

УДК 621.396.6.19.3:629.783

© Анашин В.С., Протопопов Г.А.
Anashin V.S., Protopopov G.A.**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЕТА ДОЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА
ЗА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ЗАЩИТОЙ В ОБЪЕМЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА****THE SOFTWARE SYSTEM FOR OUTER SPACE IONIZING RADIATION DOSE
EXPOSURE CALCULATION BEHIND THE OPTIONAL SHIELDING
IN A SPACECRAFT VOLUME**

***Аннотация.** В статье описан программный комплекс (ПК), предназначенный для расчета дозового воздействия ионизирующих излучений космического пространства (ИИ КП) за произвольной защитой в объеме космического аппарата (КА), разработанный с целью ликвидации недостатков, присущих существующим программам-аналогам, и обеспечивающим: более точное моделирование геометрии реальных объектов, функционирующих в КП на произвольной орбите; одновременный учет воздействия как протонов, так и электронов, моделирование материалов любого химического состава, в том числе слоистых материалов. Отличительной особенностью ПК является простой в использовании диалоговый интерфейс и удобная для пользователя форма выходных данных.*

***Annotation:** "DSG-d" software system for outer space ionizing radiation dose exposure calculation behind the optional shielding in a spacecraft volume is presented. Developed software has the following advantages over known analogues: more accurate simulation of real object geometry, simultaneous calculation of protons and electrons exposure, simulation of materials with any chemical composition, including flaky materials. The software has easy to use dialog interface and allows to get output data in convenient format.*

***Ключевые слова.** Ионизирующее излучение, космическое пространство, дозовое воздействие, космический аппарат, слоистый материал, экранирование.*

***Key words.** Ionizing radiation, outer space, dose exposure, spacecraft, flaky material, shielding.*

Введение

Как известно [1], в настоящее время стоит задача обеспечения длительных (10–15 и более лет) сроков активного существования (САС) космических аппаратов (КА). Среди многочисленных факторов, влияющих на функционирование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) при ее эксплуатации, особое значение имеет воздействие полей ионизирующих излучений (ИИ) космического пространства (КП). В околоземном КП можно выделить следующие основные естественные источники ИИ КП – электроны и протоны естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), протоны и ядра химиче-

ских элементов галактических космических лучей (ГКЛ), протоны и ионы химических элементов солнечных космических лучей (СКЛ) [2,3,4]. Основные эффекты воздействия ИИ на РЭА – дозовые эффекты, приводящие к параметрическим отказам РЭА вследствие деградации характеристик интегральных схем (ИС) по мере накопления дозы ИИ, и одиночные эффекты (ОЭ), приводящие к сбоям и отказам ИС от воздействия отдельных высокоэнергетических ядерных частиц, причем на ДЭ и ОЭ приходится до 50% всех отказов РЭА КА [5].

Поля ИИ КП на орбите функционирования КА и непосредственно в точке расположения полупроводникового прибора могут существенно отличаться вслед-

Анашин Василий Сергеевич – кандидат технических наук, заместитель генерального директора – начальник научно-производственного комплекса, заместитель главного конструктора ФГУП НИИ космического приборостроения, тел. (495) 673-99-26.

Протопопов Григорий Александрович – инженер-исследователь ФГУП НИИ космического приборостроения, тел. (495) 673-18-94.

Anashin Vasily Sergeevich – the candidate of technical sciences, the assistant to general director – the chief of research-and-production complex, the assistant to the main designer of FSUE SRI of Space Device Engineering, tel.(495)673-99-26.

Protopopov Grigoriy Alexandrovich – research-engineer of FSUE SRI of Space Device Engineering, tel. (495) 673-18-94.

ствии взаимодействия ИИ КП с элементами конструкции и РЭА с конструкционной защитой электронной компонентной базы (ЭКБ) (стенки прибора, дополнительные защитные экраны и т.п., например, локальным экраном). Наличие постоянно совершенствующихся моделей потоков частиц КП, моделей прохождения частиц за экраны и использование компьютерной техники дает возможность прогнозирования полей ИИ КП на КА. Такие компьютерные программы, являясь составной частью информационных методов обеспечения стойкости РЭА к ИИ КП и повышения САС КА [6,7,8,9], существенно сокращают временные затраты при разработке космической техники с учетом уровней воздействия ИИ КП на КА в части ДЭ и ОЭ, в том числе на расчет локальных полей ИИ КП внутри объема КА, задание технических требований к РЭА и электронной компонентной базе (ЭКБ), предварительный выбор ЭКБ для комплектации РЭА КА, оценку достаточности конструктивных мер по защите РЭА от ИИ КП.

Существует несколько программ и пакетов для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество: GEANT4 [10], MCNPX [11] – пакеты программ для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло; SRIM [12,13,14] - программа для расчета удельных потерь энергии протонов и области рассеяния ионов в веществе; SHIELDOSE [15,16,17,18] - программа для вычисления дозы за защитой в КП; CREME96 [19,20,21] - программа для создания численных моделей ИИ на околоземных орбитах и расчета характеристик ДЭ и ОЭ (дозы и частоты сбоев); COSRAD [22] – программа для прогнозирования полей ИИ КП и характеристик ДЭ и ОЭ (спектров частиц, дозы, частоты сбоев), которые ожидаются на борту КА во время долговременного полета (более 1 года и до 20 лет) на околоземных орбитах.

Перечисленные выше программные средства имеют свободный доступ (кроме пакета программ MCNPX) и позволяют решать задачи прогнозирования полей ИИ КП на КА, но имеют ряд недостатков. Пакет программ GEANT4 имеет большой объем информации по структуре пакета и способам его применения, модифицирование существующего языкового кода затруднительно. Пакет программ MCNPX имеет ограниченный доступ. Программа SRIM проводит расчет только удельных потерь энергии и пробега первичных частиц, причем их тип – только ионы. В программе отсутствует возможность падения первичных частиц под углом, и возможная геометрия защиты - только полубесконечная плоскость. Программы SHIELDOSE, CREME96 и COSRAD используют в качестве материала защиты только алюми-

ний и имеют очень ограниченный выбор геометрии защиты: SHIELDOSE - полубесконечная плоскость, плоская пластина или центр сферы, CREME96 - полубесконечная плоскость или центр сферы, COSRAD – только центр сферы. Ни одна программа не имеет возможности моделировать слоистую структуру материала защиты.

