

УДК 523.165

## ВНЕШНИЙ РАДИАЦИОННЫЙ ПОЯС РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В МИНИМУМЕ 23-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2012 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>, Д. С. Карпенко<sup>2</sup>,  
С. Г. Кочура<sup>2</sup>, И. А. Максимов<sup>2</sup>, С. И. Опенько<sup>2</sup>, Н. Н. Павлов<sup>1</sup>, С. Я. Рейзман<sup>1</sup>,  
И. А. Рубинштейн<sup>1</sup>, Н. Н. Ситникова<sup>2</sup>, М. В. Тельцов<sup>1</sup>, Д. А. Трофимчук<sup>2</sup>, В. И. Тулупов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва

<sup>2</sup>ОАО “Информационные спутниковые системы” им. акад. М.Ф. Решетнёва,  
г. Железногорск, Красноярский край  
e-mail: lvtverskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 13.07.2011 г.  
После доработки 18.01.2012 г.

Проанализированы данные измерений электронов с  $E_e > 1$  МэВ и дозы радиации за защитой  $\sim 2$  г/см<sup>2</sup> Al на ИСЗ ГЛОНАСС (круговая орбита на высоте  $\sim 20000$  км с наклоном  $\sim 65^\circ$ ) за период декабрь 2006–май 2010 гг. Минимум 23-го цикла солнечной активности оказался самым длительным за всю космическую эру. В результате в 2009 г. среднеполугодовые потоки электронов и суточные дозы радиации уменьшились более чем на порядок по сравнению с измеренными в 2007 г. Приведен пример диффузионной волны электронов, развивающейся в промежутках между магнитными бурями. Такой процесс может привести к значительному возрастанию дозы радиации на орбите даже в условиях слабых геомагнитных возмущений.

Прослежена динамика вариаций потоков релятивистских электронов во время бури 5–6 апреля 2010 г., когда произошло их первое большое возрастание в 24-ом цикле солнечной активности.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Увеличение срока активного существования космических аппаратов и использование в их составе элементов, чувствительных к различным факторам космического пространства, поставило в повестку дня настоятельную необходимость осуществления непрерывного мониторинга в натуральных условиях состояния космической геофизической среды, поскольку на основе существующих модельных представлений не удается с достаточной степенью точности прогнозировать воздействие космической погоды на функционирование бортовых систем.

В годы минимума солнечной активности (СА), когда не наблюдается сколько-нибудь значительных потоков энергичных солнечных протонов, определяющим “поражающим” фактором космической погоды для бортовых систем на околоземных орбитах являются релятивистские электроны внешнего радиационного пояса, получившие в мировой литературе название “космические киллеры”.

Наиболее широко используемая модель потоков электронов для минимума СА AE-8min [Vette, 1991] построена, в основном, по данным измерений в 19-ом цикле СА. Орбиты спутников системы ГЛОНАСС пересекают сердцевину внешнего радиационного пояса электронов ( $L \sim 4$ , где  $L$  —

параметр Мак Илвейна) вблизи экваториальной плоскости. В отсутствие сильных магнитных бурь, когда релятивистские электроны могут инжектироваться в более глубокие области магнитосферы [Тверская, 1986], измерения потоков этих электронов на орбите ИСЗ ГЛОНАСС дают полное представление о состоянии внешнего радиационного пояса [Иванова и др., 2000].

В настоящей работе мы рассмотрим особенности динамики потоков электронов с  $E_e > 1$  МэВ и дозы радиации за защитой  $\sim 2$  г/см<sup>2</sup> Al, измеренных на орбите ИСЗ ГЛОНАСС за период декабрь 2006 г.–май 2010 г.

