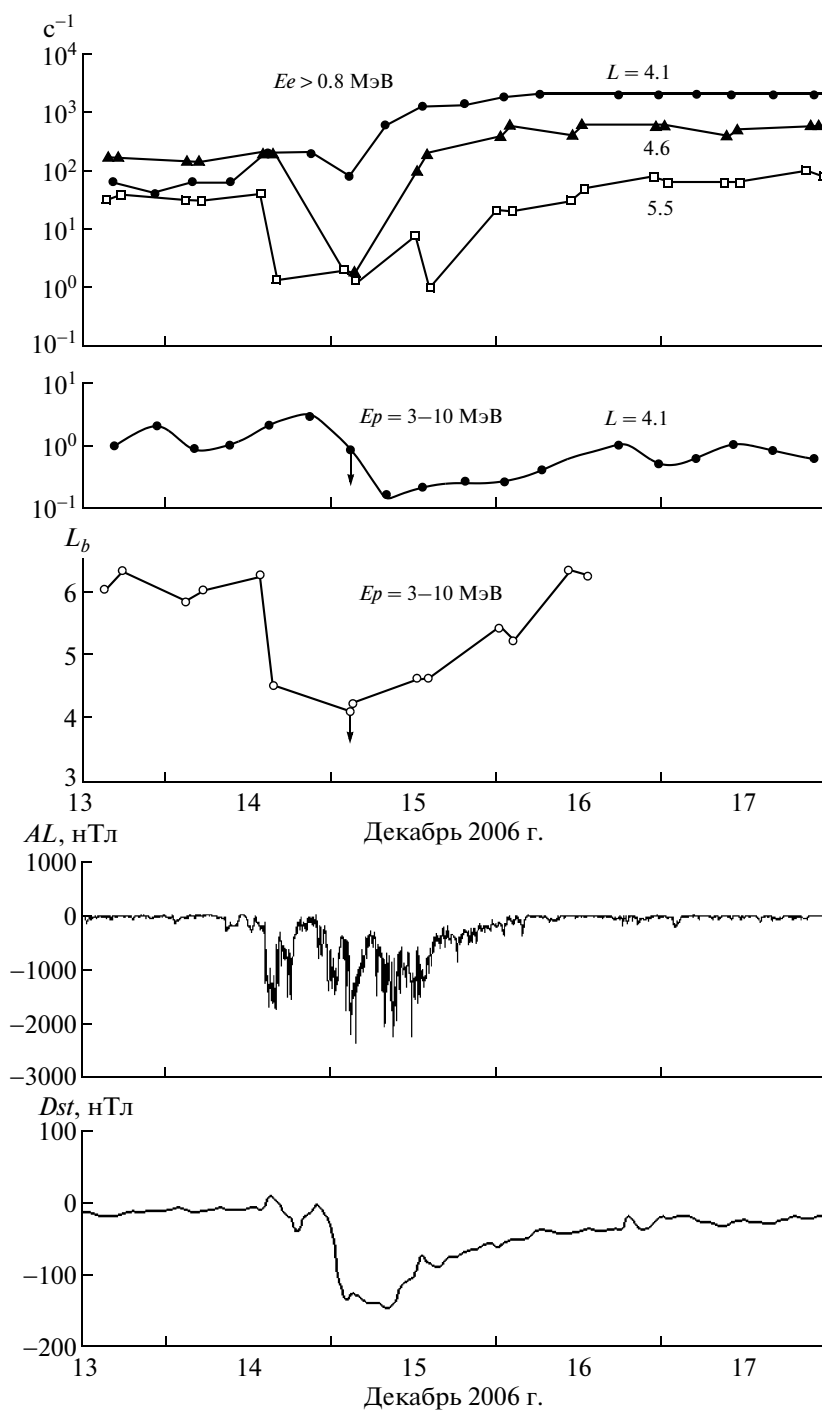
#### 4. МАГНИТНАЯ БУРЯ 14 ДЕКАБРЯ 2006 г.: ДИНАМИКА РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ И ГРАНИЦ ПРОНИКНОВЕНИЯ ПРОТОНОВ СКЛ В МАГНИТОСФЕРУ

На рис. 3 представлен временной ход  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля, индексов геомагнитной активности  $Dst$ ,  $AL$  и потоков электронов с  $E_e > 0.04$ ;  $> 0.8$  МэВ и протонов с  $E_p = 3\text{--}10$  МэВ на орбите ГЛОНАСС и электронов с  $E_e = 0.8\text{--}1.2$  МэВ на геостационарном ИСЗ Экспресс-А3 за период 13–17 декабря 2006 г.