Анализируя характеристики существующих программ, можно сделать вывод, что существует потребность создания нового программного комплекса (ПК) - аналога рассмотренных программ, который лишен указанных выше недостатков и удовлетворяет следующим техническим требованиям: расчет накопленной дозы отдельно для протонов ЕРПЗ, СКЛ, ГЛЛ, электронов ЕРПЗ и при их суммарном воздействии, изотропный спектр первичных частиц, геометрия объекта расчета приближена к геометрии реальных объектов, любой материал защиты (сплав, слоистые покрытия), удобный и интуитивно понятный интерфейс пользователя.

1. Функциональные параметры программного комплекса

ПК "DSG-d" предназначен для расчета накопленной дозы от протонов ЕРПЗ, СКЛ, ГЛЛ, электронов ЕРПЗ и при их суммарном воздействии за защитой, при этом ввод входных данных осуществляется в диалоговом режиме, а результатом является текстовый файл.

На практике рассчитываются поля ИИ в объеме полупроводника (кристалла) микросхемы, который в общем случае защищен корпусом микросхемы и локальным экраном. Корпус прибора, в состав которого входит микросхема, обладает защитными свойствами. Обшивка КА, конструктивные элементы систем, окружающих прибор, также изменяют поля ИИ КП. В ПК моделирование реального объекта происходит следующим образом (рис. 1).

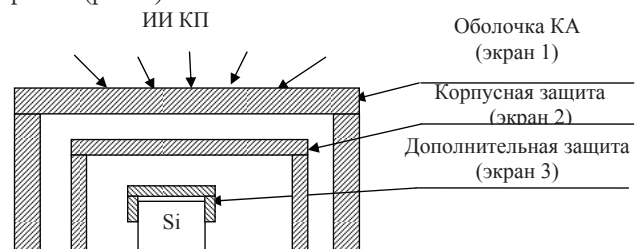


Рис. 1. Схема рассчитываемого в ПК "DSG-d" объекта

Корпусная защита (экран 2 на рис. 1) и дополнительная защита (экран 3 на рис. 1) моделируются в виде ящика ("box") без дна с произвольными габаритными размерами и толщиной стенок. Оболочка КА (экран 1 на рис. 1) моделируется в виде ящика со стенками на расстоянии 1 мм от экрана 2 с произвольной толщиной стенок.

Микросхема в ПК моделируется пластиной кремния толщиной 4 мкм, которая по габаритам полностью заполняет пространство за экраном 3. В случае отсутствия экрана 3 пластина кремния имеет размеры 10 x 10 x 0,004 мм. Форму КА и компоновку оборудования внутри КА можно достаточно корректно учесть, задавая определенное значение толщины стенок оболочки КА (экран 1), компоновку элементов внутри прибора можно учесть значением толщины корпусной защиты (экран 2), корпус микросхемы – значением толщины дополнительной защиты (экран 3).

2. Описание логической структуры программного комплекса

ПК "DSG-d" состоит из набора подпрограмм и имеет логическую структуру, приведенную на рис. 2.

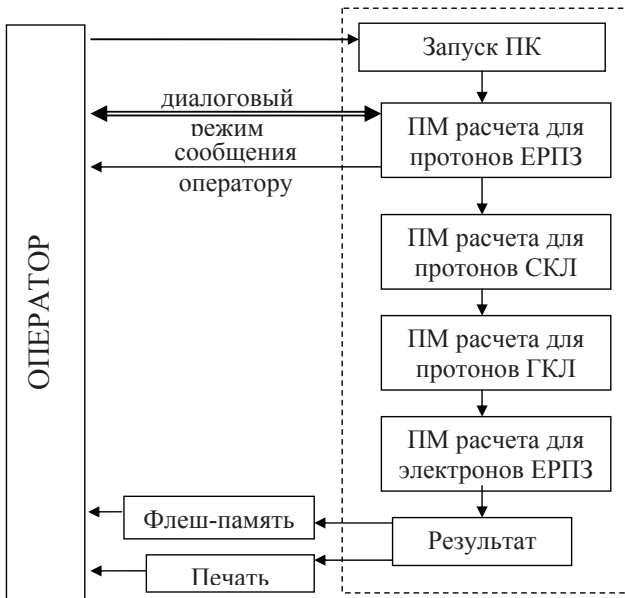


Рис. 2. Логическая структура ПК "DSG-d"

ПК включает в себя четыре основных программных модуля (ПМ), которые в ходе работы ПК выполняются последовательно: 1-й модуль расчета для протонов ЕРПЗ, 2-й модуль расчета для протонов СКЛ, 3-й модуль расчета для протонов ГКЛ и 4-й модуль расчета для электронов ЕРПЗ. Каждый модуль состоит из блока инициализации, блока расчета и блока обработки данных (рис. 3).

В блоке инициализации 1-го модуля осуществляется ввод входных данных, их обработка, запись исходных спектров в отдельные файлы и запись исходного спектра протонов ЕРПЗ в рабочий файл, сохранение параметров расчета в файлы-параметры и запись входных данных в результирующий файл. В блоках инициализации модулей 2, 3 и 4 осуществляется только запись исходных спектров протонов СКЛ, ГКЛ или электронов

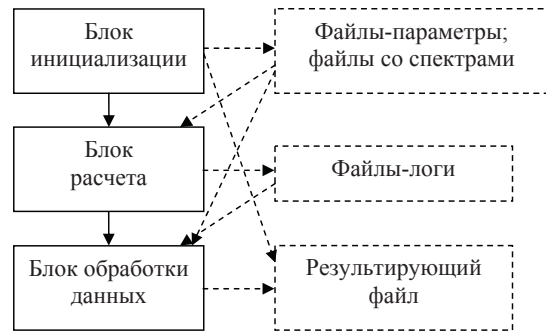


Рис. 3. Структура каждого программного модуля в ПК "DSG-d"

ЕРПЗ соответственно в рабочий файл.

В блоке расчета осуществляется моделирование объекта расчета и взаимодействия частиц с ним. Результаты моделирования сохраняются в файлах-логах.

В блоке обработки данных проводится обработка полученных в результате расчета данных, считываемых из файлов-логов, с использованием параметров расчета и исходного спектра частиц и сохранение промежуточных результатов в отдельные файлы. Блок последнего 4-го модуля сохраняет результаты расчета в результирующий файл.

