

# МЕТОД РАСЧЕТА ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ МНОГОМОДУЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ГАММА-4

## RADIATION FIELD CALCULATION METHOD FOR MULTI-MODULE GAMMA-4 FACILITY

*О. А. Галихина, С. А. Лазарев*

*O. A. Galikhina, S. A. Lazarev*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Приведены результаты оценочных расчетов пространственных и пространственно-временных характеристик поля излучения установки ГАММА-4 [1]. Результирующее поле излучения установки определяется суперпозицией полей излучения, генерируемых ее отдельными модулями. Задача оценки ожидаемых параметров поля излучения четырехмодульной установки сведена к задаче построения математической модели, описывающей поле излучения одного модуля, и использования этой модели для реконструкции поля излучения многомодульной установки.

Разработанный метод расчета пространственно-временных зависимостей дозиметрических и радиометрических характеристик поля позволит проводить быструю оценку ожидаемых характеристик поля излучения в различных режимах работы установки ГАММА-4.

Here are given results of estimation calculations for spatial and space-time characteristics of radiation field of GAMMA-4 facility [1]. The facility's radiation resultant field is specified by a superposition of radiation fields, generated by its individual modules. The problem of estimating expected parameters of the four-module facility's radiation field comes to the task for mathematical model building, describing a single module radiation field, and employing this module for reconstruction of the multi-module facility's radiation field.

The developed calculation method for time-space dependencies of dosimetric and radiometric characteristics of the field allows quick estimating of expected characteristics of radiation field under different modes of GAMMA-4 facility operation.

### Введение

Пространственные и пространственно-временные характеристики поля излучения установки наряду с дозой, мощностью дозы, временными характеристиками импульса и спектром излучения определяют, как адекватность, так и возможность проведения исследований радиационной стойкости различных объектов и облучательных экспериментов.

Для решения задач по оценке ожидаемых характеристик полей излучения широко применяется метод Монте-Карло. Недостатком этого метода является необходимость выполнения большого объема расчетов и проведение полного перерасчета в случае изменения условия задачи. Поэтому применение адекватных исследуемым физическим

процессам математических моделей, полученных с использованием результатов расчетов методом Монте-Карло, позволяет расширить возможности использования этих результатов.

Результаты подробных расчетов пространственно-спектральных характеристик поля ТИ, на основе которых был разработан метод измерения таких параметров электронного пучка, как энергия, ток и угол входа в мишень для ускорителя ОРИОН-1 приведены в [2].

Одним из возможных режимов работы многомодульной установки ГАММА-4 [3] является режим синхронизированной работы отдельных модулей на собственный вакуумный диод. В этом режиме работы результирующее поле излучения установки определяется как суперпозиция полей излучения модулей. В этом случае, задача оценки

поля многомодульной установки может быть сведена к построению математической модели, описывающей поле излучения одного модуля, и использования этой модели для реконструкции поля излучения многомодульной установки.

### Выбор модели для обработки результатов расчетов методом Монте-Карло

В качестве исходных данных были использованы результаты расчетов [4] динамических характеристик поля тормозного излучения ускорителя ГАММА-1, полученные с помощью программы СМК [5] и BEAM25 [6] (Рис. 1). В работе [4] было показано, что пространственные распределения интегральных характеристик удовлетворительно (с погрешностью не более 12 %, в диапазоне расстояний от 10 до 100 см от мишени) описываются моделью точечного источника. В настоящей работе рассматриваются возможности снижения погрешности и расширения области применения модели за счет ее усложнения и введения динамических (изменяющихся во времени) параметров.

