

## Математическое моделирование распределения поглощенной дозы в объектах сложной конфигурации

Н. П. Чирская,\* Л. С. Новиков,† В. В. Синолиц‡

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 05.03.2018; Подписана в печать 13.03.2018)

В работе рассмотрены возможности применения лучевых и стохастических методов к задаче расчета величин поглощенной дозы в объектах сложной конфигурации. Представлены результаты математического моделирования распределения поглощенной дозы от протонов галактических космических лучей с энергией в диапазоне  $10^1 - 10^5$  МэВ в объеме сферического водяного детектора, помещенного внутри сферического защитного экрана.

PACS: 87.53.Bn УДК: 539.12.04

Ключевые слова: поглощенная радиационная доза, метод Монте-Карло, лучевые методы, галактические космические лучи, сферический водяной детектор.

### ВВЕДЕНИЕ

Упрощенная модель космического аппарата (КА), часто используемая для расчетов дозовых нагрузок, представляет собой сферический защитный экран, внутри которого расположен детектор. Для вычисления поглощенных доз, накапливаемых биологическими объектами в космическом пространстве, в качестве детектора используется сфера, состоящая из воды. Решение такой задачи позволяет отработать методику расчета и провести оценки дозовых нагрузок в различных радиационных условиях перед переходом к более подробным моделям КА. В данной работе рассмотрены возможности применения различных методов моделирования к расчету величины поглощенной дозы от протонов галактических космических лучей (ГКЛ) с энергией в диапазоне  $10^1 - 10^5$  МэВ.

### 1. МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Для расчетов дозовых нагрузок использованы программный комплекс GEANT4 [1], основанный на методе Монте-Карло, и разработанная в НИИЯФ МГУ лучевая модель RDOSE [2]. В лучевых моделях расчет основывается на вычислении эквивалентной толщины защитного экрана для каждой расчетной точки. Для этого поверхность окружающей модель КА сферы разбивается на элементарные площадки, из которых строятся лучи в направлении выбранной расчетной точки. Далее вычисляются толщины защитных экранов по каждому лучу с учетом конфигурации пересекаемых им элементов конструкции КА и физических свойств материалов. Подход, реализованный в лучевых моде-

лях, предназначен, прежде всего, для инженерных расчетов. Для проведения более подробного моделирования и получения дополнительной информации, например, данных об изменении характеристик излучения при прохождении через объем модели, необходимо использовать метод Монте-Карло. В этом случае розыгрыш параметров процессов взаимодействия излучения с веществом проводится с помощью генератора случайных чисел. Помимо GEANT4, к наиболее известным программам, основанным на использовании метода Монте-Карло, относятся FLUKA [3, 4], MCNPX [5] и RHITS [6].

Расчеты величин поглощенных доз проводились для изотропного потока протонов ГКЛ для периода максимума солнечной активности (рис. 1). Радиус водяного детектора выбран равным 15 см, внешний радиус сферического защитного алюминиевого экрана — 200 см, толщина стенки защитного экрана — 10 см.

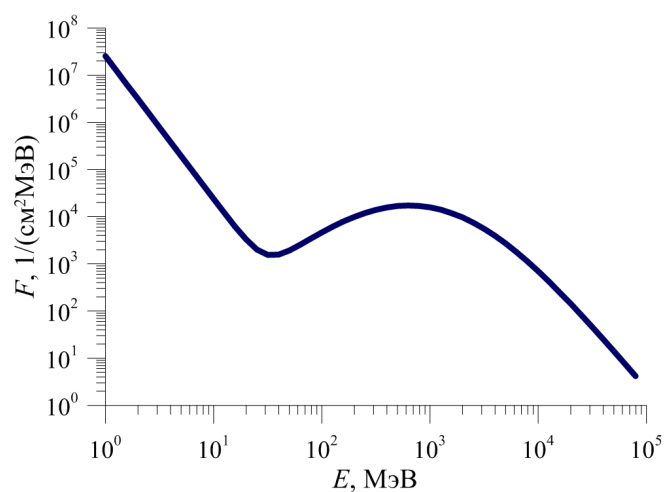


Рис. 1: Гамма-одовой дифференциальный спектр протонов ГКЛ

\*E-mail: chirskaia.sinp@yandex.ru

†E-mail: novikov@sinp.msu.ru

‡E-mail: vvs@scil.sinp.msu.ru

Рассмотрим два варианта конфигурации сферического экрана, показанных на рис. 2. В первом случае стенки экрана вплотную прилегают к детектору (рис. 2,а), во втором случае внутри сферического экрана располагается полость (рис. 2,б), при этом величина поглощенной дозы в детекторе зависит от его положения внутри полости. При изменении расстояния от центра сферы до детектора изменяются эквивалентные толщины защиты вдоль траксирующих лучей, что изменяет параметры экранирования. Поэтому даже такая структура, как полый сферический экран с расположенным внутри детектором, является экраном сложной конфигурации.