В блоке расчета используется пакет программ, разработанный членами Лаборатории Geant 4. Данный блок имеет общепринятую для программ на языке C++ структуру: имеются заголовочные файлы, файлы-источники, основной файл с функцией main(), управляющий файл и make-файл проекта. Основные функции данного блока: формирование первичных частиц, формирование объекта расчета и расчет данных. Взаимодействие блока расчета, использующий пакет программ Geant 4, с ПК осуществляется с помощью данных, считываемых из файлов-параметров, файла со спектром первичных частиц и файлов-логов. Таким образом, формирование первичных частиц, объекта расчета и расчет данных осуществляется с помощью инструментов пакета Geant 4, а параметры первичных частиц, объекта расчета считываются из файлов-параметров, сформированных в подпрограммах блоков инициализации. Рассчитанные данные в блоке расчета с помощью специальных алгоритмов записываются в файлы-логи. Эти записанные данные считываются из файлов-логов на этапе обработки данных.

Каждая подпрограмма запускается последовательно друг за другом автоматически файлом-сценарием, который запускается кликом на иконку "DSG-d". При случайном повторном запуске ПК, когда он уже работает, на экран выводится сообщение «Блок GEANT4 в данный момент используется. Закройте диалоговое окно». Оператору следует закрыть диалоговое окно и дождаться окончания работы ПК. Признаком окончания работы ПК – автома-

тическое открытие текстовых файлов с выходными данными. В случае отсутствия исходных спектров для протонов ЕРПЗ, СКЛ, ГКЛ или электронов ЕРПЗ, расчет в соответствующем модуле не проводится, в результирующий файл записывается нулевое значение. Результирующий текстовый файл автоматически открывается файлом-сценарием.

3. Описание алгоритмов работы программного комплекса

В качестве входных данных используются дифференциальные или интегральные спектры частиц за время функционирования КА на данной орбите. Нахождение группового спектра частиц по исходному дифференциальному спектру осуществляется по формуле

$$\Delta F_i = 0,5 \cdot (f_i + f_{i+1}) \cdot (E_{i+1} - E_i), \quad (1)$$

где f_i – дифференциальный поток частиц при данной энергии E_i (в единицах МэВ) из исходного дифференциального спектра частиц (в единицах $1/\text{см}^2/\text{МэВ}$);

ΔF_i – групповой поток частиц, i пробегает значения от 0 до $N-1$;

N – число точек в исходном спектре частиц.

Значение ΔF_N вычисляется по формуле (1) при $F_{N+1}=1,26 \cdot E_N$ (следующее значение энергии при разбиении одной декады энергетической шкалы на 10 частей в логарифмическом масштабе; такой способ разбиения энергетической шкалы используется в программе COSRAD).

Нахождение группового спектра частиц по исходному интегральному спектру осуществляется по формуле

$$\Delta F_i = F_i - F_{i+1}, \quad (2)$$

где F_i – интегральный поток частиц при данной энергии E_i из исходного интегрального спектра частиц (в единицах $1/\text{см}^2$), i пробегает значения от 0 до $N-1$.

Значение ΔF_N вычисляется по формуле (2) при $F_{N+1} = 0$.

Основной алгоритм работы ПК "DSG-d" состоит в расчете нормированной накопленной дозы D_{norm_i} при воздействии первичных частиц с одинаковой энергией.

Расчет суммарной накопленной дозы происходит следующим образом. Подпрограмма блока обработки данных осуществляет считывание данных об исходном групповом спектре частиц, для которых ведется расчет, и рассчитанные нормированные значения накопленной дозы из файлов-логов. Суммарно накопленная доза находится по следующей формуле:

$$D = \sum_i D_{\text{norm}_i} \cdot \Delta F_i, \quad (3)$$

где D_{norm_i} – нормированные значения накопленной дозы

для каждого значения энергии первичных частиц E_i ;

ΔF_i – исходный групповой поток частиц.

В расчетах исходный спектр первичных частиц считается изотропным. Начальное положение первичных частиц задается азимутальным углом, полярным углом и расстоянием от центра пластины кремния, равным

$$\sqrt{a^2 + b^2} + 0,1 \text{ мм}; \quad a = x_2 + z_1 + 1 \text{ мм}; \quad b = h_2 + z_1 + 1 \text{ мм},$$

где x_2 – наибольший габаритный размер корпуса прибора (экрана 2) в миллиметрах;

z_1 – толщина оболочки КА (экрана 1) в миллиметрах,

h_2 – габаритный размер корпуса вдоль оси Z в миллиметрах.

Азимутальный угол равномерно распределен в пределах от 0 до 360° . Косинус полярного угла равномерно распределен от 0,1 до 1.

4. Описание входных и выходных данных

ПК "DSG-d" имеет следующие входные данные: время функционирования; спектры частиц на орбите функционирования КА; эффективная толщина экрана 1 (предварительная защита оболочки КА); материал экрана 2 (корпус прибора); геометрические размеры экрана 2; материал экрана 3 (дополнительная защита); геометрические размеры экрана 3; положение точки расчета относительно центра экрана 2.

Примеры процедуры ввода входных данных приведены на рис. 4–7.

При выборе времени функционирования вводится любое положительное число. Время задается в годах.

При выборе орбиты предлагается выбрать стандартную орбиту или орбиту, для которой спектры первичных частиц рассчитаны на программе COSRAD, или пользователь сам вводит исходные спектры первичных частиц для данной орбиты. Данные должны храниться в текстовых файлах на флешке. При вводе входных данных пользователь указывает к ним путь, имя файлов и их расширение. При вводе неверного пути, имени файла с исходным спектром частиц или его расширения на экран выводится сообщение «ошибка при открытии файла», и ПК продолжает работу без расчета для данных частиц (протонов РПЗ, СКЛ, ГКЛ или электронов ЕРПЗ).

Входные данные по исходным спектрам частиц на данной орбите организуются следующим образом: спектры частиц на стандартных орбитах, спектры для орбиты, сформированные на программе COSRAD, и спектры пользователя. Спектры группируются на чистые спектры и спектры за защитой.