Для улучшения аппроксимации интегральных распределений на расстоянии меньше 10 см от мишени была рассмотрена возможность использования кольцевого источника. В расчетах использовались два варианта углового распределения ТИ. В обоих случаях используемое угловое распределение представлено в виде  $(\cos\theta)^\alpha$ . Варианты отличаются лишь выбором среднего направления излучения. В 1-м варианте направление макси-

мального выхода излучения совпадает с вектором нормали к поверхности мишени. Во 2-м – направление максимального выхода излучения определялось при оптимизации параметров модели. Для улучшения точностных характеристик модели для пространственных распределений поглощенной дозы в кремнии на расстоянии от 1,5 до 100 см рассматривались комбинации из моделей с точечным и кольцевыми источниками.

При выводе функциональной зависимости, описывающей пространственные распределения поглощенной дозы, была использована геометрия, представленная на рис. 2.

Для кольцевого источника пространственное распределение поглощенной дозы в кремнии может быть представлено в виде:

$$D(z, R) = \int_0^\pi 2 \cdot A \cdot (\cos\theta_S)^\alpha \cdot \cos\theta_D \cdot \frac{1}{|\vec{L}(\varphi)|^2} \cdot r \cdot d\varphi \quad (1),$$

где,  $D(z, R)$  – поглощенная доза в кремнии на различных расстояниях от мишени;

$r$  – радиус кольцевого источника;

$z_0$  – положение центра эффективного источника;

$z$  и  $R$  – координаты точки в выбранной системе;

$A$  – нормировочный коэффициент;

$\alpha$  – параметр, подбираемый в ходе аппроксимации;

$\Psi$  – угол поворота вектора  $\vec{n}_s$ , подбираемый в ходе аппроксимации.

Будем считать, что если угол  $\psi < 0$ , то вектор  $\vec{n}_s$  направлен «во внутрь».

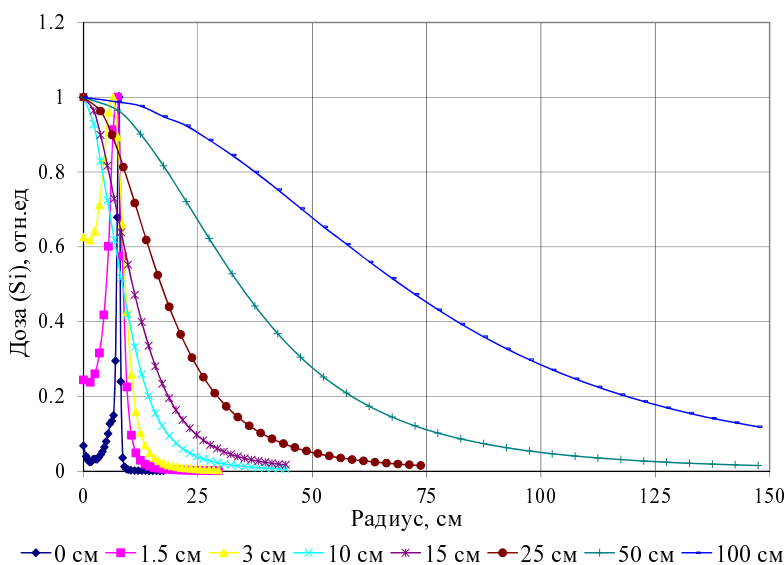


Рис. 1. Распределения поглощенной дозы на различных расстояниях от мишени (СМК)

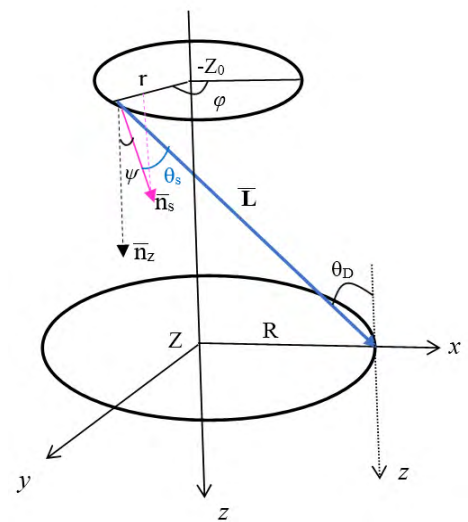


Рис. 2. Геометрия, которая была использована для получения выражения (2)

