

## **Численное моделирование метрологических характеристик детекторов космических излучений**

**И. А. Золотарев, Л. С. Новиков, В. И. Оседло,  
В. И. Тулупов, Н. П. Чирская**

---

Рассмотрены методы и приведены результаты математического моделирования взаимодействия космических излучений с детекторами, позволяющие повысить точность определения уровня радиационных воздействий на материалы и элементы оборудования космических аппаратов. Применение полученных результатов на стадиях проектирования и производства перспективных космических аппаратов позволит существенно увеличить их надежность и продлить срок службы в условиях воздействия космической радиации.

**Ключевые слова:** космическое излучение, полупроводниковый детектор, калибровка, отбор событий, математическое моделирование.

---

### **Введение**

Увеличение сроков активного существования космических аппаратов (КА) и широкое использование в их составе элементов, чувствительных к воздействию ионизирующих излучений, делает весьма актуальной необходимость контроля радиационных условий на орбитах КА.

На сегодняшний день для оценки радиационных условий на орбитах используют созданные на основе результатов измерений модели пространственно-энергетических распределений потоков протонов и электронов радиационных поясов Земли (РПЗ) для периодов минимума и максимума солнечной активности. Наиболее известными являются международные справочные модели AE8 и AP8, предназначенные соответственно для описания потоков электронов и протонов [1, 2]. Следует отметить, что обе эти модели построены на основании ограниченных и в значительной степени устаревших массивов экспериментальных данных 1960–1970-х годов.

Однако реальные потоки энергичных заряженных частиц РПЗ могут существенно (на порядки величин) отличаться от модельных значений. Это объясняется тем, что потоки частиц испытывают весьма значительные как долговременные (месяцы), так и краткосрочные (дни, недели) вариации, связанные с

изменениями солнечной и геомагнитной активности и не нашедшие отражения в имеющихся моделях РПЗ. Указанное справедливо и по отношению к другим, еще более нерегулярным компонентам космической радиации, таким, например, как солнечные космические лучи.

Поэтому наиболее надежным способом определения реальных радиационных условий эксплуатации КА является проведение измерений потоков частиц, воздействующих на аппарат, с помощью приборов, установленных на рассматриваемом КА, либо на аппаратах, функционирующих на близких орбитах.

Для проведения подобных измерений во многих случаях используют приборы, в которых регистрация электронов и протонов осуществляется с помощью детекторов, объединяемых в телескопические системы [3]. Такие детектирующие системы, состоящие из последовательно расположенных на одной продольной оси детекторов разных типов, широко используют в космических приборах, предназначенных для регистрации электронов и протонов РПЗ, а также частиц солнечных и галактических космических лучей.

Интерпретация показаний приборов проводится на основании лабораторных градуировок детектирующих систем. Однако получаемая при градуировках информация недостаточно полна, поскольку в лабораторных экспериментах практически невоз-

можно корректно воспроизвести энергетические и угловые распределения, характерные для потоков заряженных частиц в космическом пространстве.

При прохождении потока заряженных частиц через детекторы потери энергии отдельных частиц испытывают флуктуации, обусловленные статистической природой процесса ионизации, причем при регистрации электронов вследствие их малой массы статистические флуктуации удельных потерь энергии значительно больше, чем для протонов. Поэтому для достижения необходимой точности измерений необходимы численные методы расчетов энерговыделения в детекторах.

Цель настоящей работы — численное моделирование взаимодействия потоков электронов и протонов с детекторами, позволяющее повысить точность определения метрологических характеристик телескопических детектирующих систем.

### Методика проведения расчетов

Методику проведения расчетов рассмотрим на примере реального телескопического спектрометра протонов и электронов (СПЭ), характеристики которого рассмотрены в [4]. Основным элементом СПЭ является детекторный блок (ДБ), состоящий из нескольких полупроводниковых детекторов (ППД) различной толщины и сцинтилляционного детектора, расположенных один под другим на единой оси. Данный спектрометр позволяет разделять регистрировать потоки протонов и электронов в достаточно узких интервалах энерговыделения падающих частиц. Модель исследуемой телескопической системы показана на рис. 1.

Перед детекторами располагается коллиматор с углом раствора  $60^\circ$ . Первый ППД (D1) толщиной 0,04 мм защищен фольгой, которая имеет толщину, эквивалентную 10 мкм кремния. Второй ППД (D2) имеет толщину 0,5 мм, третьим детектором (D3) является сцинтиллятор CsI толщиной 10 мм, а четвертым детектором (D4) — вновь ППД толщиной 1 мм. Между D3 и D4 расположен фотодиод с эквивалентной толщиной 300 мкм Si, который преобразует световые вспышки в сцинтилляторе от проходящих частиц в электрические импульсы. Боковые стенки корпуса детекторного блока состоят из слоя латуни толщиной 10 мм и слоя оргстекла толщиной 5 мм.