Межпланетная среда была сильно возмущена: скорость солнечного ветра превышала 1000 км/с, плотность достигала  $20\text{ см}^{-3}$ ,  $B_z$ -составляющая межпланетного магнитного поля составила  $-20$  нТл 14 декабря (данные ИСЗ ACE). В результате 14 декабря развилась сильная магнитная буря ( $|Dst|_{\max} = 146$  нТл) с внезапным началом в 14:15 UT. В момент внезапного начала резко усилились возмущения в авроральной зоне, что типично для сильных бурь с внезапным началом [Тверская и Хорошева, 1974; Kokubun S. et al., 1974; Тверская, 2000; Mays et al., 2007; Лазутин и Кузнецов, 2008],  $AL$ -индекс достиг  $\sim 1800$  нТл.

Потоки электронов с  $E_e = 0.8\text{--}1.2$  МэВ на периферии радиационных поясов (ИСЗ Экспресс-А3) упали во время бури примерно на два порядка от добулевой величины. После бури на геостационарной орбите не произошло заметного возрастания этих электронов. Орбита ИСЗ ГЛОНАСС пересекает вблизи экваториальной плоскости сердцевину внешнего радиационного пояса ( $L \sim 4$ ), затем уходит в высокоширотные области магнитосферы. Как видно из рис. 3, потоки электронов с  $E_e > 0.8$  МэВ на ИСЗ ГЛОНАСС возросли примерно на порядок относительно добулевого уровня, что свидетельствует о преимущественной инжекции электронов во внутренние области магнитосферы.

Максимум радиационного пояса протонов с энергией  $> 3$  МэВ в стационарных условиях наблюдается на  $L = 2$ . Поэтому на орбите ГЛОНАСС потоки протонов с энергией  $3\text{--}10$  МэВ имеют максимальное значение на минимальном  $L \sim 4$ , достигаемом на этой орбите. Во время магнитной бури потоки этих протонов упали, а к концу фазы