Тогда,

$$r = r + \sin \psi |\vec{n}_s|.$$

Отсюда,

$$\vec{n}_s = [(r_s - r) \cos \varphi, (r_s - r) \sin \varphi, |n_s| \cos \psi] = \\ = (\sin \psi \cos \varphi, \sin \psi \sin \varphi, \cos \psi)$$

Косинус угла между рассматриваемым направлением  $\vec{L}(\varphi)$  и векторами  $\vec{n}_s$  и  $\vec{n}_z$  вычисляется как

$$\cos \theta_s = \frac{\vec{n}_s \cdot \vec{L}(\varphi)}{|\vec{L}(\varphi)|}; \quad \cos \theta_D = \frac{\vec{n}_z \cdot \vec{L}(\varphi)}{|\vec{L}(\varphi)|};$$

где  $\vec{L}(\varphi) = (R - r \cdot \cos \varphi, -r \cdot \sin \varphi, z + z_0)$  и  $|\vec{L}(\varphi)|^2 = R^2 + r^2 + (z + z_0)^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos \varphi$  – расстояние от кольцевого источника до точки детектирования;  $\vec{n}_z = (0, 0, 1)$  – единичный вектор нормали к поверхности мишени.

Подставив представленные значения, получаем:

$$\cos \theta_s = \frac{\vec{n}_s \cdot \vec{L}(\varphi)}{|\vec{L}(\varphi)|} = \frac{(R \cdot \cos \varphi - r) \cdot \sin \psi + \cos \psi \cdot (z + z_0)}{|\vec{L}(\varphi)|}, \\ \cos \theta_D = \frac{\vec{n}_z \cdot \vec{L}(\varphi)}{|\vec{L}(\varphi)|} = \frac{(z + z_0)}{|\vec{L}(\varphi)|}.$$

Таким образом выражение (1) можно представить в виде:

$$D(z, R) = 2 \cdot r \cdot A \cdot \int_0^\pi (K)^\alpha \cdot \frac{(z + z_0) d\varphi}{|\vec{L}(\varphi)|^{3+\alpha}}, \quad (2)$$

$$\text{где } K = \begin{cases} \{\vec{n}_s \cdot \vec{L}(\varphi) \geq 0\}, & \theta_s < 90^\circ \\ 0, & \theta_s \geq 90^\circ \end{cases}$$

Последнее условие исключает попадание излучения в область детектирования из заднего полупространства источника. Интегрирование в (2) проводилось численно. Параметры зависимости находились методом наименьших квадратов. В расчетах проводилась минимизация квадратичной невязки между расчетами по программе СМК и по модели.

Значительно более существенного улучшения точностных характеристик модели можно ожидать при введении в неё динамических параметров. В модели с кольцевым источником, чтобы оценить

характеристики поля в различных режимах включения многомодульной установки ГАММА-4 необходимо учесть пространственно-временное распределение мощности поглощенной дозы. Для описания пространственно-временных распределений мощности дозы поля была использована зависимость, аналогичная зависимости (2):

$$P(z, R, t) = 2 \cdot r(t_0) \cdot A(t_0) \times \\ \times \int_0^\pi \{(\vec{n}_s \cdot \vec{L}(\varphi)) \geq 0\}^{\alpha(t_0)} \cdot \frac{(z + z_0) d\varphi}{|\vec{L}(\varphi)|^{3+\alpha(t_0)}} \quad (3),$$

где  $P(z, R, t)$  – мощность поглощенной дозы;  $t_0$  – момент выхода излучения;  $A(t_0)$ ,  $\alpha(t_0)$ ,  $r(t_0)$ ,  $\psi(t_0)$ ,  $\varphi(t_0)$  – параметры подбираемые в ходе аппроксимации зависящие от времени излучения источника.