Расчеты величин потерь энергии электронов и протонов в элементах ДБ проводились для трехмерной модели при изотропном падении электронов и протонов с помощью программного комплекса GEANT4 [5]. Полученные данные использовали для

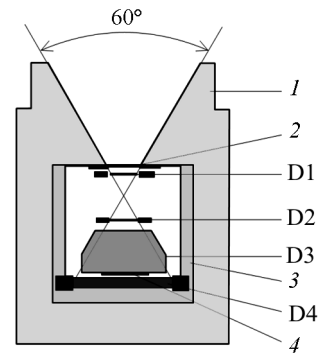


Рис. 1. Модель исследуемого детекторного блока: 1 — корпус; 2 — фольга; 3 — оргстекло; 4 — фотодиод; D1 — D4 — детекторы.

моделирования работы электроники прибора СПЭ в среде Simulink (MATLAB) [6].

При моделировании с помощью комплекса GEANT4 взаимодействия заряженных частиц с элементами телескопической системы учитывали процессы ионизации, включая образование вторичных электронов, тормозное излучение и много-

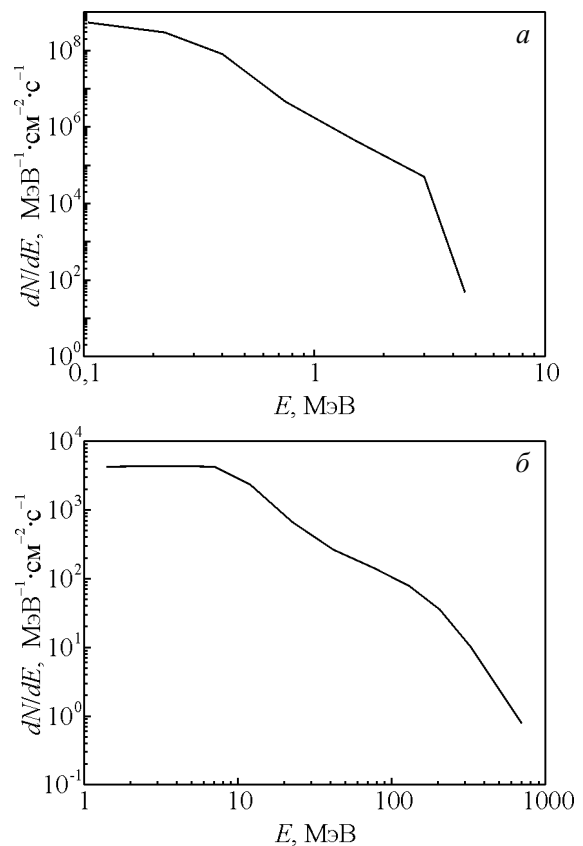


Рис. 2. Исходные дифференциальные спектры: а — электронов, б — протонов, на круговой орбите 1700 км с  $L \sim 1,4$ , использованные при расчете в GEANT4.

Таблица 1

| Энергетические интервалы измеряемых энергий электронов и протонов в СПЭ |             |            |           |           |           |            |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|
| № электронного канала                                                   | E1          | E2         | E3        | E4        | E5        | E6         |           |
| Границы интервалов, МэВ                                                 | 0,15 – 0,35 | 0,35 – 0,6 | 0,6 – 1,0 | 1,0 – 2,0 | 2,0 – 4,0 | 4,0 – 10,0 |           |
| № протонного канала                                                     | P1          | P2         | P3        | P4        | P5        | P6         | P7        |
| Границы интервалов, МэВ                                                 | 2,0 – 4,0   | 4,0 – 9,0  | 9,0 – 15  | 15 – 30   | 30 – 53   | 53 – 100   | 100 – 160 |
|                                                                         |             |            |           |           |           |            | ≥ 160     |

кратное кулоновское рассеяние электронов. Моделирование электромагнитных процессов взаимодействия проводили с использованием пакета библиотек Livermore [7]. Для учета процессов ядерных взаимодействий при прохождении протонов через телескопическую систему была использована стандартная библиотека QGSP\_BIC\_HP [8]. Расчеты потерь энергии электронов и протонов в элементах ДБ выполняли на суперкомпьютере “Ломоносов” МГУ имени М.В. Ломоносова [9].