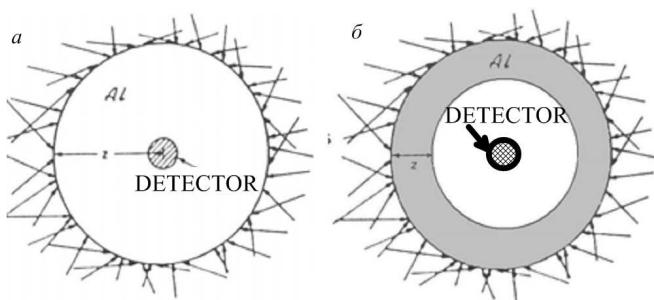


Рис. 2: Схема расчета дозы излучения за сферическим экраном: а — детектор в центре сплошной сферы; б — детектор в полости сферической защите

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поглощенная доза в детекторе внутри сферической оболочки имеет максимальное значение в центре и минимальное значение вблизи внутренней поверхности оболочки (рис. 3). Здесь  $R/R_0$  — отношение расстояния от центра сферического экрана до центра детектора к внешнему радиусу экрана,  $D/D_0$  — отношение поглощенной дозы в детекторе, находящемся на расстоянии  $R$  от центра экрана, к величине поглощенной дозы в детекторе, расположенном в центре сферического экрана. Следует отметить, что при расчетах поглощенных доз с помощью программы RDOSE вычисления могут быть проведены только для ионизационных потерь энергии электронов и протонов без учета ядерных взаимодействий. Поэтому для повышения точности расчета, а также моделирования прохождения более тяжелых атомов, необходимо применять программы, использующие метод Монте-Карло.

На рис. 4 представлена рассчитанная в GEANT4 зависимость суточной поглощенной дозы в детекторе, расположенном в центре сферического экрана, от энергии протонов со спектром ГКЛ. Отдельно показан вклад различных компонент вторичного излучения в суммарную поглощенную дозу.

При энергиях первичных протонов ниже  $\sim 150$  МэВ основной вклад в величину поглощенной дозы дают

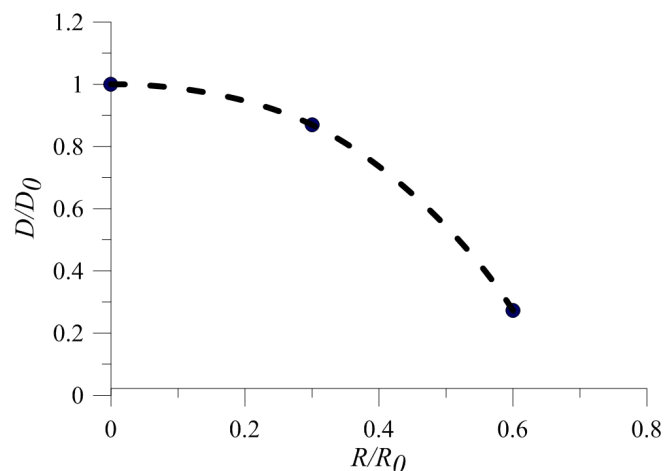


Рис. 3: Изменение относительной поглощенной дозы по мере удаления детектора от центра сферического экрана при расчете с помощью RDOSE

нейтроны и гамма-излучение, образующиеся при взаимодействии первичных протонов с защитным экраном, поскольку пробег протонов в алюминии в этом случае меньше толщины защитного экрана. При увеличении энергии протонов постепенно возрастает вклад в величину поглощенной дозы вторичных пионов и других частиц, рождающихся в ядерных взаимодействиях.

Величины суточной поглощенной дозы от различных составляющих излучения представлены в табл. I. Накопление около 30% от величины поглощенной дозы в детекторе происходит благодаря взаимодействию с вторичным излучением, образующимся при прохождении первичных протонов. Таким образом, величины поглощенной дозы, полученные с учетом только ионизационных потерь первичных протонов, будут значительно ниже величин, учитывающих вклад вторичного излучения.