### 2. ОРБИТА И АППАРАТУРА

Спутники системы ГЛОНАСС имеют круговую орбиту на высоте  $\sim 20000$  км с наклоном  $\sim 65^\circ$ . С декабря 2006 г. по сентябрь 2009 г. поток электронов измерялся полупроводниковым спектрометром, доза радиации за защитой  $\sim 2$  г/см<sup>2</sup> Al — ионизационной камерой [Тверская и др., 2008]. В 2010 г. были установлены гайгеровские счетчики СБМ-20 и СИ-ЗБГ, имеющие такую же общую защиту. Счетчики и камера регистрировали по прямому прохождению электроны с энергией  $> 4.5$  МэВ и протоны с энергией  $> 42$  МэВ. Эффективная площадь регистрации частиц для счетчи-

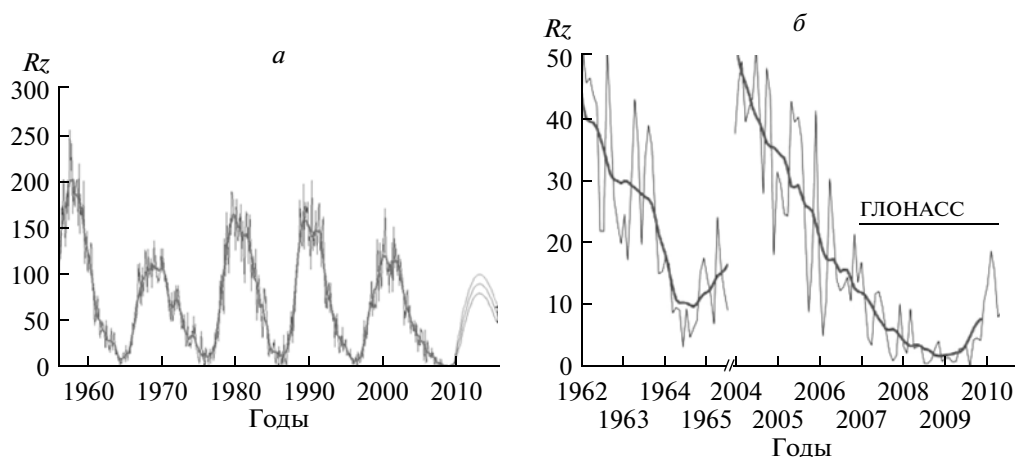


Рис. 1. Временной ход числа солнечных пятен  $Rz$  в 19-м–24-м циклах СА (а). Сравнение изменений числа солнечных пятен  $Rz$  в минимуме 19-го и 23-го циклов СА (б).

ков СБМ-20 и СИ-ЗБГ составляет соответственно 4 и  $0.05 \text{ см}^2$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

#### 3.1. Особенности минимума 23-го цикла СА

На рисунке 1а представлены вариации числа солнечных пятен  $Rz$  (тонкие линии — месячные  $Rz$ , жирные линии — сглаженные значения) за весь период космических исследований. Хорошо видны минимумы СА, которые при  $Rz \leq 10$  длились не более полугодя. Минимум 23-го цикла отличается от всех других значительно большей длительностью. На рисунке 1б сравниваются минимумы 19-го и 23-го циклов СА. Видно, что в 23-м цикле сглаженные значения  $Rz$  более двух лет были ниже минимального для 19-го цикла. Прямой отрезком показан исследуемый интервал информации с ИСЗ ГЛОНАСС.

Как же сказался такой длительный минимум СА на динамике внешнего пояса электронов?