Для учета времени пролета квантов от источника до точки детектирования использовалось выражение:

$$t = t_0 + \frac{\vec{L}(\varphi)}{c}, \quad (4)$$

Расчеты проводились для временной сетки результатов расчета по методу Монте-Карло, которая имеет 44 временных значения с шагом 3,25 нс (от 8,6 нс) на расстоянии от 0,22 до 50 см от мишени ускорителя и 4 нс (от 12 нс) при 50–100 см. Параметры  $A(t_0)$ ,  $\alpha(t_0)$ ,  $r(t_0)$ ,  $\psi(t_0)$ ,  $\varphi(t_0)$  были рассчитаны на новой сетке, не совпадающей с исходной. Новая сетка имеет 46 значений с шагом в 4 нс (от 5 нс). Мощность поглощенной дозы  $P(z, R, t)$  для исходной временной сетки определялась методом линейной интерполяции.

## Результаты расчетов

Для аппроксимации распределения поглощенной дозы, в дополнение к перечисленным выше, была рассмотрена модель источника с распределением интенсивности излучения по радиусу. В этой модели источник имеет пространственное распределение, совпадающее с распределением поглощенной дозы на поверхности мишенного узла ускорителя (0,22 см от поверхности источника). Результаты, полученные для этой модели, демонстрируют неплохое согласие на расстоянии 1,5 см от источника. Однако в области от 3 до 100 см от источника модель имеет сильное расхождение с исходными данными.

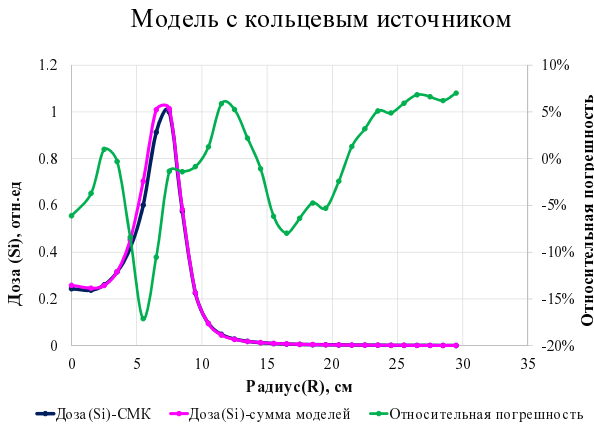


Рис. 3. Сравнение пространственных распределений поглощенной дозы в кремнии, полученных с помощью программы СМК и суммы моделей на расстоянии 1,5 см от источника

Лучшие результаты для распределения поглощенной дозы были получены для суммы моделей, а именно: модели с точечным источником и моделей кольцевого источника с двумя вариантами углового распределения. Результаты расчетов представлены на рис. 3. Можно отметить, что имеющиеся расхождения на малых расстояниях от источника не превышают 20 %.

Результаты расчетов для динамической модели с точечным источником показали, что максимальная относительная погрешность расчета не превышает 20 % только для расстояния более 10 см от источника. На меньших расстояниях погрешность достигает 60 %.

Наилучшие результаты были получены для модели с динамическим кольцевым источником. Пространственно-временное распределение мощности поглощенной дозы гамма квантов ТИ имеет хорошее согласие  $\leq 20\%$  между моделью (3) и расчетом (СМК) мощности дозы (рис. 4) на расстоянии от 1,5 до 100 см от источника. Максимальная относительная погрешность расчета дозы для данной модели не превышает 15 % на расстоянии от 1,5 до 100 см.