Для стандартных орбит спектры представляются в виде двух столбцов чисел. В первом столбце указываются

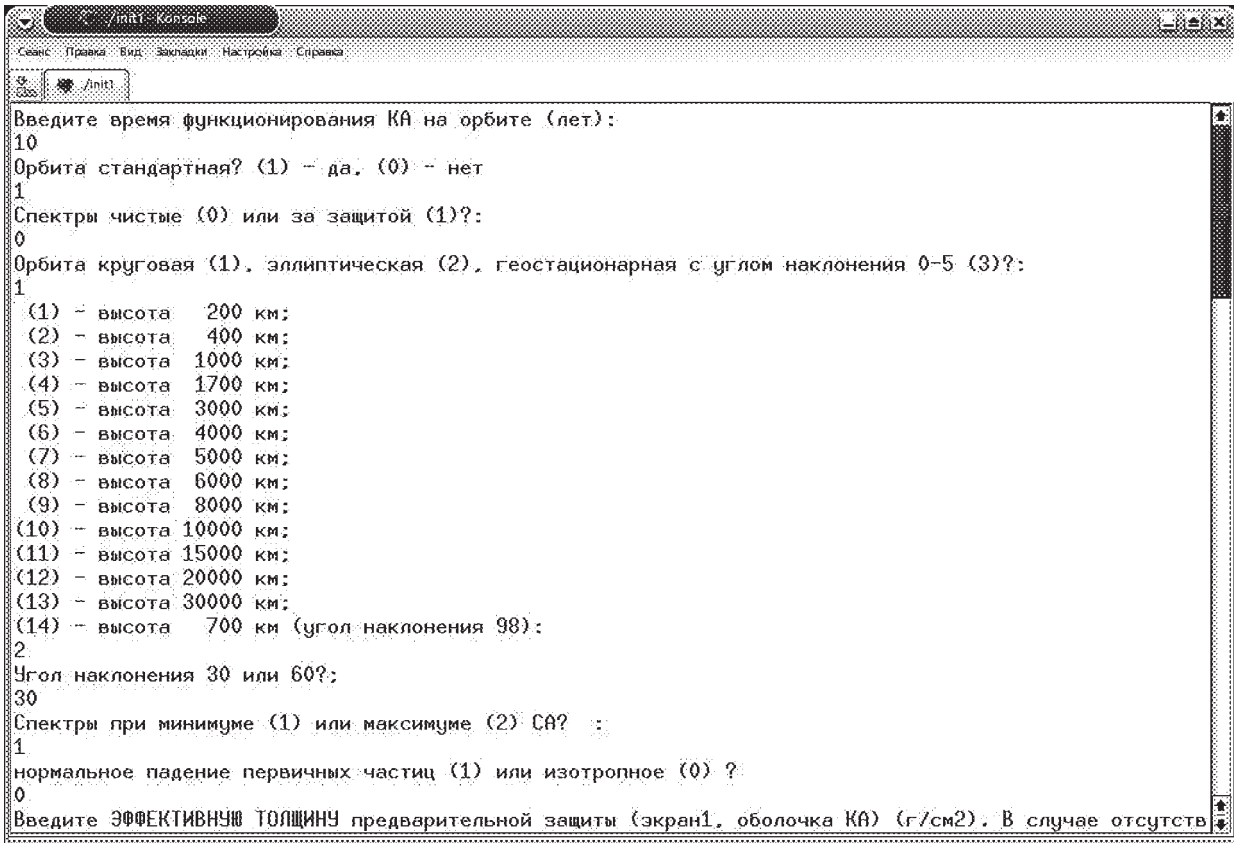


Рис. 4. Пример ввода входных данных

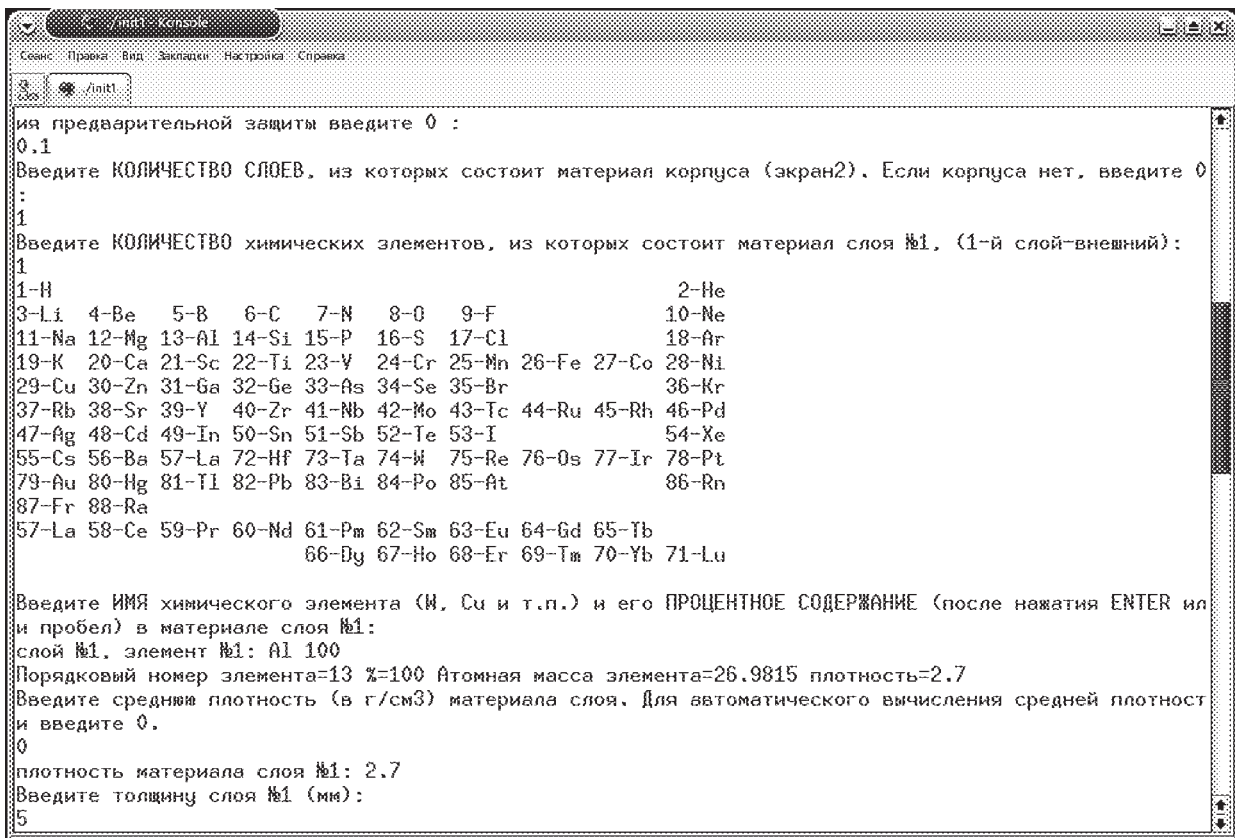


Рис. 5. Пример ввода входных данных

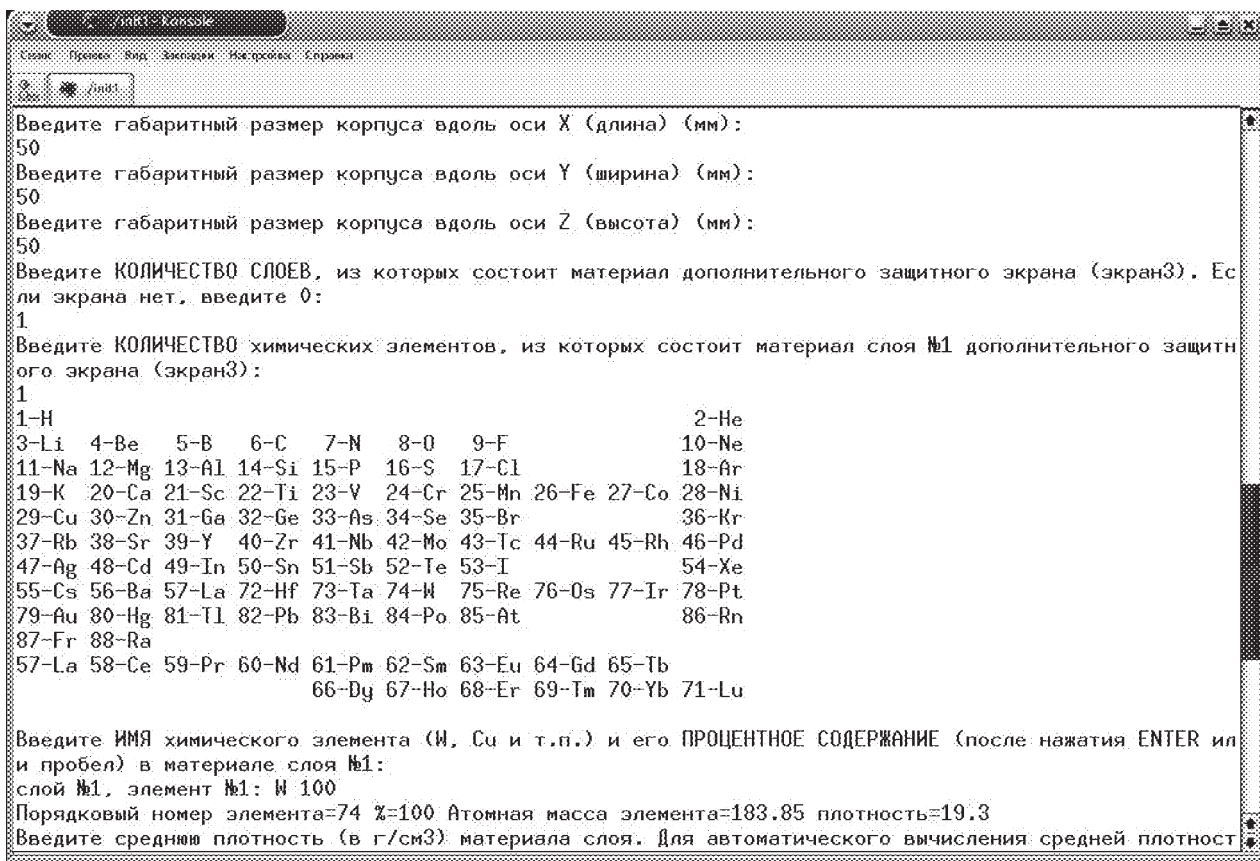


Рис. 6. Пример ввода входных данных

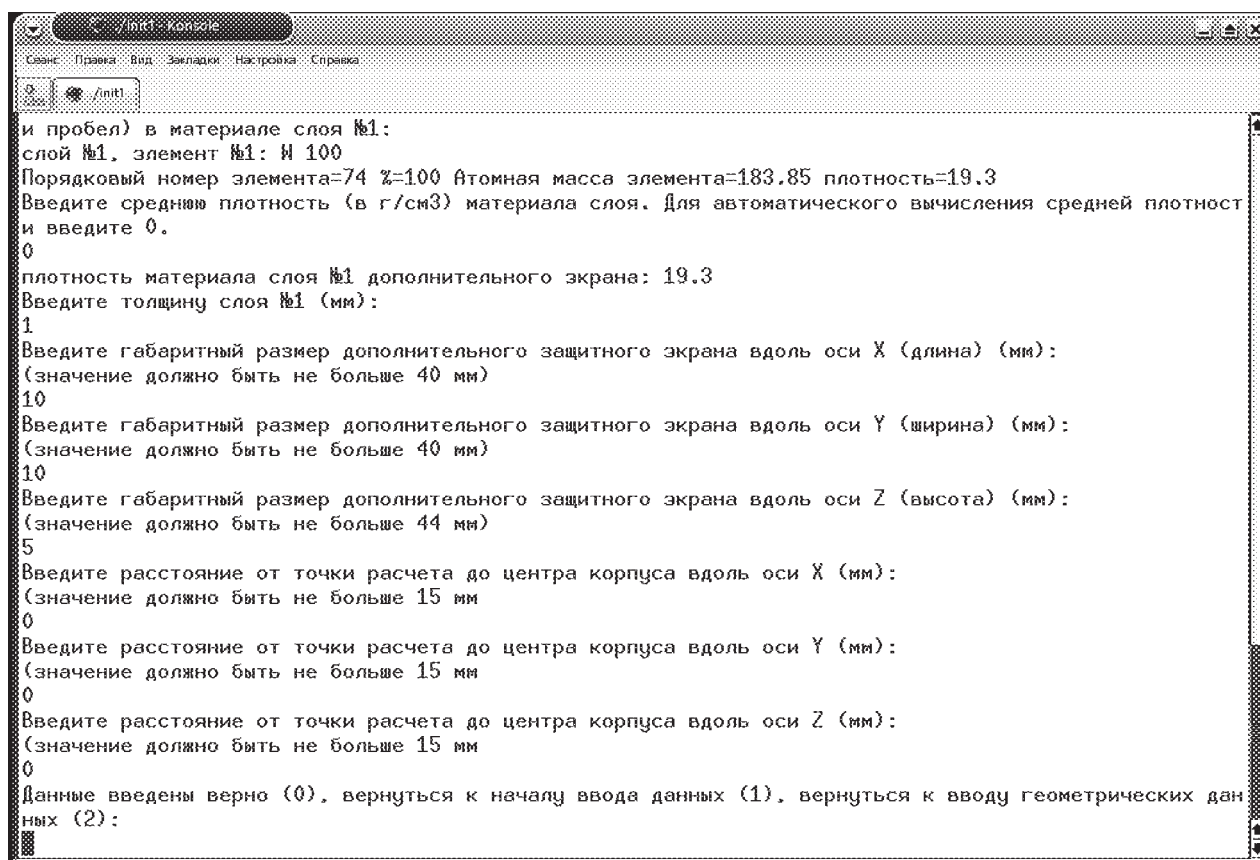


Рис. 7. Пример ввода входных данных

значения энергии первичной частицы (в единицах МэВ), во втором столбце – значения потока первичных частиц. Единица измерения потока зависит от вида спектра: для орбит с "чистыми" спектрами – $1/(\text{МэВ}\cdot\text{см}^2\cdot\text{сутки})$, для орбит за предварительной защитой – $1/(\text{МэВ}\cdot\text{см}^2\cdot\text{сутки})$.