#### 3.2. Вариации потоков релятивистских электронов и доза радиации на орбите ГЛОНАСС в 2006–2010 гг.

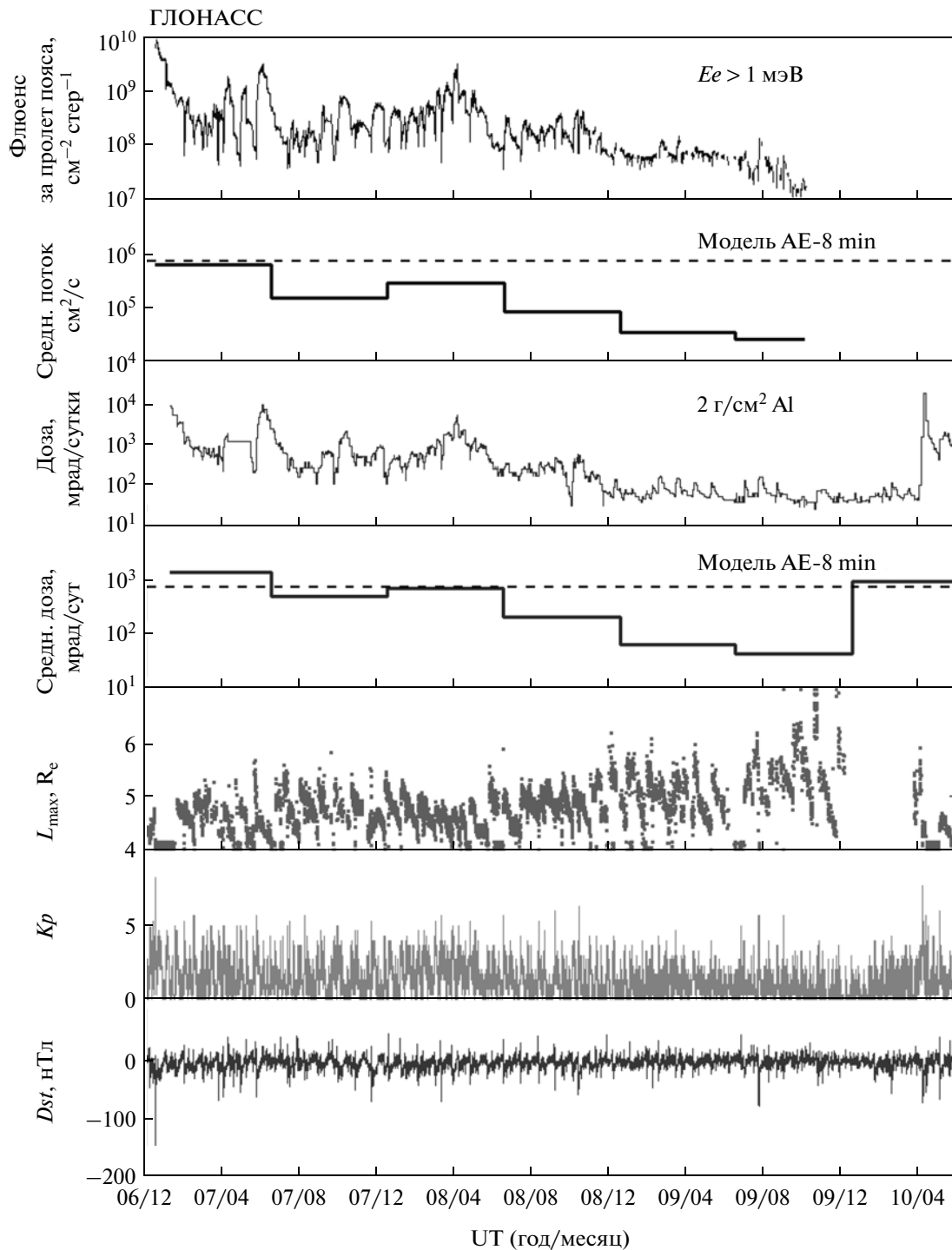
##### 3.2.1. Временной ход потоков электронов и доза радиации

На рисунке 2 представлен временной ход флюенсов за пролет пояса электронов с  $E_e > 1 \text{ МэВ}$  и суточной дозы радиации за защитой  $\sim 2 \text{ г/см}^2 \text{ Al}$ , измеренных на ИСЗ ГЛОНАСС за период декабрь 2006–май 2010 г., а также положение максимумов внешнего пояса,  $L_{\max}$ , и геомагнитные индексы  $Dst$  и  $Kp$ . Приведены также усредненные за полгода потоки электронов с  $E_e > 1 \text{ МэВ}$  и суточные дозы радиации. Штриховыми линиями представлены

рассчитанные по модели АЕ-8min средние потоки электронов и доза радиации за защитой  $2 \text{ г/см}^2$  (в предположении плоской защиты).