Для проведения анализа работы прибора были использованы энергетические спектры электронов и протонов, построенные по моделям AE8 и AP8 для нескольких специально подобранных орбит, данные радиационного мониторинга на которых дают возможность предсказания радиационных условий для большого числа орбит КА [10]. На рис. 2 показаны дифференциальные спектры частиц для круговой орбиты с высотой 1700 км с наклоном 77°, имеющей значение параметра геомагнитного поля  $L \sim 1,4$ . Для каждого спектра расчет проводили с использованием  $10^8$  событий (падающих частиц), что позволило набрать достаточную статистику сигналов для верхних энергетических каналов (выше 4 МэВ для электронов и выше 100 МэВ для протонов).

### Результаты и обсуждение

В СПЭ находятся электронные логические устройства отбора, работающие на принципе совпадений и антисовпадений импульсов, которые позволяют получать энергетические распределения (зависимость потоков частиц от энергии) электронов и протонов в пространстве и во времени в нескольких энергетических интервалах. Границы энергетических интервалов были выбраны следующим образом: для электронов с энергиями 0,15 – 10,0 МэВ — шесть интервалов с приблизительно логарифмическим шагом по энергии, а для протонов с энергиями от 2 до 160 МэВ и выше — восемь энергетических интервалов (табл. 1).

Полученные расчетные данные содержат информацию об энергии исходных частиц (электронов или протонов), величинах выделенной в каждом детекторе

энергии с учетом потерь энергии вторичных частиц, угле падения первичной частицы относительно продольной оси прибора, а также информацию о том, прошла ли исходная частица через коллиматор прибора.

При изотропном распределении потока падающих на прибор частиц возможна регистрация отдельными детекторами частиц, прошедшими через корпус прибора. Так, в случае регистрации электронов возможен значительный присчет событий в D3 (сцинтиллятор) из-за регистрации тормозных

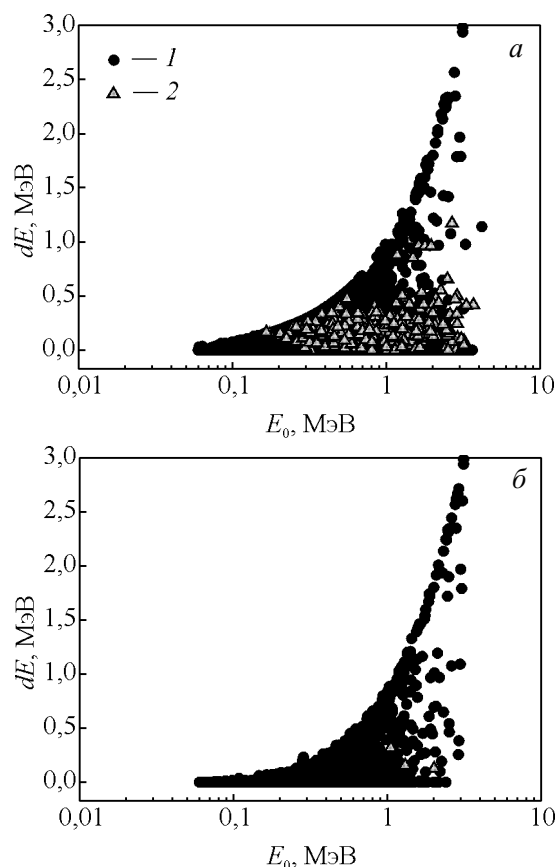


Рис. 3. Потери энергии в D3 при регистрации первичных электронов энергии  $E_0$ : а — без использования строба-1 (ненулевое энерговыделение в D2); б — с использованием строба-1. Разделены события от частиц, прошедших через коллиматор (1) и через корпус прибора (2).