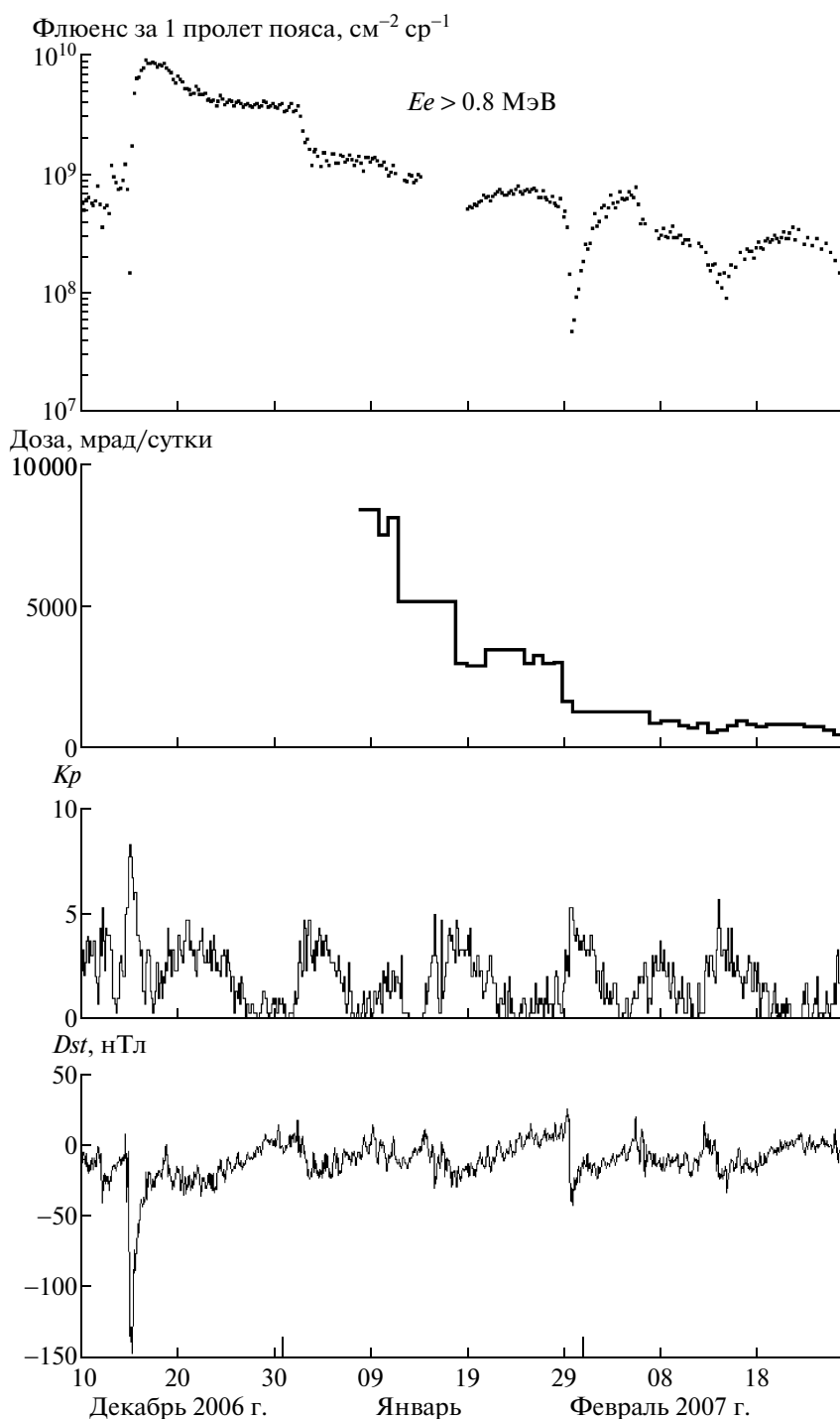


**Рис. 5.** Вариации потоков электронов с  $E_e > 0.8$  МэВ, протонов с  $E_p = 3-10$  МэВ на  $L$ -оболочках 4.1, 4.6, 5.5 и границ проникновения солнечных протонов с  $E_p = 3-10$  МэВ в магнитосферу во время бури 14.12.2006 г. (ИСЗ ГЛОНАСС). В нижней части рисунка:  $AL$ -индекс и  $Dst$ -вариация.

восстановления почти достигли предбурового уровня.

Солнечные протоны во время главной фазы бури заполнили всю орбиту вплоть до минимального  $L = 4.1$ . Этот эффект иллюстрирует рис. 4. Здесь представлены профили потоков электронов

с  $E_e > 0.04; 0.8$  МэВ и протонов с  $E_p = 3-10$  МэВ до бури, во время главной фазы и в конце фазы восстановления. Моменты пролетов ИСЗ ГЛОНАСС обозначены стрелками на графике  $Dst$ -вариации. Перед бурей хорошо видна граница проникновения солнечных протонов в магнитосферу,



**Рис. 6.** Временной ход флюенсов за пролет радиационного пояса электронов с  $E_e > 0.8 \text{ МэВ}$  и дозы радиации за период 12.12.2006 г.–28.02.2007 г. на орбите ГЛОНАСС.