К сожалению, мы не располагаем точным расчетом дополнительной защиты, которая определяется разнообразной аппаратурой, окружающей наш измерительный блок. Предварительные оценки показывают, что расчетные значения дозы могут быть уменьшены в 2–3 раза. Однако это не влияет на основной результат о длительном значительном уменьшении потоков релятивистских электронов и доз радиации во внешнем поясе в минимуме 23-го цикла СА. В рамках модели АЕ-8 потоки электронов с  $E_e > 1 \text{ МэВ}$  и доза радиации за защитой  $\geq 2 \text{ г/см}^2$  на орбите ГЛОНАСС убывают от максимума к минимуму СА в пределах фактора 2. В нашем случае мы видим в 2009 г. падение измеренных среднеполугодовых потоков электронов и дозы радиации более чем на порядок величины по отношению только к 2007 г., далеко отстоящему от максимума СА 2000–2001 гг. Только в первом полугодии 2010 г. среднеполугодовая доза достигла значений, зарегистрированных в 2007 г. Это увеличение дозы было связано в основном с первым в 24-м цикле СА большим возрастанием потоков релятивистских электронов после бури в апреле 2010 г. В результате инжекции во внутренние области магнитосферы мощных потоков релятивистских электронов суточная доза радиации после бури достигла 20 рад. Это событие будет рассмотрено ниже (п. 3.2.3).

Как видно из временного хода  $L_{\max}$ , “новые” пояса релятивистских электронов появлялись после рекуррентных бурь с  $L_{\max} > 4.5$  и затем смещались в течение  $\sim 3$ -х недель до  $L_{\max} \sim 4$  (минимальные значения  $L$ , достигаемые орбитой ИСЗ ГЛОНАСС). Исключение составляет сильная буря в декабре



**Рис. 2.** Временной ход флюенсов электронов с  $E_e > 1$  МэВ и дозы радиации на орбите ИСЗ ГЛОНАСС в 2006–2010 гг. Сверху вниз: 1 – флюенсы за пролет пояса электронов с  $E_e > 1$  МэВ; 2 – среднеполугодовой поток электронов с  $E_e > 1$  МэВ, штриховая линия – расчет по модели AE-8 min; 3 – суточная доза радиации; 4 – среднеполугодовой доза радиации, штриховая линия – расчет по модели AE-8 min; 5 – положение максимума ( $L_{\max}$ ) внешнего пояса релятивистских электронов; 6 –  $K_p$ -индекс; 7 –  $Dst$ -индекс.

2006 г., когда релятивистские электроны инжектировались в более глубокие области магнитосферы [Тверская и др., 2008]. Как показал детальный анализ всех случаев инжекции во время бурь,

значения  $L_{\max}$  соответствовали закономерности, связывающей  $L_{\max}$  с амплитудой  $Dst$ -вариации магнитной бури [Тверская, 1986].