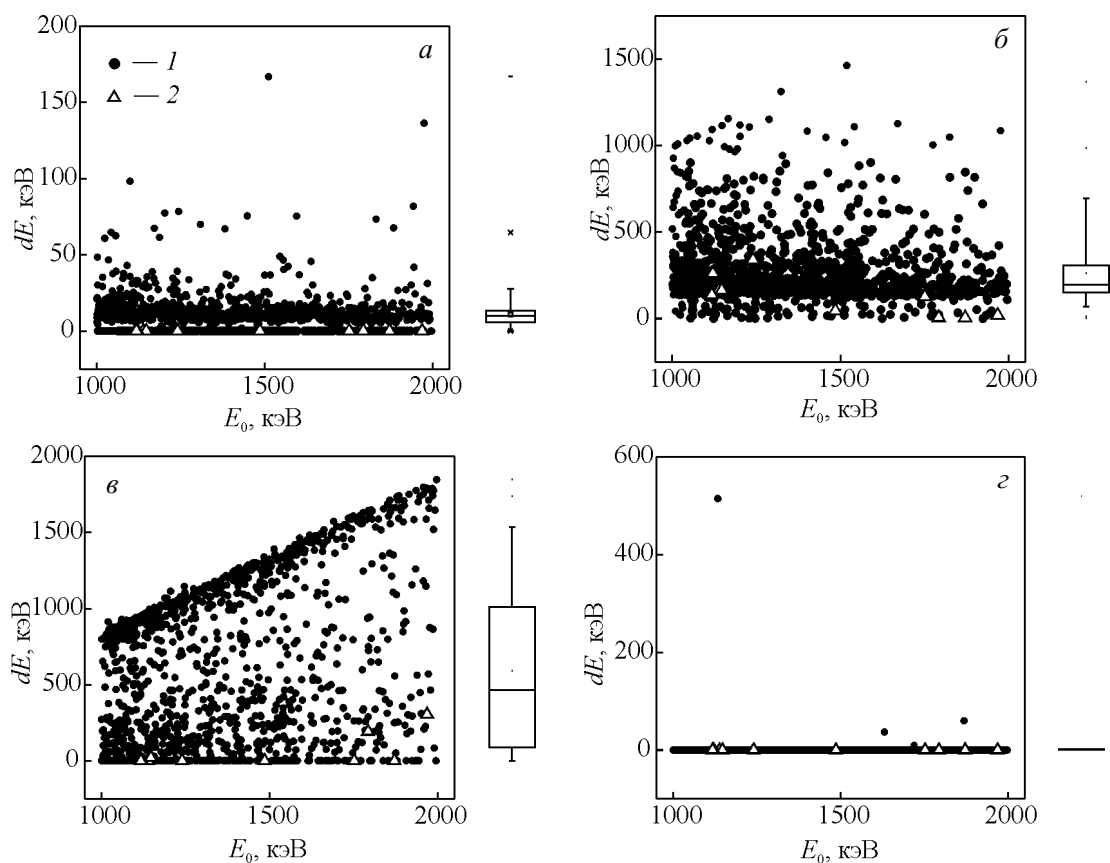


Рис. 4. Статистические распределения по энерговыделениям в детекторах прибора: *a* – 1, *б* – 2, *в* – 3, *з* – 4, для энергий первичных электронов от 1 до 2 МэВ. 1 – коллиматор, 2 – корпус.

гамма-квантов, образовавшихся в корпусе прибора (рис. 3а). Такие события следует исключить из анализа. Поэтому для дальнейшего анализа зарегистрированных электронов использованы события с ненулевым энерговыделением в D2 (обозначим этот признак выделения как строб-1), что позволяет практически полностью исключить сигналы от частиц, прошедших не через коллиматор прибора (рис. 3б).

Этот же принцип использован и для протонов. Однако при регистрации энергичных протонов с пробегом более толщины боковых стенок корпуса (~ 80 МэВ) возможен присчет событий за счет регистрации частиц, пришедших не через коллиматор. Для устранения этой возможности данный признак дополнен еще одним органичительным условием: обязательным энерговыделением в D4 выше нижнего порога регистрации.

Для всех выбранных энергетических интервалов электронов и протонов (табл. 1) построены статистические распределения по энерговыделениям  $dE$  в детекторах прибора. Статистика распределения энерговыделений в детекторах прибора заранее

неизвестна. В таких случаях часто используют диаграммы размаха “boxplot” [11]. Пример полученного распределения потерь энергии для электронов с энергиями в интервале от 1 до 2 МэВ представлен на рис. 4. Точками 1 на рис. 4 обозначены частицы, прошедшие через коллиматор, а точками 2 — через корпус. Справа от каждого графика с помощью диаграмм “boxplot” обозначены статистические параметры распределений для двух групп энерговыделений в детекторах — ниже и выше выбранных наименьших порогов регистрации. При таком способе описания распределения данных высота прямоугольника в диаграмме пропорциональна интервалу между первым и третьим квартилями распределения. Медиана распределения находится внутри прямоугольника, а минимум и максимум (величины в 1,5 раза меньше и больше межквартильного расстояния) изображаются в виде отрезков выше и ниже прямоугольника. Точки, находящиеся за пределами этих отрезков, считаются выбросами распределения и не учитываются при дальнейшем статистическом анализе данных.