Таблица I: Вклад различных компонент излучения в величину суточной поглощенной дозы от протонов ГКЛ

Вид излучения,	Суточная поглощенная доза, мГр	Вклад в полную поглощенную дозу, %
электроны	1.54E-03	1.09
протоны	1.02E-01	71.71
нейтроны	1.40E-02	9.87
гамма-излучение	4.03E-03	2.84
позитроны, мюоны	1.84E-05	0.013
ионы	4.05E-04	0.29
пионы	1.91E-02	13.46
прочие	1.06E-03	0.75
Сумма	1.42E-01	100

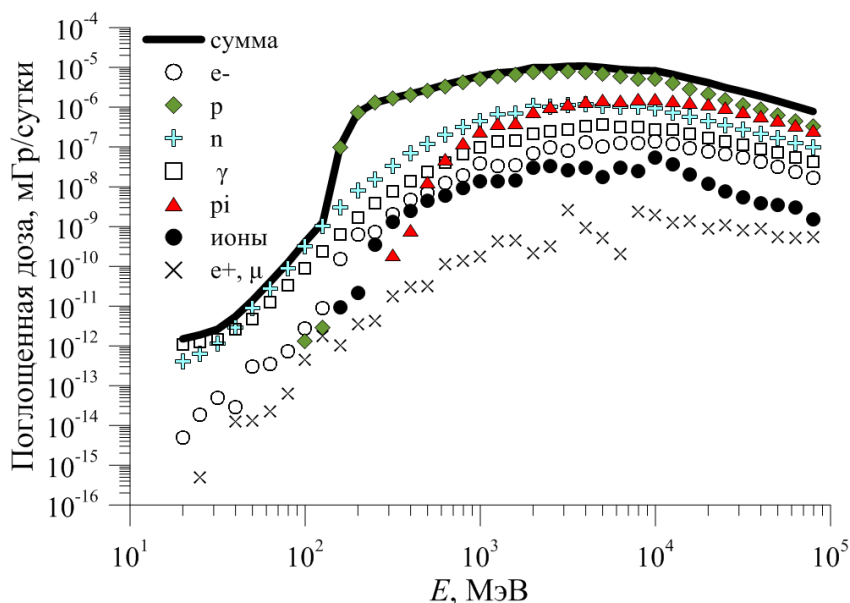


Рис. 4: Зависимость суточной поглощенной дозы в детекторе от энергии первичных протонов ГКЛ

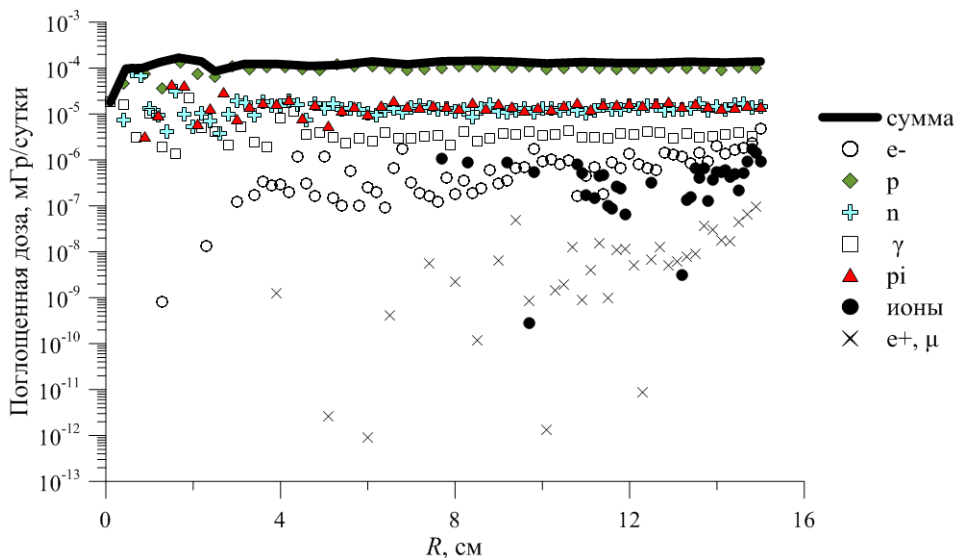


Рис. 5: Распределение поглощенной дозы по радиусу водяного детектора

Радиальное распределение поглощенной дозы в детекторе, рассчитанное с помощью GEANT4, показано на рис. 5. Здесь значение радиуса  $R = 0$  см соответствует центру детектора,  $R = 15$  см — его внешней поверхности.