$$|Dst|_{\max} = 2.75 \times 10^4 / L_{\max}^4. \quad (1)$$

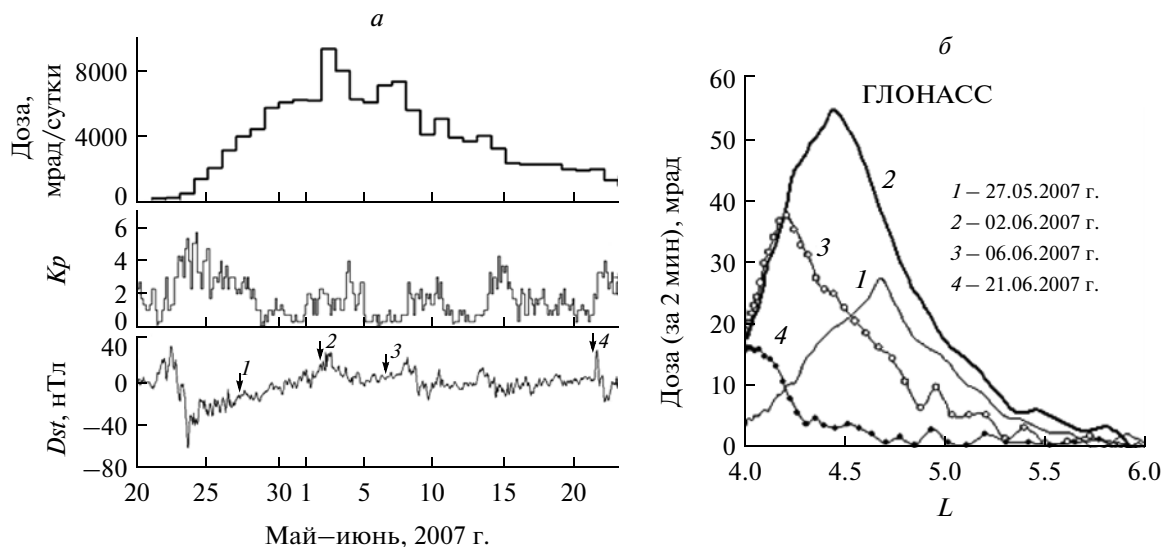


Рис. 3. Временной ход суточной дозы радиации на ИСЗ ГЛОНАСС за период 20.05–22.06.2007 г. (а). Диффузионная волна релятивистских электронов внешнего пояса, зарегистрированная по данным измерений дозы на ИСЗ ГЛОНАСС (б).

### 3.2.2. Диффузионная волна релятивистских электронов в мае–июне 2007 г.

На рисунке 3а представлен временной ход суточной дозы радиации за период 20 мая–21 июня 2007 г. 23 мая произошла умеренная магнитная буря ( $|Dst|_{\max} \sim 60$  нТл). Перед бурей суточная доза радиации составила 25 мрад/сутки. На фазе восстановления бури доза начала возрастать, и через ~ неделю уже в спокойных условиях доза достигла 9 рад/сутки. Даже через месяц доза не вернулась к добуревым значениям. Таким образом, в течение длительного времени в отсутствие сильных геомагнитных возмущений доза на орбите может удерживаться на высоком уровне. Это обусловлено особенностями динамики релятивистских электронов внешнего пояса. В интервалах между бурями могут создаваться благоприятные условия для развития диффузионных волн этих электронов. Сформировавшийся в результате бури пояс электронов затем смещается к Земле в процессе диффузии под действием внезапных импульсов [Тверской, 1965, 1968; Tverskoу, 1969]. При отсутствии сильной диссипации интенсивность электронов на фронте диффузионной волны нарастает. Такие диффузионные волны наблюдались многократно, в том числе и на ИСЗ ГЛОНАСС [Tverskaya, 1996 и соответствующие ссылки; Иванова и др., 2000]. Во всех случаях параметры этих волн соответствовали теории диффузии под действием внезапных импульсов. Не является исключением и событие в мае–июне 2007 г.

На рисунке 3б представлено несколько  $L$ -профилей распределения дозы радиации, измеряемой за 2 мин при пролете через радиационный пояс. Первый профиль получен 27 мая, в начале фазы восстановления бури. Максимум пояса ин-