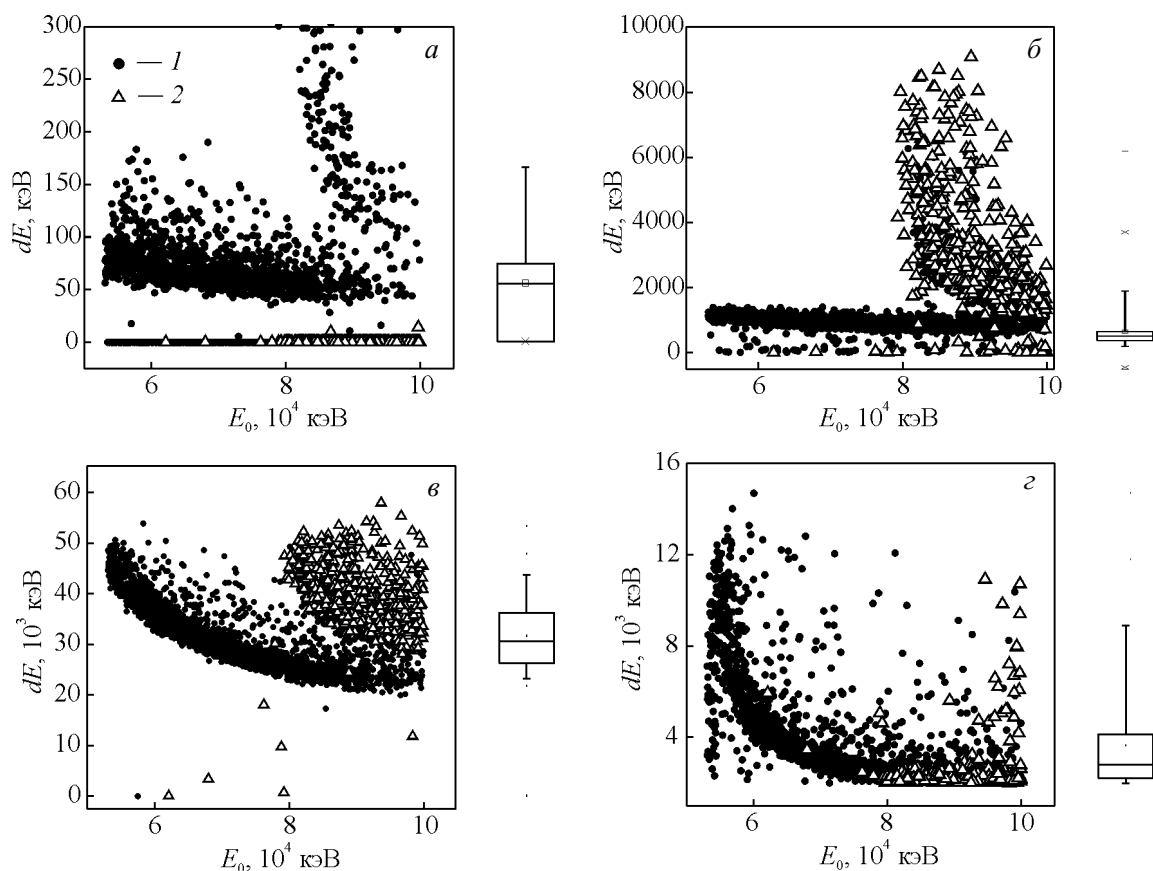


Рис. 5. Статистические распределения по энерговыделениям в детекторах прибора: *a* – 1, *б* – 2, *в* – 3, *г* – 4, для протонов с энергиями от 53 до 100 МэВ с учетом ограничительного условия в D4.

Из рис. 4 видно, что при энергиях первичных электронов от 1 до 2 МэВ в детекторе D4 сигналы отсутствуют, в детекторе D3 (сцинтиллятор) регистрируется значительная часть частиц, а в детекторе D1 все частицы теряют энергию, не превышающую нижний порог регистрации.

Пример статистических распределений по энерговыделениям в детекторах прибора для энергетического интервала первичных протонов 53 – 100 МэВ с учетом выбранного ограничительного условия в D4 приведен на рис. 5.

Как видно из рис 4 и 5, величины энерговыделений в детекторах подвержены значительным флуктуациям. На основании анализа результатов математического моделирования выполнена корректировка границ порогов, которые были предварительно выбраны для каждого детектора при условии нормального падения регистрируемых частиц.

С использованием полученных распределений сформированы критерии определения энергий первичных частиц. Эти критерии представляют собой совокупность интервалов энерговыделений первич-

ных частиц с заданной исходной энергией в отдельных детекторах прибора. Интервалы энерговыделений выбирались с применением методов описательной статистики [12]. Однако сформировать не перекрывающиеся интервалы энерговыделений, особенно для электронов, только по статистическим данным невозможно, так как величины энерговыделений частиц из разных энергетических каналов могут совпадать. Прямое применение статистических данных неизбежно приводит к ошибкам в определении первичных энергий частиц и, следовательно, к наложению каналов и искажению регистрируемых энергетических спектров.

Поэтому были рассчитаны более узкие границы энерговыделений, содержащие часть общего количества частиц, прошедших через коллиматор прибора (например, 50 % или 90 %). Нижней границей энерговыделения в первом случае является 25% перцентиль, а верхней границей — 75 % перцентиль, во втором случае имеем, соответственно, 5 % перцентиль и 95 % перцентиль. Таким образом, для каждого энергетического канала можно сформулировать свои отличительные признаки.

