

УДК 537.591.8

МОДЕЛЬ ГАММА-ФОНА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ДО НЕСКОЛЬКИХ МэВ ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ НА БОРТУ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ ВЫСОКОШИРОТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2019 г. И. В. Архангельская^{1, *}, А. И. Архангельский^{1, 2}, А. В. Михайлова¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: irene.belousova@usa.net

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Приведены результаты анализа временного поведения фоновой скорости счета детекторов γ -излучения в энергетическом диапазоне до нескольких МэВ для детекторов на борту низкоорбитальных космических аппаратов на примере данных, зарегистрированных аппаратурой АВС-Ф. Прибор был установлен на борту КА КОРОНАС-Ф (параметры орбиты после старта: высота ~ 500 км, наклонение 82.5°). Проводилось аппроксимирование временных профилей фоновой скорости счета на экваториальных участках орбиты полиномами IV или V степени. Показано, что построенные аппроксимирующие полиномы применимы и для приборов на КА с наклоном орбиты до 38° при учете изменения Кр-индекса в предшествующие 12–24 ч. В частности, при моделировании данных RHESI (начальная высота орбиты ~ 600 км, наклонение 38°) за 27.10.2003 получено среднее значение $1017 \pm 8 \text{ с}^{-1}$ для скорости счета в области геомагнитной широты $\pm 5^\circ$ в энергетическом диапазоне $E > 0.1$ МэВ (анализ данных дает величину $1094 \pm 153 \text{ с}^{-1}$).

DOI: 10.1134/S0367676519050065

ВВЕДЕНИЕ.

Принципиальная экспериментальная проблема при регистрации рентгеновского и γ -излучения приборами, установленными на космических аппаратах (КА), связана с высокой интенсивностью фона, генерируемого в приборе и вокруг него заряженными частицами. Фон для детекторов γ -излучения, установленных на борту низкоорбитальных околоземных КА, зависит от [1–3]: а) диффузного космического γ -излучения; б) атмосферного γ -излучения; в) локального фона γ -излучения и нейтронов, образованных в прямых взаимодействиях космических лучей (КЛ) с веществом детектора и КА; г) распада нуклидов, образованных во взаимодействиях КЛ и частиц радиационных поясов Земли (Earth Radiation Belts – ERB), Южно-атлантической магнитной аномалии (South Atlantic Anomaly – SAA) с веществом детектора и КА; д) стационарных событий и высыпаний электронов; е) излучения дискретных космических источников. Относительный вклад разнообразных компонент фона зависит от конструкции детектора, массы КА, а также суще-

ственно различается в разных областях энергетического спектра и в общем случае является функцией времени и положения КА [2, 3]. Компоненты а и е не зависят от положения КА в магнитном поле Земли, но вклад остальных величин определяется потоком космических лучей, геомагнитной жесткостью обрезания (компоненты б–д), протонной дозой, накопленной при прохождении КА областей ERB, а также величиной промежутка времени от момента пролета данных областей до проведения измерений (компонент г). Для КА на низких околоземных орбитах существенно и альбедное излучение атмосферы.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ

Аппаратура АВС-Ф (Амплитудно-Временная спектрометрия Солнца) [4, 5] представляет собой систему электроники для бортовой обработки данных со сцинтилляционного детектора на основе кристалла CsI (Tl) СОИГ-Д (СОлнечные Нейтроны и Гамма-кванты) [6], разработанного НИИЯФ МГУ; и прибора РПС-1 (Рентгеновский