определяемая по моменту спада интенсивности от уровня на полярном плато ( $L = 6.2$ , отмечена стрелкой на третьей панели сверху). Во время главной фазы бури поток релятивистских электронов упал в максимуме ( $L_{\text{max}} \sim 4.6$ ) на два порядка, а солнечные протоны проникли до минимального  $L = 4.1$ . На фазе восстановления пик по-

токов релятивистских электронов сместился в область  $L < 4.1$ , и видно возрастание потоков на  $L = 4.1$  более чем на порядок величины по сравнению с добуриевым уровнем. Таким образом, в результате бури сформировался новый пояс релятивистских электронов с максимумом на  $L < 4.1$ . По данным низковисотного ИСЗ “Университет-

ский-Татьяна” (<http://cosmos.msu.ru>) максимум этого пояса регистрировался на  $L \sim 3.6$ . Это значение  $L_{\max}$  хорошо соответствует закономерности, связывающей положение максимума пояса инжектированных релятивистских электронов с амплитудой магнитной бури [Тверская, 1986]:  $|Dst|_{\max} = 2.75 \times 10^4 / L_{\max}^4$ .

Рис. 5 иллюстрирует динамику электронов и протонов радиационных поясов на разных  $L$ -оболочках и границ проникновения солнечных протонов в ночную магнитосферу.

Особый интерес представляют вариации, связанные с суббуревым возмущением, развившемся после внезапного начала бури. Видно возрастание потоков релятивистских электронов на внутренних  $L$ -оболочках во время такой суббури, а также смещение к низким широтам границы проникновения солнечных протонов на больших высотах. Ранее смещение границы солнечных протонов во время отдельной суббури регистрировалось лишь на низковысотных ИСЗ [Дарчиева и др., 1983; Панасюк и др., 2004]. Во время главной фазы бури и фазы восстановления наблюдались типичные вариации электронов и протонов радиационных поясов. На  $L = 4.1$  во время главной фазы бури наблюдалось падение интенсивности релятивистских электронов. В “новом” поясе инжектированных во время бури электронов интенсивность возросла более чем на порядок по сравнению с добуравым уровнем. На  $L = 4.6$  (добуравый максимум пояса) потоки на главной фазе бури упали до фона, на фазе восстановления увеличились в несколько раз. На  $L = 5.5$  падение потоков до фонового уровня наблюдалось и на фазе восстановления, что связано с приближением к Земле границы радиационных поясов во время отдельных суббурь.

Потоки протонов радиационного пояса с  $E_p = 3-10$  МэВ на  $L = 4.1$  упали во время главной фазы бури и затем постепенно почти достигли предбуревых уровней в конце фазы восстановления. Стрелка вниз у точки означает, что в действительности интенсивность меньше, так как здесь, на минимальном  $L$ , регистрировались солнечные протоны. Стрелка у точки на графике границ проникновения солнечных протонов показывает, что солнечные протоны в это время достигли более глубоких  $L$ -оболочек, чем пересекаемые орбитой ГЛОНАСС.

## 5. ИЗМЕРЕНИЕ ДОЗЫ РАДИАЦИИ

После бури 14 декабря 2006 г. на орбите ГЛОНАСС около двух недель в радиационном поясе сохранялся высокий уровень потоков релятивистских электронов. 8 января 2007 г. начала поступать информация с ионизационной камеры, установленной на одном из ИСЗ ГЛОНАСС. На

рис. 6 представлен временной ход флюенсов за пролет пояса электронов с  $E_e > 0.8$  МэВ за период 12.12.2006–28.02.2007 г. Видно, что после бури флюенс возрос более чем на порядок величины. К 8 января потоки этих электронов значительно уменьшились, но все еще были выше предбуревых уровней. К сожалению, за этот период нет данных о более высокоэнергичных электронах, которые проникают в ионизационную камеру. Доза радиации за 8–9 января составила 8.5 рад/сутки. Затем, по мере убывания потоков релятивистских электронов, она уменьшалась и примерно через месяц достигла  $\sim 1$  рад/сутки.

## 6. ВЫВОДЫ

Основные результаты работы могут быть сведены к следующему:

1. Потоки солнечных протонов, зарегистрированные в высокоширотных областях орбиты ИСЗ ГЛОНАСС во время солнечных экстремальных событий в декабре 2006 г. хорошо согласуются с данными ИСЗ GOES.