Для орбит, спектры которых рассчитаны на программе COSRAD, файлы с исходными спектрами автоматически считываются с флеш-памяти в таком виде, каком они были сформированы программой COSRAD. Пользователь указывает номер первой строки в файле со спектром протонов РПЗ, в которой указывается значение потоков частиц. В случае, если спектры рассчитаны за предварительной защитой, пользователь также указывает номер столбца в файле со спектром протонов РПЗ за защитой, в котором указан поток частиц за требуемой защитой.

Для случая, когда пользователь использует свои спектры, в файлах со спектрами в первом столбце указываются значения энергии частицы (в единицах МэВ), во втором столбце – соответствующее значение потока частиц (в единицах $1/(\text{МэВ}\cdot\text{см}^2)$).

При выборе материала экрана 2 (корпуса прибора) и экрана 3 (дополнительного экрана) пользователь вводит количество слоев, из которых состоит материал, количество элементов, содержащихся в каждом слое материала, обозначение элемента в периодической таблице Менделеева (например, Si или W) и его процентное содержание. Плотность каждого слоя пользователь может ввести самостоятельно (в единицах $\text{г}/\text{см}^3$) или она автоматически вычисляется ПК "DSG-d", исходя из плотностей "чистых" материалов и их процентного содержания. Материал экрана 1 в расчетах моделируется чистым алюминием.

При выборе геометрических размеров (в единицах мм) экрана 3 и толщины слоев (в единицах мм) материала экрана 3 пользователь указывает габаритные размеры с учетом размеров и толщины экрана 2. При вводе этих входных данных ПК выводит на экран допустимые значения габаритных размеров, которые не должны превышать размеров пространства внутри экрана 2. При вводе больших значений геометрических размеров ПК автоматически устанавливает максимально допустимые размеры экрана 3.

При выборе точки расчета пользователь указывает расстояние между точкой расчета и центром экрана 2 вдоль осей X, Y и Z. При вводе этих входных данных ПК выводит на экран допустимые значения, при которых смещенный экран 3 не имеет общих точек в пространстве с экраном 2. При вводе значений, превышающих допустимые, ПК автоматически устанавливает максимально

допустимые значения. При отсутствии экрана 2 ПК автоматически устанавливает значения смещения (0, 0, 0).

При вводе заведомо неверных входных данных (например, сумма значений процентного содержания элементов в материале не равна 100%), на экран терминала выводится сообщение «Сумма не равна 100%!», и ПК предлагает повторить ввод данных.

Выходные данные содержат накопленную дозу в пластине кремния при воздействии протонов РПЗ, СКЛ, ГЛ, электронов РПЗ и суммарную накопленную дозу, а также описание входных данных (см. рис. 8).

5. Верификация программного комплекса

Верификация ПК "DSG-d" была проведена путем сравнительного анализа результатов расчетов на программах GEANT3, MCNPX, COSRAD и SRIM для тех же входных данных и одинаковых объектов. В расчетах использовались следующие входные данные: спектры для круговой орбиты 3000 км, угол наклона 63° ; время функционирования – 10 лет; материал защиты – Al, ВНЖ97,5 (W 97,5%; Ni 1,75%; Fe 0,75%), ВНМ3-2 (W 95%; Ni 3%; Cu 2%), W-Cu (W 75%; Cu 25%); параметры защиты: экран 2 (корпус прибора) – отсутствует; экран 3 (дополнительный) – 30 x 30 x 5 мм; толщина защиты: экран 1 – 0,01 $\text{г}/\text{см}^2$ (отсутствует); экран 2 – отсутствует; экран 3 – 1 мм; 2 мм; 3 мм.

Результаты расчета сравнения защитных свойств вольфрамовой и алюминиевой защиты на программах "DSG-d" и GEANT3 представлены в табл. 1. В таблице указано отношение накопленных доз K при использовании вольфрамовой и алюминиевой защиты (значения для вольфрамовой защиты усреднены по материалам ВНЖ97,5, ВНМ3-2 и W-Cu).

Таблица 1

| Толщина, мм | 1 | 2 | 3 | среднее |
|---------------------|------|------|------|---------|
| $K_{\text{DSG-d}}$ | 4,73 | 4,39 | 3,75 | 4,29 |
| K_{GEANT3} | 5,55 | 3,83 | 2,49 | 3,96 |

Разница средних результатов расчета, полученных на программах "DSG-d" и GEANT3, составила 8%. Среднее отклонение результатов расчета для разных толщин защиты на программах "DSG-d" и GEANT3 составило 21%.

В табл. 2 представлены результаты расчета накопленной дозы вследствие воздействия электронов КП на типовой круговой орбите 3000 км. Данные по вольфрамовой защите усреднены по типу материала защиты. Толщина защиты 1 мм.