### Характеристики поля ТИ установки ГАММА-4 в различных режимах работы

Используя параметры модели с динамическим кольцевым источником были проведены расчеты пространственных распределений мощности поглощенной дозы на различных расстояниях от мишени, в различных режимах синхронизации модулей установки ГАММА-4 (рис. 5–8). Для рисунка 5 площадь с неоднородностью поглощенной

Модель с динамическим кольцевым источником

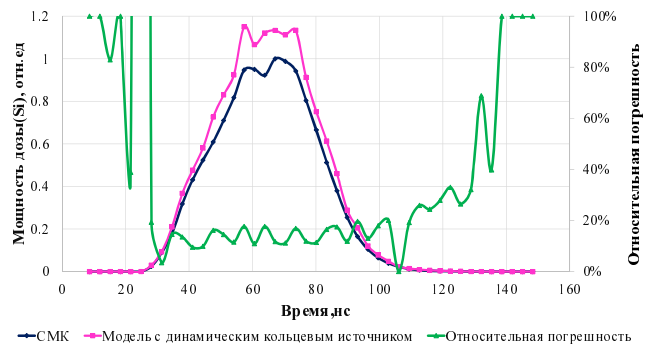


Рис. 4. Сравнение пространственно-временных распределений поглощенной дозы, полученных с помощью программы СМК и выражения (3), на расстоянии 1,5 см от источника

дозы 30 % на расстоянии 30 см от мишени  $S = 2725 \text{ см}^2$ , а для рисунка 7 площадь с неоднородностью поглощенной дозы 30 % на расстоянии 30 см от мишени  $S = 1350 \text{ см}^2$ . Работая не в фокусе площадь облучения уменьшится, но мощность дозы увеличится на 33,5 %. Таким образом, можно сделать вывод что, вводя временную задержку включения модулей можно изменять площадь облучения, а также увеличить мощность дозы на этой площади при работе не в фокусе.

Используя модель динамического кольцевого источника можно получить временные зависимости мощности дозы в любой точке зала для различной задержки срабатывания модулей. В результате, изменяя время срабатывания модулей и область детектирования, получаем различные временные зависимости мощности дозы (рис. 9,10). Таким образом, мы можем получить временные характеристики поля излучения для различных режимов включения модулей установки ГАММА-4.

### Заключение

➤ Для расчета пространственных и пространственно-временных характеристик поля были рассмотрены модели:

- модель с точечным источником;
- модели с кольцевым источником:
  - вариант 1 (среднее направление излучения совпадает с вектором нормали к поверхности источника);
  - вариант 2 (направление максимального выхода излучения использовали в качестве параметра модели);

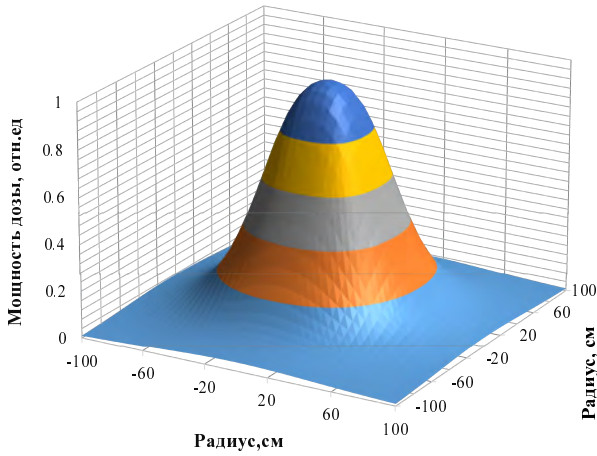


Рис. 5. Пространственное распределение мощности поглощённой дозы на расстоянии 30 см от мишени, при синхронном срабатывании модулей в момент времени  $t = 40$  нс

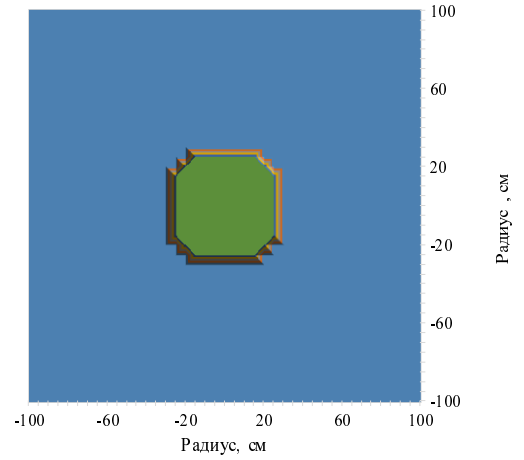


Рис. 6. Область с неоднородностью поглощённой дозы 30 % на расстоянии 30 см от мишени, при синхронном срабатывании модулей в момент времени  $t = 40$  нс