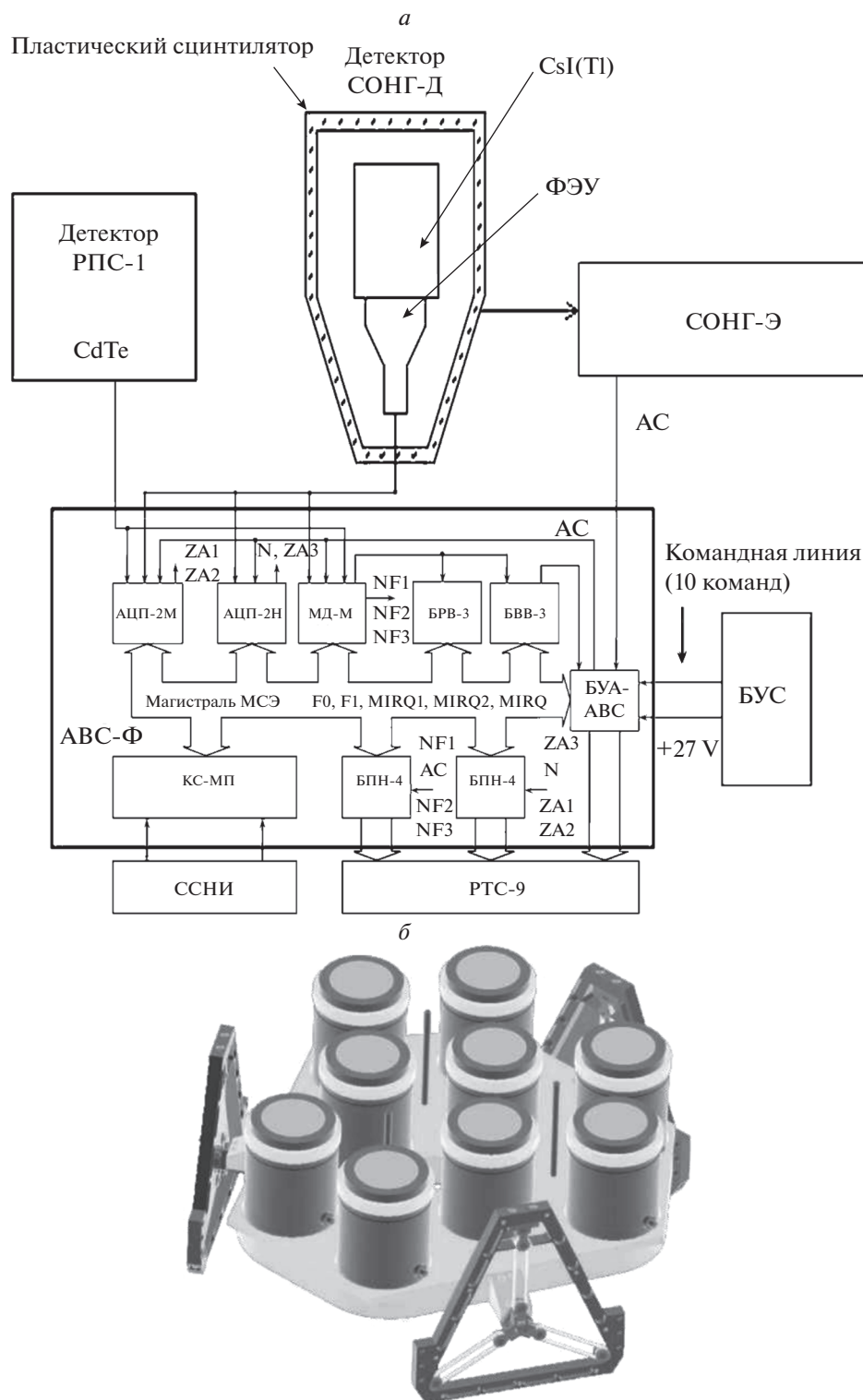


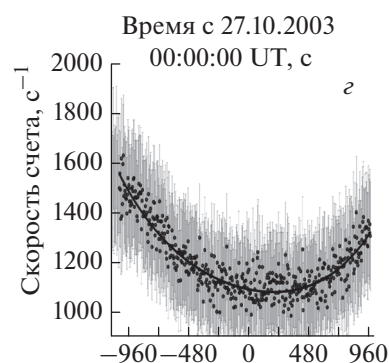
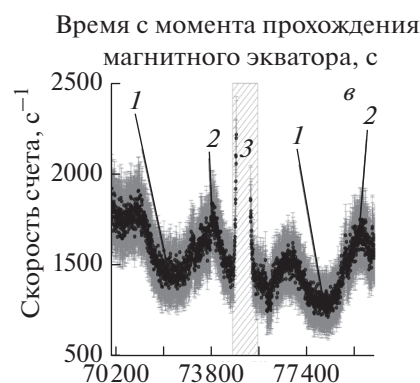
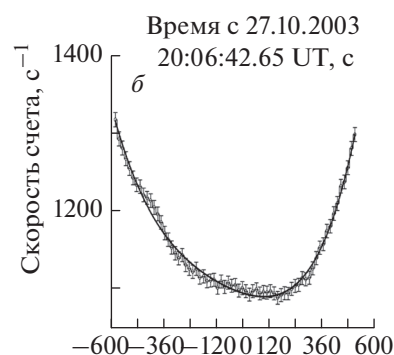
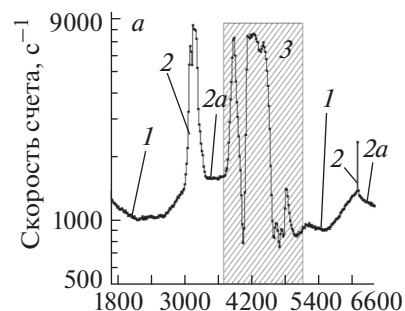
Рис. 1. Схема аппаратуры: *a* – АВС-Φ [4] (СОНГ-Д представляет собой цилиндр $\varnothing 200$ мм и высотой 100 мм, окруженный для защиты от заряженных частиц антисовпадательным пластиковым детектором, размеры РПС-1: 4.9×4.9 мм, толщина 2.5 мм); *b* – RHESI (регистрирующие элементы – охлажденные до ~ 75 К детекторы из сверхчистого (HPGe) германия (GeD) цилиндрической формы: высота 85 мм, $\varnothing 71$ мм). Диапазоны регистрации излучения на октябрь 2003 г. составили 3–30 кэВ для РПС-1; 0.1 – 17 МэВ, а также 4–90 МэВ для СОНГ-Д и 3 кэВ – 17 МэВ для RHESI.