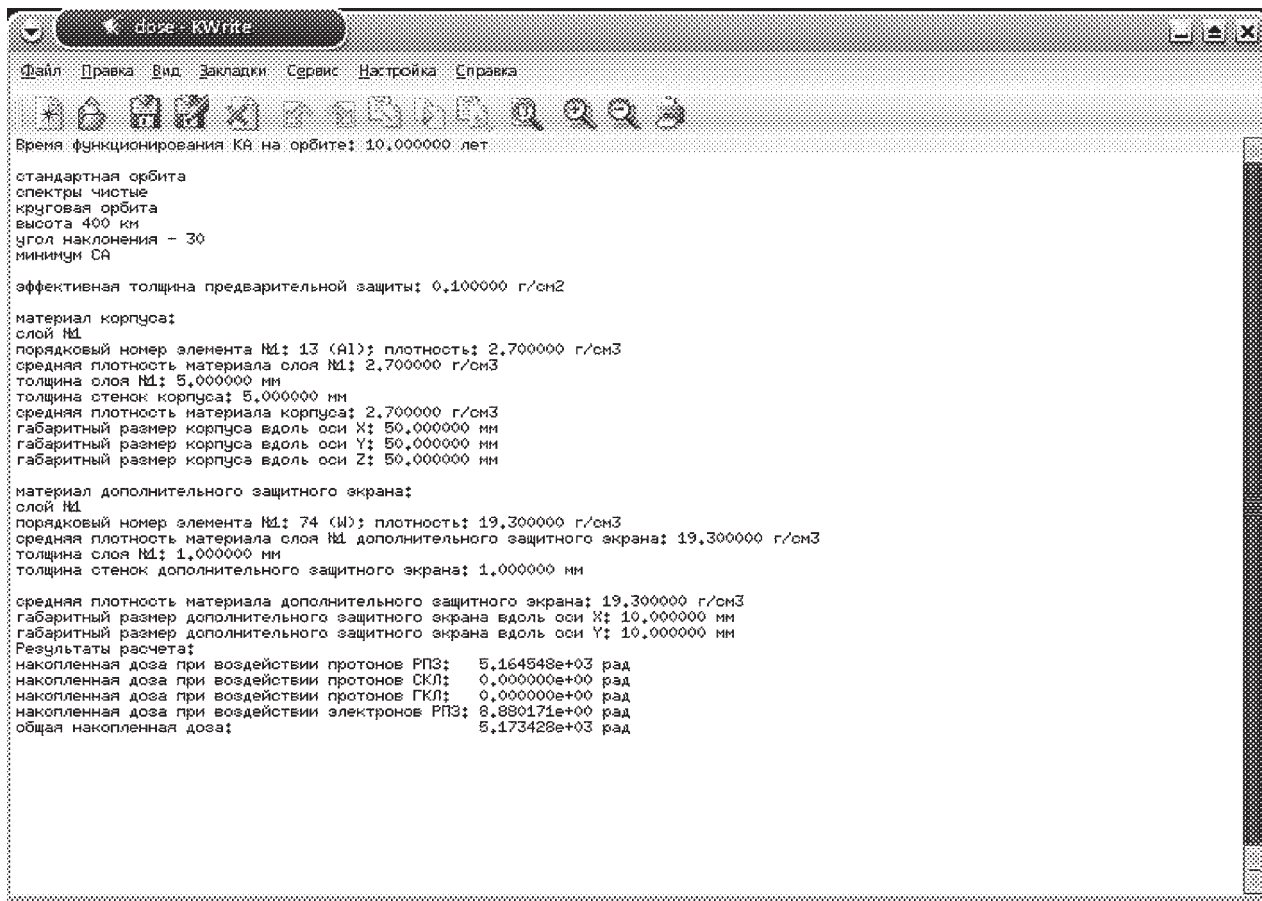


Рис. 8. Пример текстового файла с результатами расчета

Таблица 2

Результаты расчета накопленной дозы вследствие воздействия электронов КП на программах “DSG-d” и GEANT3

| Доза | W | Al |
|---------------------|-------|-------------------|
| D_{DSG-d} , у.е. | ~100 | $1,18 \cdot 10^6$ |
| D_{GEANT3} , у.е. | ~1000 | $1,40 \cdot 10^6$ |

Значения для алюминиевой защиты отличаются на 20%. Значения накопленной дозы для вольфрамовой защиты отличаются на порядок, но сами значения значительно меньше накопленных доз вследствие воздействия протонов КП ($3,64 \cdot 10^5$ у.е. для “DSG-d” и $3,71 \cdot 10^5$ у.е. для GEANT3), поэтому вклад воздействия электронов в части дозовых эффектов пренебрежимо мал как для “DSG-d”, так и для GEANT3.

Результаты расчета накопленной дозы при использовании в качестве защиты материала W-Cu на программах “DSG-d” и MCNPX представлены в табл.3.

Среднее отклонение результатов расчета для разных толщин защиты на программах “DSG-d” и MCNPX составило 14%.

В расчетах первичные протоны падают перпенди-

Таблица 3

Результаты расчета накопленной дозы на программах “DSG-d” и MCNPX

| Толщина, мм | 1 | 2 | 3 |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| D_{DSG-d} , у.е. | $3,80 \cdot 10^5$ | $1,70 \cdot 10^5$ | $1,28 \cdot 10^5$ |
| D_{MCNPX} , у.е. | $4,00 \cdot 10^5$ | $1,80 \cdot 10^5$ | $9,00 \cdot 10^4$ |

кулярно к поверхности защиты, что позволяет удовлетворить условие сферичности последней.

Результаты расчета накопленной дозы при использовании сферической защиты на программах “DSG-d” и COSRAD представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета накопленной дозы на программах “DSG-d” и COSRAD

| Толщина, мм | 1мм | 2мм | 3мм |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| D_{DSG-d} , у.е. | $3,70 \cdot 10^5$ | $2,04 \cdot 10^5$ | $1,91 \cdot 10^5$ |
| D_{COSRAD} , у.е. | $3,80 \cdot 10^5$ | $1,80 \cdot 10^5$ | $1,00 \cdot 10^5$ |

Среднее отклонение результатов расчета для разных толщин защиты на программах “DSG-d” и COSRAD составило 21%.

Для проведения расчета удельных потерь энергии протонов в веществе защиты из различных материалов и сравнения полученных результатов с результатами расчета на программах "MCNPX" и SRIM использовались следующие входные данные: спектр пользователя; время функционирования – 10 лет; материал защиты – ВНЖ97,5 (W–97,5%; Ni–1,75%; Fe–0,75%), ВНМ3-2 (W–95%; Ni–3%; Cu–2%), W–Cu (W–75%; Cu–25%); ВНЖ95 (W–95%; Ni–3,5%; Fe–1,5%); Al; W; Si; Fe; Cu; Ni; параметры защиты: экран 2 (корпус прибора) – отсутствует; экран 3 (дополнительный) – 10 x 10 x 5 мм; толщина защиты: экран 1 – 0,01 г/см² (отсутствует); экран 2 – отсутствует; экран 3 – 0,01 мм.

Первичные протоны падают перпендикулярно поверхности защиты.

Среднее отклонение результатов расчета для разных значений энергии протонов на программах "DSG-d" и MCNPX составило 4%.