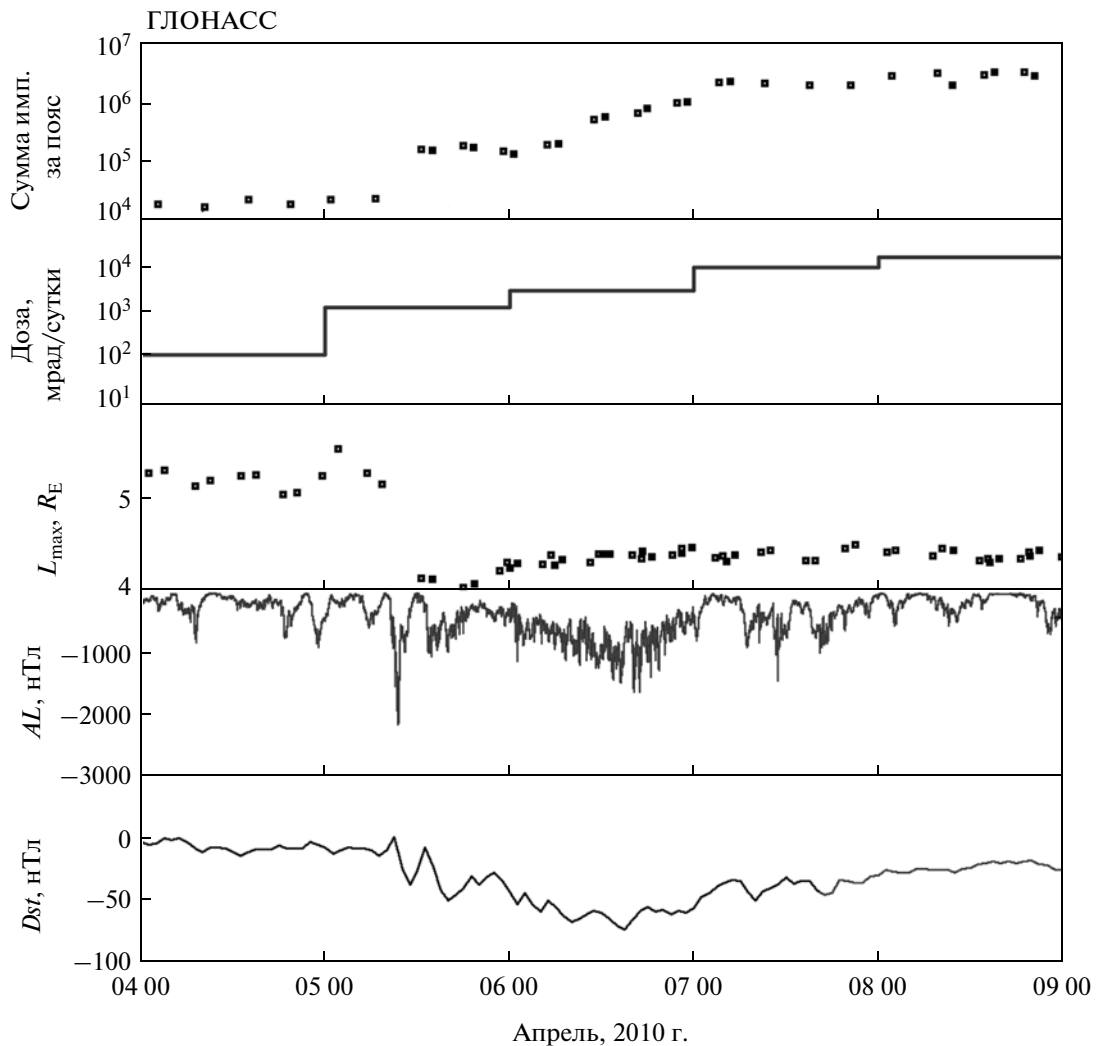
жектированных электронов находился на  $L \sim 4.7$ , что соответствует зависимости (1). Через ~1 неделю максимум сместился до  $L \sim 4.5$ , а интенсивность электронов возросла. Затем максимум пояса постепенно смещался к Земле и через ~3 недели достиг минимальной для орбиты ГЛОНАСС оболочки  $L = 4$ .

В соответствии с теорией диффузии под действием внезапных импульсов, время распространения возмущения за счет переноса от границы магнитосферы на  $L$ -оболочку составляет  $\tau_D(L) = \frac{1}{120D_0L^8}$ , где  $D_0$  – коэффициент диффузии ( $5-10) \times 10^{-14} \text{ с}^{-1}$ . Легко видеть, что наблюдаемые времена смещения  $L_{\max}$  хорошо соответствуют теоретическим.