Полупроводниковый Спектрометр) [7], созданного совместно МИФИ и ИКИ РАН на основе CdTe (см. рис. 1а). Эксперимент проводился 31.07.2001–6.12.2005 на борту КА КОРОНАС-Ф [8] и позволял изучать характеристики потоков жесткого рентгеновского и γ -излучения от Солнца, солнечных вспышек, гамма-всплесков, а также магнитосферных высыпаний частиц. Начальные параметры почти круговой орбиты составляли: высота 500 км, наклонение 82.5° .

Прибор RHESSI (The NASA Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) предназначен для изучения характеристик рентгеновского и γ -излучения солнечных вспышек [9, 10] – см. рис. 1б. Запуск КА был осуществлен 16.01.2000 на почти круговую орбиту с высотой ~ 600 км, наклонением 38° . Завершение работы КА планируется 1.10.2018.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ФОНА

Типичный временной профиль скорости счета аппаратуры АВС-Ф в низкоэнергетическом γ -диапазоне приведен на рис. 2а. Анализ данных показывает, что погрешность измерений скорости счета составляет не более 1% (табл. 1). Для построения модели, описывающей наблюдаемый фон с требуемой точностью, возможно, вместо формулировок подробных физических описаний вышеперечисленных компонент фона, представить ее в виде суммы эмпирических зависимостей, аппроксимирующих временной ход скорости счета в каждом спектральном канале. В эксперименте BATSE [11] (наклонение орбиты КА CGRO было 28° , начальная высота ~ 450 км) применялась аппроксимация периодическими функциями фоновой скорости счета в каждом спектральном канале на нескольких последовательных витках орбиты, редкие прохождения SAA учитывались при помощи активационного анализа. Для учета положения прибора в магнитном поле Земли использовалась линейная функция параметра МакИлвайна (L), а для учета направления детекторов относительно Земли и вклада наведенной активности применялись комбинация гармонических функций полярного и азимутального углов между нормалью к поверхности детектора и направлением на центр Земли и сумма экспонент, описывающих распад образовавшихся при прохождении SAA изотопов соответственно. При описании фоновых условий в эксперименте LEGRI [12] на борту КА MINISAT-01 (начальная высота орбиты ~ 600 км, наклонение 28.5°) применялась схожая модель, учитывающая только положение детектора в магнитном поле Земли (линейная функция параметра L) и распад двух наиболее активных изотопов ^{131}Te и ^{121}I . Однако в случаях большего наклонения орбиты, космический аппарат пересекает ERB и SAA несколько раз в сутки, и по-



Время с момента прохождения магнитного экватора, с

Рис. 2. Типичный временной профиль скорости счета на экваториальном участке орбиты по данным аппаратуры АВС-Ф (а) и RHESSI (в) и результаты их аппроксимации представленной моделью (панели б и г соответственно). На панелях а и в отчетливо выделяются экваториальные области (1), области ERB (2), область ERB+SAA (заштрихована и отмечена цифрой 3). Области полярных шапок выявляются только при наклонении КА более 60° – отмечены 2а на панели б.