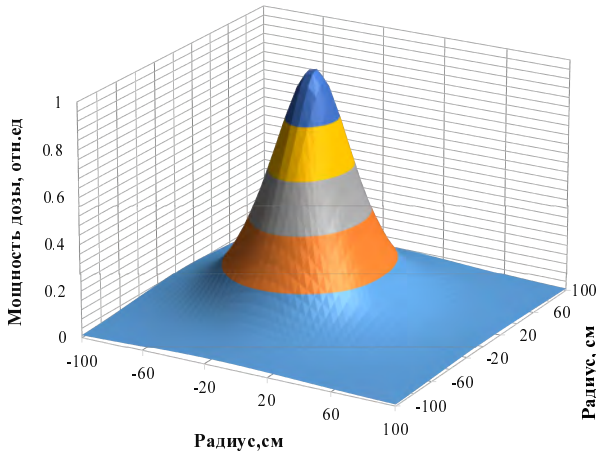


Рис. 7. Пространственное распределение мощности поглощённой дозы на расстоянии 30 см от мишени, при срабатывании модулей с задержкой  $\Delta t = 30$  нс в момент времени  $t = 40$  нс

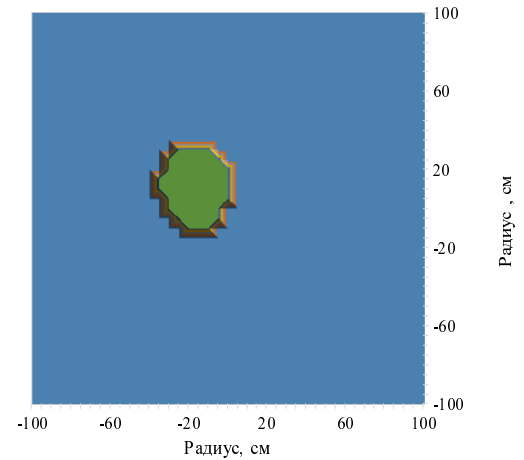


Рис. 8. Область с неоднородностью поглощённой дозы 30 % на расстоянии 30 см от мишени, при срабатывании модулей с задержкой  $\Delta t = 30$  нс в момент времени  $t = 40$  нс

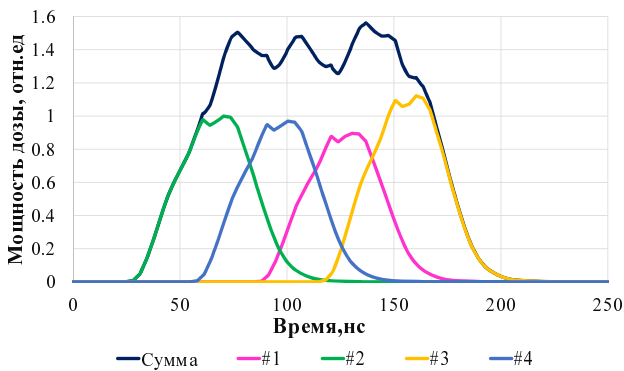


Рис. 9. Временное распределение мощности дозы с временной программой срабатывания модулей (нс):  $t_1 = 60, t_2 = 0, t_3 = 90, t_4 = 30$

