

## Формирование стороннего источника электродинамической задачи при взаимодействии импульса жесткого излучения со средой

© Ф.Ф. Валиев

Санкт-Петербургский государственный университет,  
198504 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: valiev@snoopy.phys.spbu.ru

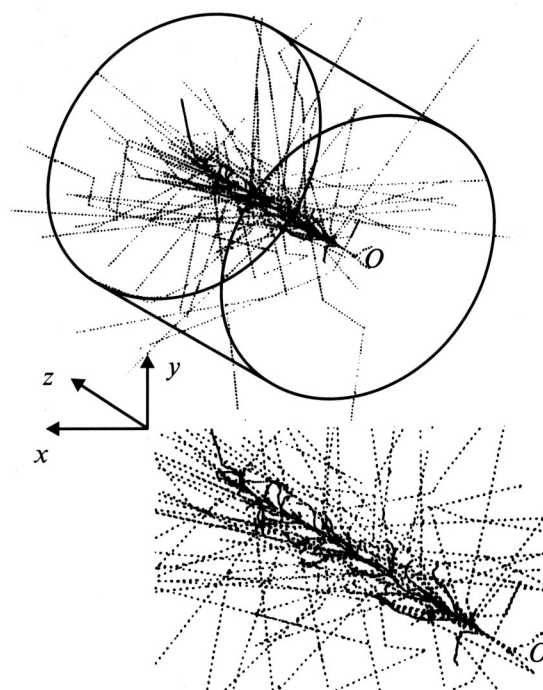
(Поступило в Редакцию 3 ноября 2000 г. В окончательной редакции 2 марта 2001 г.)

Предложена методика расчета стороннего источника электродинамической задачи, формируемого при поглощении жесткого излучения средой. Использован метод численного моделирования. Показана возможность пространственно-временной локализации вектора плотности тока.

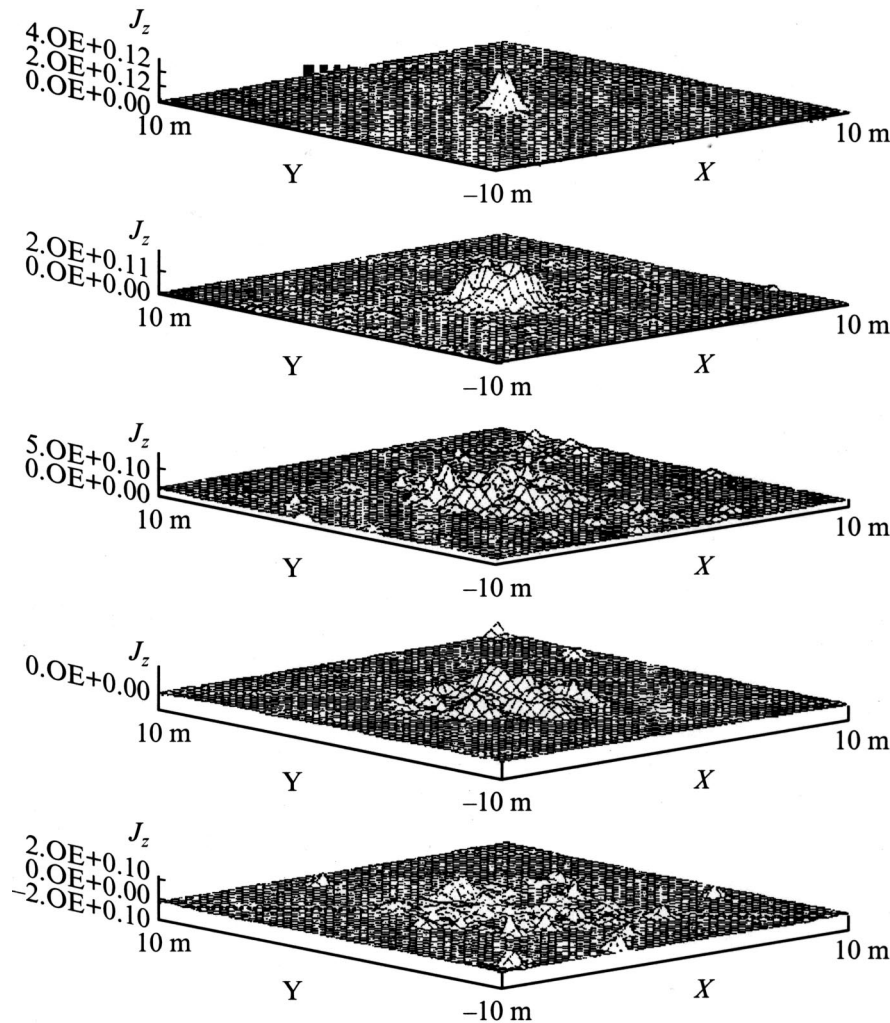
Исследование электромагнитных волн, сопровождающих поглощение гамма-квантов средой, предполагает проведение расчета вектора плотности макроскопического тока — стороннего источника электродинамической задачи. В данной работе рассмотрено формирование импульса тока при облучении газовой среды коллимированным пучком жесткого излучения. Изложена методика расчета и полученное на ее основе описание пространственно-временной структуры источников электромагнитных волн, перемещающихся со скоростью света. Использован метод численного моделирования. Программа написана с использованием пакета GEANT [1], широко применяемого в ядерной физике и физике высоких энергий. Учитываются основные физические процессы взаимодействия фотонов со средой: фотопоглощение, комптоновское рассеяние, образование пар, а также вторичные эффекты взаимодействия дельта-электронов со средой, ионизационные процессы, вызванные вторичными электронами. Электроны с энергией ниже 10 keV не рассматриваются. В программу вводятся данные о элементном составе и геометрии поглощающей области, пространственно-временном распределении первичных гамма-квантов и их импульсах. Проведение работы стимулировано рассматриваемой в последние годы проблемой формирования узконаправленных электромагнитных волн, обладающих существенной пространственно-временной локализацией, источниками, перемещающимися со скоростью света [2–8]. В отмеченных работах источники (вектор плотности тока) не рассчитывались, а задавались эвристически. При расчетах электромагнитного излучения, сопровождающего ядерные взрывы [9,10], плотность тока определялась на основе упрощенной модели. Предполагалось, что электроны, образующиеся при поглощении гамма-квантов средой, сохраняют свою первоначальную скорость на всем пути пробега, а затем резко останавливаются. Их разброс по скоростям, углам вылета и вторичные эффекты не учитывались. Сказанное выше определялось отсутствием адекватных вычислительных средств и соответствующей методики.