Таблица 1. Характеристики фоновых участков, зарегистрированных аппаратурой ABC-Ф в конце октября 2003 г.

Дата	Начало, UT	Окончание, UT	Средняя скорость счета ¹⁾ при прохождении геомагнитного экватора, с ⁻¹	Kp- индекс ²⁾	$\langle Kp \rangle$	Смоделированная минимальная скорость счета, с ⁻¹
23	21:52:44	22:22:51	810 ± 7	2 2 2 2 2	2.0	820 ± 20
24	19:36:05	20:06:12	931 ± 8	2 2 2 2 4	2.4	910 ± 20
24	21:09:00	21:39:08	1043 ± 8	2 2 2 4 5	3.0	1030 ± 20
25	20:25:08	20:55:20	979 ± 8	3 3 2 2 4	2.8	990 ± 20
27	20:30:22	21:00:31	1017 ± 8	3 3 4 3 2	3.0	1030 ± 20
30	19:53:01	20:19:21	1681 ± 10	8 7 6 5 5	6.2	1690 ± 20

¹⁾ Средняя скорость счета при прохождении геомагнитного экватора в области геомагнитной широты $\pm 5^\circ$ в энергетическом диапазоне 0.1–17 МэВ. ²⁾ Последовательность Kp-индексов в интервале времени от –24 до –12 ч перед моментом прохождения геомагнитного экватора.

Таблица 2. Параметры аппроксимации полиномом 4-й степени $Y = \sum_{n=0}^4 B_n \times t^n$ временного профиля фоновой скорости счета по данным ABC-Ф и RHESSI

Параметр	Данные ABC-Ф	Данные RHESSI ¹⁾
B_0	1095.0 ± 1,4	1090 ± 5
B_1	–0.0903 ± 0.0060	–0.11 ± 0.01
B_2	$(3.6 \pm 0.3) \times 10^{-4}$	$(2.5 \pm 0.5) \times 10^{-4}$
B_3	$(5.0 \pm 0.3) \times 10^{-7}$	$(1.6 \pm 0.8) \times 10^{-7}$
B_4	$(1.3 \pm 0.3) \times 10^{-9}$	$(9 \pm 5) \times 10^{-11}$
χ^2/DOF	0.99	0.82

¹⁾ Первые 3 группы параметров совпадают в пределах интервала 3 σ . К сожалению, эффективная площадь каждого детектора прибора RHESSI существенно меньше, чем у СОИГ-Д, а суммирование данных с различных детекторов возможно, только если их коэффициенты усиления и пороги изменяются согласованно вследствие воздействия заряженных частиц при движении КА вдоль орбиты. Иначе возникают большие статистические погрешности (см. рис. 2, панели ν и ε), приводящие к затруднениям при аппроксимации (величины параметров 4 и 5 сравнимы с их погрешностями и значение $\chi^2 \sim 0.82$).

строение модели фона вышеупомянутым способом затруднительно – см., например, [5, 13]. При анализе данных спутников, орбиты которых имеют большее наклонение (наклонение КА КОРОНАС-Ф 82.5°), выделение событий возможно только в экваториальных областях и полярных шапках (см., например, [5, 14] и рис. 2а), следовательно, построение модели фона целесообразно только для этих участков. При этом для оценки фона в каждом канале используются значения скорости счета прибора, усредненные по нескольким ближайшим по времени прохождению участкам орбиты КА, имеющим близкие геомагнитные координаты. В работах [5, 13, 14] показано, что на экваториальных участках орбиты КА фон ABC-Ф в низкоэнергетическом γ -диапазоне в каждом спектральном канале может быть аппроксимирован полиномом IV или V степени. Были проанализированы фоновые загрузки ABC-Ф за 10 дней октября-ноября 2003 на экваториальных участках орбиты, на которых скорость счета в момент прохождения геомагнитного экватора не превышала 1200 с^{-1} , причем ее

минимум регистрировался в интервале геомагнитной широты КА от $+10^\circ$ до -10° . Из рассмотрения были исключены интервалы с выявленными высыпаниями и нестационарными процессами. Для остальных участков построены аппроксимирующие полиномы и промоделирована скорость счета фона γ -квантов в областях прохождения геомагнитного экватора – пример см. рис. 2б и табл. 1, 2 (min значения скорости счета вычислялись в приближении их линейной зависимости от усредненного в 5 интервалах Kp-индекса за время от –24 до –12 ч до прохождения анализируемого геомагнитного экватора). Применяя эту методику, мы провели моделирование фона для детектора RHESSI – см. табл. 2 и рис. 2в, 2г, данные были взяты из [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приводятся результаты анализа временного поведения фоновой скорости счета детекторов γ -излучения в энергетическом диапазоне до не-