2. Во время магнитной бури 14 декабря 2006 г. инжектировались релятивистские электроны с интенсивностью, превышающей добуравую более чем на порядок величины. Максимум радиационного пояса переместился с  $L = 4.7$  на  $L < 4$ . В то же время изменения на геостационарной орбите (ИСЗ Экспресс-А3) не показали заметного возрастания интенсивности электронов с  $E_e = 0.8-1$  МэВ. По данным низковысотного ИСЗ “Университетский-Татьяна”  $L_{\max} \sim 3.6$ . Это значение хорошо соответствует зависимости:  $|Dst|_{\max} = 2.75 \times 10^4 / L_{\max}^4$ .

3. Потоки протонов с  $E_p = 3-10$  МэВ во время бури упали, к концу фазы восстановления почти достигли предбуревых величин.

4. В спокойных условиях граница проникновения солнечных протонов с  $E_p = 3-10$  МэВ в ночном секторе магнитосферы находилась на  $L \sim 6.2$ . Во время главной фазы сильной бури 14 декабря солнечные протоны заполнили всю орбиту ГЛОНАСС вплоть до минимального  $L = 4.1$ .

5. Впервые во время специфической ударной суббури, связанной с внезапным началом бури, зарегистрировано смещение границы проникновения солнечных протонов к Земле на больших высотах.

Авторы работы выражают благодарность группам и лицам, поддерживающим Интернет-сайты данных по ИСЗ GOES, ACE, “Университетский” и геомагнитной активности (WDC-2, Kyoto).

Работа выполнена при поддержке гранта НШ-1255.2008.2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Гайдаш С.П., Иванов К.Г., Канониди Х.Д. Необычно высокая геомагнитная активность в 2003 г. // Космич. исслед. Т. 42. № 6. С. 563–573. 2004.
- Дарчиева Л.А., Иванова Т.А., Коврыгина Л.М., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Диагностика состояния магнитосферы по данным о солнечных космических лучах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 23. № 1. С. 62–67. 1983.
- Лазутин Л.Л., Кузнецов С.Н. Природа авроральной активации во время внезапного начала магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 2. С. 173–182. 2008.
- Панасюк М.И., Кузнецов С.И., Лазутин Л.Л. и др. Магнитные бури в октябре 2003 года. Коллаборация “Солнечные экстремальные события 2003 г.” // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 509–554. 2004.
- Тверская Л.В. О границе инъекции электронов в магнитосферу Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 26. С. 864–865. 1986.
- Тверская Л.В., Гинзбург Е.А., Иванова Т.А., Павлов Н.Н., Свидский П.М. Особенности динамики внешнего радиационного пояса во время сильной магнитной бури 15 мая 2005 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 6. С. 737–744. 2007.
- Тверская Л.В., Хорошева О.В. Особенности развития гигантских DP-2 вариаций во время бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 14. № 1. С. 106–110. 1974.
- Юратин Е.И., Шумиуров В.И., Фоминых В.В., Тельцов М.В. Исследования дозиметрических характеристик ионизационных камер с электростатическим реле // Измерительная техника. Т. 3. С. 48–53. 1979.
- Kokubun S., McPherron R., Russel C.T. Triggering of substorms by solar wind discontinuities // J. Geophys. Res. V. 82. P. 7486. 1977.
- Mays M.L., Horton W., Kozyra J., Zurbuchen T.H., Huang C., Spencer E. Effect of Interplanetary Shocks on the AL and Dst indices // Geophys. Res. Lett. V. 34. № 11, 111104, doi:10.1029/2007/GL029844, 2007.
- Tverskaya L.V. The main phase substorms and related phenomena in charged particle population // Proc. of 5th International Conference on Substorms. St.-Peterburg, Russia / 16–20 May 2000 (ESA SP-443, July 2000). P. 459–462. 2000.
- Vedenkin N.N., Balashov S.V., Ivanov V.V., Ivanova T.A., Karpenko D.S., Maksimov I.A., Pavlov N.N., Rubinstein I.A., Tverskaya L.V., Trofimchuk D.A., Tulupov V.I. Solar protons and outer radiation belt during solar extreme events of December 2006: GLONASS and Express data // SEE-2007: International Symposium, Athens, Greece. September 24–27, 2007. Program and Abstracts. P. 33, 2007.