С использованием выбранных критериев составлены логические пороговые связи на принципе совпадений и антисовпадений импульсов детекторов для выделения энергетических интервалов электронов и протонов, то есть для определения вида частиц и их энергии.

Интерпретация информации таких приборов о величинах потоков и энергетических спектрах частиц проводится на основании эффективности регистрации частиц, определяемой как отношение числа частиц, зарегистрированных прибором, к числу частиц, попавших в прибор при заданном геометрическом факторе и установленных границах энергетических интервалов регистрации частиц.

Рассчитанная с применением критериев 5 – 95 % эффективность регистрации для протонных каналов P1 – P4 составляет 0,7 – 0,75. Получить приемлемые величины эффективности регистрации для протонных каналов P5 – P8 удается при использовании более жестких критериев — 25 – 75 %. При этом эффективность регистрации составляет около 0,4. Для электронных каналов при критериях 25 – 75 %, эффективность регистрации не превышает 0,2, при этом достоверное определение энергии электронов возможно лишь в случае, когда электроны выделяют практически всю энергию в детекторах прибора.

Из сопоставления полученных критериев выделения параметров протонов с критериями выделения параметров электронов можно сделать вывод о возможности сокращения общего количества вводимых энергетических порогов, путем использования для близких значений порогов одно усредненное значение. Такая операция незначительно повлияет на точность распознавания энергий первичных частиц, однако позволит существенно упростить логическую схему прибора.

Приведем пример восстановления первичных потоков протонов и их энергетического спектра с использованием выбранных критериев. Расчет проводили для исходного модельного спектра протонов, соответствующего максимальным потокам внутреннего РПЗ на L-оболочке 1,7 согласно модели AP8. Зарегистрированные события с применением логических схем отбора были разбиты на энергетические интервалы P1 – P8, соответствующие табл. 1, для которых были подсчитаны величины потоков частиц через коллиматор. Аналогичной процедуре разбиения на те же энергетические интервалы был подвергнут и исходный спектр. Результат сопоставления этих двух случаев приведен на рис. 6. Как следует из рис. 6, энергетический спектр протонов, восстановленный с применением методики численного моделирования взаимодействия заряженных

частиц с детекторами, с достаточно удовлетворительной точностью соответствует исходному спектру падающих на прибор частиц.

Подобная процедура восстановления первичного спектра электронов была выполнена для максимальных потоков во внешнем поясе на L-оболочке 3,2. Результат представлен на рис. 7. Точность определения потоков электронов ниже, чем для протонов, вследствие значительно больших статистических флуктуаций удельных потерь энергии электронов.

В реальных условиях космического эксперимента спектрометр подвержен одновременному воздействию частиц разных видов. Поэтому возникает опасность регистрации электронов в протонных каналах и наоборот. Для моделирования подобной

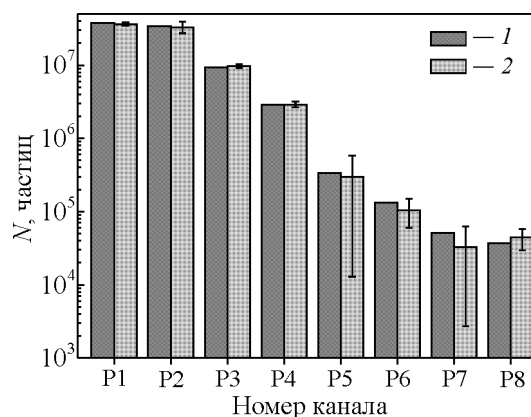


Рис. 6. Восстановление исходного спектра протонов на L оболочке 1,7 с использованием критериев отбора, полученных по данным с  $L = 1,4$ . 1 – исходные величины потоков частиц, падающих на прибор, в каналах P1 – P8, 2 – восстановленные значения по данным с детекторов с величинами ошибок.

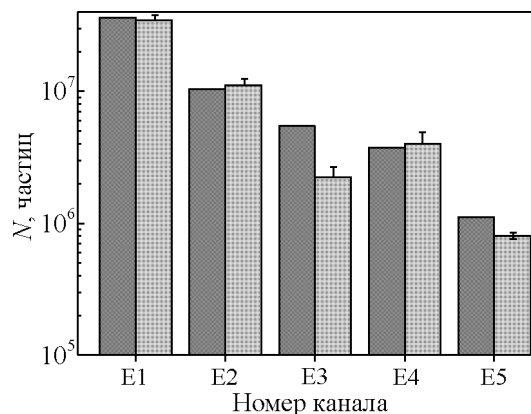


Рис. 7. Восстановление исходного спектра электронов на орбите  $L = 3,2$  с использованием критериев отбора, полученных по данным с  $L = 1,4$ . Обозначения аналогичны рис. 6.