скольких МэВ для детекторов на борту низкоорбитальных космических аппаратов на примере аппаратуры ABC-Ф и RHESSI (начальная высота орбиты КА была ~500 и ~600 км, наклонение 82.5° и 38° соответственно). Ранее было показано, что в случае, если эффективное выделение полезных событий возможно только на экваториальных участках орбиты КА, то для учета вклада фона достаточно построить его модель в этих областях посредством аппроксимации полиномом IV или V степени в каждом спектральном канале [5, 13, 14]. Представленная модель широко использовалась для изучения солнечных вспышек и гамма-всплесков по данным ABC-Ф — см., например, [14, 16]. По результатам анализа фоновых данных RHESS, показана применимость приведенной методики и для приборов, установленных на КА с наклонением орбиты до 38°. В частности, при моделировании данных RHESSI за 27.10.2003 получено среднее значение $1017 \pm 8 \text{ с}^{-1}$ для скорости счета в области геомагнитной широты $\pm 5^\circ$ в энергетическом диапазоне $E > 0.1 \text{ МэВ}$ (анализ данных дает величину $1094 \pm 153 \text{ с}^{-1}$ с учетом различия в эффективной площади и эффективности регистрации излучения этими приборами).

Авторы благодарят Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» за поддержку в рамках Программы повышения конкурентоспособности ведущих Российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров (Проект 5-100, контракт № 02.a03.21.0005, 27.08.2013). Авторы благодарят Часовикова Е.Н. и Мурашову О.Д. за помощь в оформлении материала статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Charalambous P.M., Dean A.J., Lewis R.A., Dipper N.A. // Nucl. Instr. Meth. 1985. V. A283. P. 533.
2. Dean A.J., Lei F., Knight P.J. // Space. Sci. Rev. 1991. V. 57. P. 109.
3. Gehrels P.M. // Nucl. Instr. Meth. 1992. V. A313. P. 513.
4. Архангельский А.И., Глянченко А.С., Котов Ю.Д. и др. // ПТЭ. 1999. № 5. С. 16.
5. Котов Ю.Д., Архангельская И.В., Архангельский А.И. и др. // Изв. РАН Сер. физ. 2002. Т. 66. № 11. С. 1666.
6. Кузнецов С.Н., Богомолов А.В., Гордеев Ю.П. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 1995. Т. 59. № 4. С. 2.
7. Панков В.М., Прохин В.Л., Хавенсон Н.Г. // Астрон. вест. 2006. Т. 40. № 4. С. 325; Pankov V.M., Prokhin V.L., Khavenson N.G. // Sol. Sys. Res. 2006. V. 40. № 4. P. 314.
8. Кузнецов В.Д. // Астрон. вест. 2005. Т. 39. № 6. С. 485; Kuznetsov V.D. // Sol. Sys. Res. 2005. V. 39. № 6. P. 463.
9. Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J. et al. // Sol. Phys. 2002. V. 210. № 1–2. P. 3.
10. Smith D.M., Lin R.P., Turin P. et al. // Sol. Phys. 2002. V. 210. № 1–2. P. 33.
11. Rubin B.C., Lei F., Fishman G.J. et al. // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1996. V. 120. P. 687.
12. Sanchez F., Ballesteros F., Robert. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1999. V. B155. P. 160.
13. Arkhangel'skaja I.V., Arkhangel'skiy A.I., Lyapin A.R. et al. // Phys. Proc. 2015. V. 74. P. 281.
14. Архангельская И.В., Архангельский А.И., Глянченко А.С. и др. // Астрон. вест. 2008. Т. 42. № 4. С. 373; Arkhangel'skaja I.V., Arkhangel'skiy A.I., Glyanenko A.S. et al. // Sol. Sys. Res. 2008. V. 42. № 4. P. 351.
15. <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessidata/metadata/catalog/>.
16. Архангельская И.В., Архангельский А.И., Котов Ю.Д. и др. // Косм. иссл. 2007. Т. 45. № 3. С. 278; Arkhangel'skaja I.V., Arkhangel'skiy A.I., Kotov Yu.D. et al. // Cosmic Res. 2007. V. 45. № 3. P. 261.