### 3.2.3. Первое большое возрастание потоков релятивистских электронов внешнего пояса в 24-м цикле СА

Как мы видели выше (см. рис. 2), суточная доза радиации, регистрируемая на ИСЗ ГЛОНАСС в 2009 г.–начале 2010 г., варьировала от нескольких десятков до первых сотен мрад/сут. В начале апреля 2010 г. к Земле подошел высокоскоростной поток солнечного ветра (скорость достигла  $\sim 800$  км/с), возросла геомагнитная возмущенность, а 5 апреля началась умеренная магнитная буря ( $|Dst|_{\max} \sim 73$  нТл) с внезапным началом (SSC). Амплитуда SSC составила  $\sim 40$  нТл.

На рисунке 4 представлены временной ход флюенсов (суммарная скорость счета за пролет пояса) по данным счетчиков СИЗ-БГ, установленных на 2-х ИСЗ ГЛОНАСС. Гайгеровские



**Рис. 4.** Возрастание потоков релятивистских электронов в результате бури 05.04.2010 г. Сверху-вниз: 1 – сумма скоростей счета счетчиков СИЗ-БГ за пролет пояса по данным измерений на двух ИСЗ ГЛОНАСС; 2 – суточная доза радиации за защитой  $\sim 2$  г/см<sup>2</sup> Al; 3 – положение максимума ( $L_{\max}$ ) внешнего пояса; 4 –  $AL$  – индекс; 5 –  $Dst$  – индекс.

счетчики СИЗ-БГ по прямому прохождению регистрировали электроны с энергиями  $>4.5$  МэВ и тормозное излучение от электронов с энергиями в несколько сотен кэВ.

После SSC большой амплитуды обычно развивается достаточно мощная суббуря [Тверская и Хорошева, 1974; Лазутин и Кузнецов, 2008]. Так произошло и в данном случае. Амплитуда этой суббури превысила 2000 нТл и была самой большой за всю бурю. В результате уже в начале главной фазы бури потоки электронов в поясе возросли  $\sim$  на порядок величины, а максимум пояса сместился до  $L \sim 4.2$ . В дальнейшем, в процессе развития бури потоки продолжали увеличиваться в максимуме бури и на фазе восстановления. Суточная доза радиации уже 5 апреля возросла на порядок и составила 1.2 рад/сутки, а к концу бури достигла 20 рад/сутки.

Такое возрастание дозы было зарегистрировано впервые с января 2007 г. Как мы видим, в данном событии не наблюдалось типичного падения интенсивности в поясе на главной фазе бури [Friedel et al., 2002 и соответствующие ссылки]. Однако и ранее по данным одновременных наблюдений на полярных ИСЗ “Космос-900” и “Интеркосмос-19” наблюдалось аналогичное продвижение к Земле и возрастание потоков электронов разных энергий (вплоть до  $E_e \sim 1.2$  МэВ), начиная с главной фазы бури [Волков и др., 1984]. В данном случае мы видим этот эффект и по наблюдениям вблизи экваториальной плоскости.

Добуревые значения дозы были превышены на  $\sim 2$  порядка. Практически только за счет этого возрастания средняя за январь–май доза радиации достигла модельных значений. Максимум сформировавшегося после бури пояса реляти-

вистских электронов находился на  $L_{\max} = 4.3$ , что хорошо согласуется с закономерностью (1).

В предположении, что скорость счета счетчиков СИ-ЗБГ обусловлена прямым прохождением электронов с  $Ee > 4.5$  МэВ, поток этих электронов в максимуме пояса 8 апреля, после бури, составил  $10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Зарегистрированный на ИСЗ GOES-12 поток электронов с  $Ee > 4$  МэВ в то же время составил  $10^3 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ , что дает при пересчете к изотропному потоку  $\sim 10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Эти данные находятся в удовлетворительном согласии, так как максимум “нового” пояса сформировался на  $L \sim 4.3$ , гораздо ближе к Земле, нежели геосинхронная орбита ( $L = 6.6$ ), поэтому поток более высокоэнергичных электронов на ИСЗ ГЛОНАСС ( $Ee > 4.5$  МэВ) может быть больше или иметь примерно ту же величину, что и для электронов с  $Ee > 4$  МэВ на геосинхронной орбите.