ситуации протонные каналы с их логическими системами отбора подвергали воздействию электронов с потоками и спектрами, характерными для РПЗ. Расчеты показали полное отсутствие зарегистрированных электронов. Аналогичный вывод был сделан и при исследовании возможной регистрации протонов в электронных каналах. Таким образом, можно констатировать надежное разделение зарегистрированных потоков протонов и электронов.

## **Выводы**

1. Методика численного моделирования с применением программного комплекса GEANT4 может быть эффективно использована для исследования телескопической системы, построенной на основе детекторов разных типов и позволяющей отдельно регистрировать потоки протонов и электронов в достаточно узких интервалах энерговыведения.

2. Результаты численного моделирования процессов регистрации электронов и протонов детектирующей системой дают возможность исключить из анализа сигналы от частиц, проходящих в детекторы вне коллиматора прибора.

3. Статистические методы обработки данных численного моделирования позволяют уточнить величины порогов прибора и найти эффективность регистрации в отдельных энергетических каналах.

4. Рассмотренная методика численного моделирования рекомендуется для обработки результатов космических экспериментов с целью восстановления по полученным данным исходных энергетических спектров протонов и электронов РПЗ.

*Статья подготовлена по результатам прикладных научных исследований (уникальный идентификатор № RFMEFI60414X0127) при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России.*

## **Литература**

1. Vette J. The AE-8 trapped electron model environment. NASA report NSSDC 91-24, NASA/GSFC, Greenbelt, MD, USA, 1991.
2. Sawyer D.M., Vette J.I. AP-8 Trapped proton environment for solar maximum and solar minimum. NASA report NSSDC/WDC-A-R&S 76-06, 1976.
3. Гальперин Ю.И., Горн Л.С., Хазанов Б.И. Измерение радиации в космосе. М.: Атомиздат, 1972, 343 с.
4. Власова Н.А., Новиков Л.С., Рубинштейн И.А., Спасский А.В., Чирская Н.П. Метрологические характеристики детекторов космического излучения. Физика и химия обработки материалов, 2013, № 6, с. 32 – 39.

5. Agostinelli S., Allison J., Forti A. et al. GEANT4 – a simulation toolkit. nuclear instruments and methods in physics research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, v. 506, no. 3, pp. 250 – 303.
6. Kiran Kintali, Yongfeng Gu. Model-based design with simulink, HDL Coder, and Xilinx System Generator for DSP. URL: [http://www.mathworks.com/tagteam/74244\\_92077v00\\_Xilinx\\_WhitePaper\\_final.pdf](http://www.mathworks.com/tagteam/74244_92077v00_Xilinx_WhitePaper_final.pdf)
7. Ivanchenko V., Apostolakis J., Bagulya A., Abdouahed H.B., Black R., et al. Recent improvements in Geant4 electromagnetic physics models and interfaces. Progress in Nuclear Science and Technology, 2011, v. 2, pp. 898 – 903.
8. Geant4 Physics Reference Manual, <http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/userdocuments.shtml>
9. Воеводин В.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С. и др. Практика суперкомпьютера “Ломоносов”. Открытые системы, 2012, № 7, с. 36 – 39.
10. Панасюк М.И., Подзолко М.В., Ковтюх А.С., Брильков И.А., Власова Н.А., Калегаяев В.В., Оседло В.И., Тулупов В.И., Яшин И.В. Оперативный радиационный мониторинг в околоземном космическом пространстве на базе многоярусной группировки малых космических аппаратов. Космические исследования, 2015, т. 53, № 6, с. 461 – 468.
11. Maindonald J., Braun W.J. Data Analysis and graphics using R – an example-based approach: Third Edition, Cambridge University Press, 2010, 549 p.
12. Гецелев И.В., Тулупов В.И., Щербовский Б.Я. Прибор для контроля радиационной обстановки на борту космических аппаратов. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2006, № 3 – 4, с. 89 – 91.
13. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2012 RC Team, ISBN 3-900051-07-0. Available online at <http://www.R-project.org/>.

## **References**

1. Vette J. The AE-8 trapped electron model environment. NASA report NSSDC 91-24, NASA/GSFC, Greenbelt, MD, USA, 1991.
2. Sawyer D.M., Vette J.I. AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum. NASA report NSSDC/WDC-A-R&S 76-06, 1976.
3. Galperin Yu.I., Gorn L.S., Khazanov B.I. *Izmerenie radiacii v kosmose* [Measurement of radiation in space]. Moscow, Atomizdat Publ., 1972, 343 p.
4. Vlasova N.A., Novikov L.S., Rubinshtein I.A., Spassky A.V., Chirskaya N.P. Metrologicheskie kharakteristiki detektorov kosmicheskogo izlocheniia [Metrological performance of the cosmic radiation detectors]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment* (in Russ), 2013, no. 6, pp. 32 – 39.