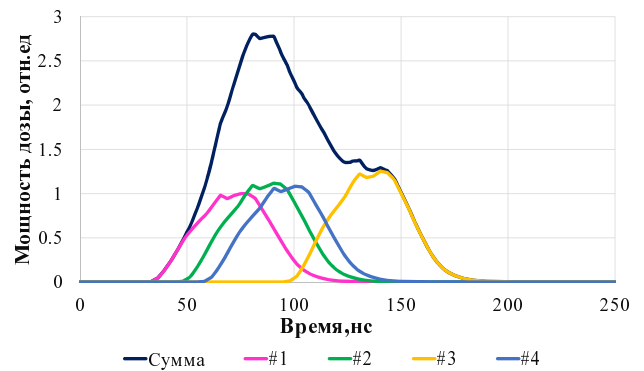


Рис. 10. Временное распределение мощности дозы с временной программой срабатывания модулей (нс):  $t_1 = 5, t_2 = 20, t_3 = 70, t_4 = 30$

- модель источника с распределением интенсивности излучения по радиусу;
  - модель динамического кольцевого источника.
- Показано, что наилучшие результаты продемонстрировала модель с динамическим кольцевым источником. Максимальная относительная погрешность оценки мощности дозы не превышает 20% на расстоянии от 1,5 до 100 см. Максимальная относительная погрешность оценки дозы не превышает 15 % на расстоянии от 1,5 до 100 см.
- Продемонстрирована возможность использования модели с динамическим кольцевым источником для оценки характеристики поля излучения в различных режимах включения модулей установки ГАММА-4.

### Список литературы

1. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Пучагин С. Ю., Мозговой А. Л., Гришин А. В., Страбыкин К. В., Мансуров Д. О., Моисеевских М. А., Бердников Е. С. «Оценка дозовых параметров излучения электрофизической установки «Гамма-4»» // Сборник докладов XVI Харитоновских тематических научных чтений «Мощная импульсная электрофизика». 21–25 апреля 2014 г., г. Саров. С. 52-55.
2. Завада Н. И., Комаров П. Л., Донской Е. Н., Цукерман В. А. Косвенные методы определения параметров электронов в пучке // Физика и техника импульсных источников ионизирующих излучений для исследования быстропротекающих про-

цессов. Сб. статей под ред. Н. Г. Макеева. – Саров, ВНИИЭФ, 1996. С. 84–96.

3. Завьялов В., Гордеев В. С., Пунин В. Т., Гришин А. В., Назаренко С. Т., Павлов В. С., Деманов В. А., Шиханова Т.Ф., Калашников Д. А., Козачек А. В., Глушков С. Л., Страбыкин К. В., Пучагин С. Ю., Мансуров Д. О., Миронычев Б. П., Майоров Р. А., Майорникова В. Л. «Проект электрофизической установки «Гамма-4»» // Сборник докладов XVI Харитоновских тематических научных чтений «Мощная импульсная электрофизика». 21–25 апреля 2014 г., г. Саров, с. 32–37.

4. Гордеев В. С., Донской Е. Н., Залялов А. Н., Лазарев С. А., Михайлов Е. С. «Расчет динамических характеристик поля тормозного излучения сильноточных ускорителей электронов» // IX Межотраслевая конференция по радиационной стойкости: сборник докладов: 2 т. Т. 1. г. Снежинск РФЯЦ-ВНИИТФ, 2011. С. 278–287.

5. Пат. № 2011610500 Россия, А. К. Житник, Е. Н. Донской, С. П. Огнев, А. В. Горбунов, А. Н. Залялов, Н. В. Иванов, А. Г. Малькин, В. И. Рослов, Т. В. Семёнова, А. Н. Субботин. Программа для ЭВМ СМК. Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научный исследовательский институт экспериментальной физики «ВНИИЭФ» // Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 11 января 2011 г.

6. Gordeev V. S., Mikhailov E. S. BEAM25 Program for Numerical Simulation of the Processes of High-Current Electron Beams Shaping, Acceleration and Transportation // ВАНТ Сер. Ядерно-физические исследования. 2001. № 5 (39). С. 30–32.