Из рис. 5 видно, что величина поглощенной дозы для основных компонент (протоны, нейтроны, пионы, гамма-излучение) практически не зависит от радиуса детектора. Модель RDOSE позволяет получать подобные объемные распределения поглощенной дозы с гораздо меньшими затратами машинного времени, однако, как уже упоминалось выше, при этом проводится расчет только суммарной ионизационной дозы от первичных частиц без учета дозы от вторичного излучения.

Рассчитанная с применением лучевой программы RDOSE величина поглощенной в детекторе дозы представляет собой результат усреднения в детекторе ионизационных потерь первичного излучения, что может приводить к значительным отклонениям от истинных значений поглощенной дозы. В GEANT4 могут быть учтены процессы образования вторичного излучения

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитанная с применением лучевой программы RDOSE величина поглощенной в детекторе дозы представляет собой результат усреднения в детекторе ионизационных потерь первичного излучения, что может приводить к значительным отклонениям от истинных значений поглощенной дозы. В GEANT4 могут быть учтены процессы образования вторичного излучения

и вклад в величину поглощенной дозы вторичных частиц. С другой стороны, для проведения расчетов методом Монте–Карло в моделях сложной структуры необходимы значительные затраты вычислительного времени, поэтому более предпочтительным является использование лучевых методов. Таким образом, лучевые и стохастические методы дополняют друг друга, поскольку лучевые модели гораздо быстрее, но резуль-

тат вычисления методом Монте–Карло может быть более точным и подробным.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М. В. Ломоносова [7].

- 
- [1] Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Axen D., Banerjee S., Barrand G. et al. Nucl. Instr. Meth. A. 2003. **506**, N 3. P. 250.
- [2] Маклецов А. А., Милеев В. Н., Новиков Л. С., Синолиц В. В. Инженерная экология. 1997. N 1. С. 39.
- [3] Fasso A., Ferrari A., Ranft J., Sala P.R. FLUKA: a multi-particle transport code: report. CERN, Geneva. CERN-2005-10., 2005.
- [4] Battistoni G., Cerutti F., Fasso A., Ferrari A., Muraro S., Ranft J., Roesle S., Sala P.R. AIP Conf. Proc. 2007. **896**. P. 31.
- [5] Goorley T., James M., Booth T., Brown F., Bull J., Cox L.J., Durkee J., Elson J., Fensin M., Forster R.A. et al. Nuclear Technology. 2012. **180**. P. 298.
- [6] Sato T., Niita K., Matsuda N., Hashimoto S., Iwamoto Y., Noda S., Ogawa T., Iwase H., Nakashima H., Fukahori T. et al. Nucl. Sci. Technol. 2013 **50**, Is. 9. P. 913.
- [7] Воеводин Вл. В., Жуматий С. А., Соболев С. И., Антонов А. С., Брызгалов П. А., Никитенко Д. А., Стефанов К. С., Воеводин Вад. В. Открытые системы. 2012. N. 7. С. 36.

---

## Simulation of absorbed dose distribution in objects with complex configuration

N. P. Chirskaya<sup>a</sup>, L. S. Novikov<sup>b</sup>, V. V. Sinolits<sup>c</sup>

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119991, Russia

E-mail: <sup>a</sup>chirskaya.sinp@yandex.ru, <sup>b</sup>novikov@sinp.msu.ru, <sup>c</sup>vvs@scil.sinp.msu.ru

This paper considers the possibilities of different mathematical methods application to the problem of the absorbed dose calculation in objects with a complex configuration. The simulation results of the absorbed dose distribution in a spherical water detector placed inside a spherical shield due to protons of galactic cosmic rays with energy in the range  $10^1$ – $10^5$  MeV are presented.

PACS: 87.53.Bn

*Keywords:* absorbed radiation dose, Monte-Carlo method, ray-tracing method, galactic cosmic rays, spherical water phantom.

*Received 05 March 2018.*

### Сведения об авторах

1. Чирская Наталья Павловна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-31-92, e-mail: chirskaya.sinp@yandex.ru.
  2. Новиков Лев Симонович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-10-07, e-mail: novikov@sinp.msu.ru.
  3. Синолиц Вадим Викторович — программист; тел.: (495) 939-31-92, e-mail: vvs@scil.sinp.msu.ru.
-