Схема численного эксперимента представлена на рис. 1. Геометрия задачи выбрана в соответствии с

требованиями к пространственно-временной структуре источника, определяемыми известными решениями электродинамической задачи формирования направленных волн [4–8]. Однородная поглощающая среда ограничена цилиндрической поверхностью и плоскостями, ортогональными оси цилиндра, вдоль которой перемещается пространственно-временной  $\delta$ -импульс первичного излучения. Начало координат — точка  $O$  ( $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $z = 0$ ), принадлежащая одной из указанных плоскостей, ось  $z$  системы координат совмещена с осью цилиндра. За начало отсчета времени принят момент прохождения импульсом гамма-излучения границы поглощающей



**Рис. 1.** Общий вид модельного эксперимента. Цилиндрическая область длиной 20 м, диаметром 20 м заполнена воздухом при 10 atm. Энергия первичных гамма-квантов 10 MeV. Сплошные линии — траектории электронов, штриховые — траектории гамма-квантов. Внизу представлена область вблизи оси  $z$  в увеличенном масштабе.



**Рис. 2.** Гистограммы поперечных распределений  $z$ -компонент векторов плотности тока  $j_z(\mathbf{r}, t)$  в момент времени  $t = 500$  ns в сечениях находящихся на расстоянии 0.2 m друг от друга по оси  $z$ .

области. Далее представлены результаты численных экспериментов при прохождении гамма-квантов с энергией 10 МэВ через воздушную среду при 10 atm. На рис. 1 показаны траектории электронов (сплошные линии) и гамма-квантов (штриховые линии). Видно, что электроны сгруппированы вблизи оси  $z$ .

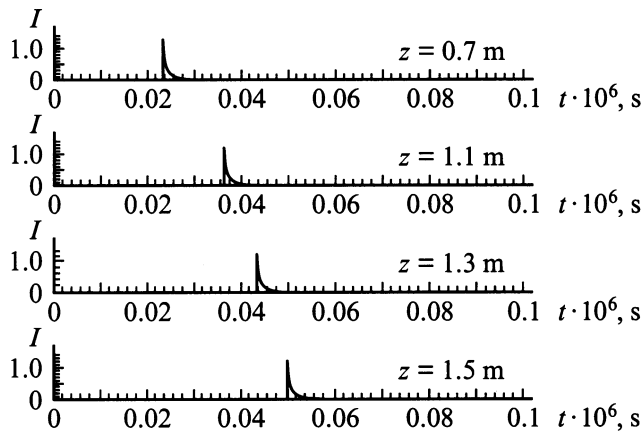
Пространственно-временное распределение плотности тока  $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$  определяется векторами плотности токов  $\mathbf{j}_{\Delta V_i}(\mathbf{r}, t)$  в элементах пространства  $\Delta V_i$   $((x_i, x_i + \Delta x), (y_i, y_i + \Delta y), (z_i, z_i + \Delta z))$ . В каждом из них проводится суммирование векторов плотности токов отдельных электронов

$$\mathbf{j}_{\Delta V_i}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\Delta V} \sum_{a=1}^{N_i} e\mathbf{v}(\mathbf{r}_a, t),$$

где  $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ ;  $\mathbf{v}(\mathbf{r}_a, t)$  и  $\mathbf{r}_a(x, y, z, t)$  — скорости и координаты электронов в поглощающей среде в момент времени  $t$ ;  $N_i$  — число электронов в объеме  $\Delta V_i$ .