Рассматриваемый случай представляет большой интерес с точки зрения космической погоды (классифицируется как событие G3 в космической погоде) и нуждается в дополнительном анализе. Мы предполагаем в дальнейшем рассмотреть динамику потоков электронов в этом событии, привлекая данные, полученные на ИСЗ “Метеор” и данные из сети Интернет, сопоставляя их с детальной картиной геомагнитных возмущений.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты могут быть сведены к следующему.

– По данным выполненных измерений установлено, что произошло заметное вырождение внешнего пояса релятивистских электронов в течение минимума 23-го цикла СА, который был самым длительным из всех минимумов СА Космической Эры.

– С 2007 г. до начала 2010 г. наблюдалось постепенное снижение потоков релятивистских электронов и дозы радиации на орбите ИСЗ ГЛОНАСС. Усредненные за полугодия потоки электронов ( $Ee > 1$  МэВ) и дозы за  $\sim 2 \text{ г/см}^2 \text{ Al}$  в 2009 г. уменьшились по сравнению с 2007 г. более чем на порядок величины.

– На фоне общего понижения потоков электронов и дозы радиации зарегистрированы их отдельные возрастания (иногда превышающее порядок величины) в спокойных условиях между слабыми и умеренными бурями. Возрастания связаны с формированием диффузионных волн релятивистских электронов, обуславливающих смещение внешнего пояса к Земле с возрастанием интенсивности на фронте волны. Скорость смещения соответствовала теории диффузии под действием внезапных импульсов.

– Проанализировано первое в 24-м цикле СА мощное возрастание потоков релятивистских электронов внешнего пояса в результате магнитной бури 5–6 апреля 2010 г. Потоки электронов и доза радиации возросли на 2 порядка по сравнению с добуревыми. Характерной особенностью возрастания было постоянное увеличение потоков электронов и дозы радиации, включая главную фазу бури.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Волков И.Б., Дронов А.В., Коврыгина Л.М., Кратенко Ю.И., Минеев Ю.В., Сосновец Э.Н., Тверская Л.А. Динамика внешнего пояса энергичных электронов по данным одновременных измерений на ИСЗ “Интеркосмос-19” и “Космос-900” // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 24. № 4. С. 642–646. 1984.
- Иванова Т.А., Павлов Н.Н., Рейзман С.Я., Рубинштейн И.А., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Динамика внешнего радиационного пояса электронов в минимуме солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 40. № 1. С. 13–19. 2000.
- Лазутин Л.Л., Кузнецов С.Н. Природа внезапных авроральных активаций в начале магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 2. С. 173–182. 2008.
- Тверская Л.В. О границе инжекции электронов в магнитосферу Земли // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 26. № 5. С. 864–865. 1986.
- Тверская Л.В., Хорошева О.В. Особенности развития гигантских ДР-2 вариаций во время бури // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 14. № 1. С. 106–110. 1974.
- Тверская Л.В., Балашов С.В., Веденькин Н.Н. и др. Возрастание солнечных протонов и динамика внешнего радиационного пояса электронов во время солнечных экстремальных событий в декабре 2006 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 6. С. 751–758. 2008.
- Тверской Б.А. Перенос и ускорение заряженных частиц в магнитосфере Земли // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 5. № 5. С. 793–808. 1965.
- Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли // М.: Наука, 224 с. 1968.
- Friedel R.H.W., Reeves G.D., Obara T. Relativistic electron dynamic in the inner magnetosphere: A Review // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. № 2. P. 265–282. 2002.
- Tverskaya L.V. Dynamic of electrons in the radiation belts // AGU Monograph. № 97. P. 183–187. 1996.
- Tverskoy B.A. Main mechanisms in the formation of the Earth’s radiation belts // Rev. Geophys. V. 7. № 1, 2. P. 219–231. 1969.
- Vette J.L. The AE-8 trapped electron model environment. Greenbelt, Maryland: NSSDC; WDC-A-R&S; NASA GSFC. 138 p. 1991.