5. Agostinelli S., Allison J., Forti A. et al. GEANT4 — A simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, vol. 506, no. 3, pp. 250 – 303.
6. Kintali Kiran, Yongfeng Gu. Model-based design with simulink, HDL coder, and xilinx system generator for DSP. URL: [http://www.mathworks.com/tagteam/74244\\_92077v00\\_Xilinx\\_WhitePaper\\_final.pdf](http://www.mathworks.com/tagteam/74244_92077v00_Xilinx_WhitePaper_final.pdf)
7. Ivanchenko V., Apostolakis J., Bagulya A., Abdelouahed H.B., Black R., et al. Recent improvements in Geant4 electromagnetic physics models and interfaces. Progress in Nuclear Science and Technology, 2011, vol. 2, pp. 898 – 903.
8. Geant4 physics reference manual, <http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/userdocuments.shtml>
9. Sadovnichy V., Tikhonravov A., Voevodin V.I., Opanasenko V. “Lomonosov”: Supercomputing at Moscow State University. In Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale (Chapman & Hall/CRC Computational Science), Boca Raton, USA, CRC Press, 2013, pp. 283 – 307.
10. Panasyuk M.I., Podzolko M.V., Kovtyukh A.S., Bril'kov I.A., Vlasova N.A., Kalegaev V.V., Osedlo V.I., Tulupov V.I., Yashin I.V. Operational radiation monitoring in near-Earth space based on the system of multiple small satellites, Cosmic Research, 2015, vol. 53, no. 6, pp. 423 – 429.
11. Maindonald J., Braun W.J. Data analysis and graphics using R – an example-based approach, third edition, Cambridge University Press, 2010, 549 p.
12. Getzelev I.V., Tulupov V.I., Schepbovskii B.Ya. Pribor dlya kontrolya radiacionnoi obstanovki na bortu kosmicheskikh apparatov [The device for monitoring of radiation situation on board of spacecraft], *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seria: Fizika radiatsionnogo vozdeistvia na radioelektronnuju apparaturu — Questions of atomic science and technics. Series: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment*, 2006, no. 3 – 4, pp. 89 – 91.
13. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2012 RC Team, ISBN 3-900051-07-0. Available online at <http://www.R-project.org/>.

*Статья поступила в редакцию 6.06.2016 г.*

**Золотарев Иван Анатольевич** — НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ (119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2), младший научный сотрудник, специалист в области космической физики.

**Новиков Лев Симонович** — НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ (119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2), доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, специалист в области физики плазмы и космического материаловедения. E-mail: [novikov@sinp.msu.ru](mailto:novikov@sinp.msu.ru).

**Оседло Владислав Ильич** — НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ (119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2), кандидат физико-математических наук, заместитель директора, специалист в области космической физики и физики высоких энергий.

**Тулупов Владимир Иванович** — НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ (119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области космической физики и разработки приборов для космофизических исследований.

**Чирская Наталья Павловна** — НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ (119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2), кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, специалист в области космической физики и космического материаловедения.



## **Numerical simulation of metrological characteristics of cosmic radiation detectors**

**I. A. Zolotarev, L. S. Novikov, V. I. Osedlo, V. I. Tulupov, N. P. Chirskaya**

In this paper we describe the methods and results of mathematical modeling of the interaction of cosmic rays with the detectors. This increased the accuracy of determining level of radiation impacts on materials and components of spacecraft. Application of the obtained results in the design and production of advanced spacecraft will significantly increase the reliability and extend the service time under the cosmic radiation exposure.

**Key words:** cosmic rays, semiconductor detector, calibration, event selection, mathematical modeling.

---

**Zolotarev Ivan** — *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University(1(2), Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, RF), junior researcher, Division of cosmic rays, specialist in cosmic physics.*

**Novikov Lev** — *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University (1(2), Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, RF), Dr Sci (Physics and Mathematics), professor, chief researcher in Division of cosmic rays, specialist in physics of plasma and space material science.*

**Osedlo Vladislav** — *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, PhD (Physics and Mathematics), deputy Director, specialist in cosmic physics and high energy physics.*

**Tulupov Vladimir** — *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University (1(2), Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, RF), PhD (Physics and Mathematics), leading researcher, specialist in cosmic physics and in the development of instruments for cosmophysical researches.*

**Chirskaya Nalatia** — *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University (1(2), Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, RF), PhD (Physics and Mathematics), research assistant, specialist in cosmic physics and space material science.*