В табл. 5 представлены средние отличия результатов расчета при разных значениях энергии протонов для материалов ВНЖ97,5; ВНМ3-2; W-Cu; Al; W; Ni; Fe; Cu и Ni на программах "DSG-d" и SRIM.

трии реальных объектов, функционирующих в КП на любой орбите; одновременный учет воздействия как протонов, так и электронов, моделирование материалов любого химического состава, в том числе слоистых материалов. ПК "DSG-d" также имеет простой в использовании диалоговый интерфейс и позволяет получить выходные данные в удобной форме.

Проведенная верификация ПК "DSG-d" показала совпадение результатов расчета в пределах 5-20%, что свидетельствует о том, что ПК корректно моделирует взаимодействие элементарных частиц с веществом и что результаты расчета на ПК "DSG-d" находятся в пределах допустимых погрешностей (10-50%), характерных для аналогичных программ.

Таким образом, разработанный ПК "DSG-d" имеет высокое практическое значение, существенно сокращает временные затраты при создании требований при разработке космической техники с учетом уровней воздействия ИИ КП на КА в части ДЭ и позволяет, не проводя испытаний, получать количественную оценку защитных свойств любых материалов.

Возможные направления развития ПК заключают-

Таблица 5

Средние отличия результатов расчета при разных значениях энергии протонов для различных материалов на программах "DSG-d" и MCNPX

| Материалы | ВНЖ97,5 | ВНМ3-2 | W-Cu | Al | W | Si | Fe | Cu | Ni |
|------------|---------|--------|------|----|---|----|----|----|----|
| Отличие, % | 5 | 6 | 12 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 7 |

Среднее отличие результатов расчета на программах "DSG-d" и SRIM для всех материалов составляет 5%.

Заключение

Разработанный ПК "DSG-d", предназначенный для расчета дозового воздействия ИИ КП за произвольной защитой в объеме КА, имеет следующий ряд свойств и характеристик, выгодно отличающих его от известных программ-аналогов: более точное моделирование геометрии реальных объектов, функционирующих в КП на любой орбите; одновременный учет воздействия как протонов, так и электронов, моделирование материалов любого химического состава, в том числе слоистых материалов. ПК "DSG-d" также имеет простой в использовании диалоговый интерфейс и позволяет получить выходные данные в удобной форме.

Проведенная верификация ПК "DSG-d" показала совпадение результатов расчета в пределах 5-20%, что свидетельствует о том, что ПК корректно моделирует взаимодействие элементарных частиц с веществом и что результаты расчета на ПК "DSG-d" находятся в пределах допустимых погрешностей (10-50%), характерных для аналогичных программ. Таким образом, разработанный ПК "DSG-d" имеет высокое практическое значение, существенно сокращает временные затраты при создании требований при разработке космической техники с учетом уровней воздействия ИИ КП на КА в части ДЭ и позволяет, не проводя испытаний, получать количественную оценку защитных свойств любых материалов. Возможные направления развития ПК заключаются в усовершенствовании диалогового интерфейса в части обработки различных нестандартных ситуаций, в усовершенствовании геометрии рассчитываемого объекта, реализации возможности задания произвольных толщин для каждой стенки корпуса прибора или дополнительной защиты, в учете влияния на изменение полей ИИ КП других приборов и конструкций внутри объема КА, в оптимизации алгоритма работы программы с целью уменьшения времени расчета.

Литература

1. <http://www.roscosmos.ru/SpaceProg.asp>.
2. "Действие космической радиации на интегральные схемы", М., "Радио и связь", Чумаков АИ, 2004.
3. Радиационные условия в космическом пространстве: Учебное пособие. Под ред. М.И. Панасюка. – М.: Библион – Русская книга, 2006.
4. "Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов". Том 16, Ред. Тома: Л.С. Новиков, М.И. Панасюк. – М.: ЗАО "ЭНЦИТЕХ", 2000.
5. H.C. Koons et al., *The impact of the space environment on space systems*, Aerospace technical Report TR-99 (1670 – 1, 1999).
6. В.С. Анашин. "Обеспечение высоких сроков активного существования радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов в рамках российско-белорусского сотрудничества". Российский космос, Спецвыпуск "Россия и Беларусь в космосе", 2008, стр. 27-29.
7. В.С. Анашин. "Проблемы обеспечения высоких сроков активного существования радиоэлектронной аппаратуры космических

аппаратов в условиях воздействия естественных ионизирующих излучений космического пространства". // Элементная база космических систем. Материалы конференции. – М.: Московское общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2008.

8. В.С. Анашин. "Развитие информационных, методологических и структурно-технологических аспектов обеспечения стойкости радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к ионизирующим излучениям космического пространства". // 6 международная конференция "Авиация и космонавтика-2007". Тезисы докладов. – М.: МАИ, 2007.

9. В.С. Анашин. "Проблемы обеспечения высоких сроков активного существования радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов в условиях воздействия ионизирующих излучений космического пространства". // Международная конференция "Перспективы использования новых технологий и научно-технических решений в ракетно-космической и авиационной промышленности" (Aerospace 2008). Тезисы докладов конференции. – М, 2008.

10. <http://cern.ch/geant4>.

11. <http://mcnp.lanl.gov/>.

12. <http://www.srim.org/>.

13. J. P. Biersack and L. Haggmark, *Nucl. Instr. and Meth.*, vol. 174, 257, 1980.

14. J. F. Ziegler, "The Stopping and Range of Ions in Matter", vol. 2 - 6, Pergamon Press, 1977-1985.

15. <http://modelweb.gsfc.nasa.gov/magnetos/sbield.html>.

16. <http://www.alexeypetrov.narod.ru/Fortran/sbieldose2.html>.

17. S.M. Seltzer, SHIELDOSE: A Computer Code for Space-Shielding Radiation Dose Calculation, National Bureau of Standards, NBS Technical Note 1116, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1980.

18. S.M. Seltzer, Electron-Bremsstrahlung, and Proton Depth-Dose Data for Space-Shielding Application, *IEEE Trans. Nuclear Sci.* NS-26, 4896, 1979.

19. <https://creme96.nrl.navy.mil/>.

20. James H. Adams, Jr. Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics (CREME), Part IV, Naval Research Laboratory Memorandum Report 5901, December 31, 1986.

21. A.J. Tylka et al. CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code, *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, 44, 2150-2160 (1997).

22. <http://cosrad.sinp.msu.ru/cgi-bin/main.pl>.

Материал поступил в редакцию 30. 04. 2009 г.