Векторы  $\mathbf{j}_{\Delta V_i}(\mathbf{r}, t)$  приписываем центрам элементов пространства  $\Delta V_i$ . Гистограммы, описывающие поперечное распределение  $z$ -компоненты вектора плотности тока  $j_z(\mathbf{r}, t)$  при фиксированных  $t$  и  $z$ , представлены на рис. 2. При определенных выше параметрах модельного эксперимента полуширина распределения  $j_z(\mathbf{r}, t)$  ( $\Delta R_1$ ) меньше 60 см. Полученное значение  $\Delta R_1$  — оценка поперечной пространственной локализации формируемого источника для выбранного времени наблюдения.

На рис. 3 представлено изменение формы импульса тока в различных сечениях поглощающей области перпендикулярных ее оси. При выбранных параметрах среды и энергии первичного излучения длительность импульса ( $T$ ) по уровню 0.1 меньше 2 ns, что соответствует его пространственной протяженности  $\Delta Z_2 = cT < 60$  см, где  $c$  — скорость света. Полученное значение  $\Delta Z_2$  — оценка пространственной локализации тока вдоль оси  $z$ . Из рис. 3 также следует, что скорость перемещения импульса тока равна скорости света.



**Рис. 3.** Формы импульса тока в различных сечениях поглощающей области при энергии первичных гамма-квантов 10 MeV.

Приведенные выше оценки продольной и поперечной локализации позволяют утверждать, что при облучении газовой среды коллимированным импульсом жесткого излучения в рассматриваемом интервале времени и при выбранных параметрах эксперимента формируется перемещающаяся со скоростью света ограниченная область пространства, где  $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t) \neq 0$ . Тем самым при электродинамических расчетах направленных электромагнитных волн применима упрощенная модель источника — дельта-импульс тока, бегущий по линии со скоростью света [7].

Используя предлагаемую методику расчета вектора плотности тока  $\mathbf{j}$ , можно моделировать другие источники электродинамической задачи, перемещающиеся со скоростью света, включая приводящие к направленным волнам [5,6,11], задавая требуемые распределения координат и импульсов первичного гамма-излучения.

Методика расчета вектора плотности тока  $\mathbf{j}$  может быть применена и для определения формы импульса тока, перемещающегося со скоростью, превышающей скорость света (сверхсветового источника излучения). Пример формирования сверхсветового источника приведен в [12], где фронт импульса жесткого излучения падает под углом к оси симметрии протяженной поглощающей области.

Выделим основные результаты работы. Предложена методика имитационного моделирования световых и сверхсветовых источников при взаимодействии жесткого излучения с веществом. Оценены продольная и поперечная локализация вектора плотности тока при облучении газовой среды коллимированным импульсом гамма-квантов при выбранных параметрах численного эксперимента. Обоснована модель источника — дельта-импульс тока, бегущий по линии со скоростью света.

Автор благодарит В.В. Борисова за многочисленные полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 99-02-16893).

## Список литературы

- [1] *GEANT User's Guide*. CERN DD/EE/83-1. 390 с.
- [2] *Hillion P.J.* // *Math. Phys.* 1988. Vol. 29 (8). P. 2219–2222.
- [3] *Hillion P.J.* // *Math. Phys.* 1990. Vol. 31 (8). P. 1939–1941.
- [4] *Overfelt P.L.* // *J. Opt. Soc. Am. A.* 1997. Vol. 14 (5). P. 1087–1091.
- [5] *Overfelt P.L., Kenney C.S.* // *Int. Simp. Electr. Theor. Proc.* 1998. P. 802.
- [6] *Borisov V.V., Utkin A.B.* // *Phys. A: Math. Gen.* 1993. Vol. 26. P. 4081–4085.
- [7] *Borisov V.V., Utkin A.B.* // *J. Phys. A: Math. Gen.* 1994. Vol. 27. P. 2587–2590.
- [8] *Borisov V.V., Simonenko I.I.* // *Can. J. Phys.* 1997. 75 (8). P. 573–579.
- [9] *Longmire C.L.* // *IEEE Trans. EMC Comp.* 1978. Vol. 20 (1). P. 3–13.
- [10] *Karzas W.J., Letter R.* // *Phys. Rev. B.* 1965. Vol. 137 (5). P. 1369–1378.
- [11] *Brittingham N.* // *J. Appl. Phys.* 1983. Vol. 54. P. 1179–1189.
- [12] *Ф.Ф. Валиев, В.В. Борисов* // *Междун. конф. по ядерной физике*. СПб., 2000. С. 379.