

# Программная платформа Blender 3D как среда динамического моделирования полей гамма-излучения

С помощью комплекса Blender 3D разработаны программы динамического моделирования радиационной обстановки в режиме реального времени в трехмерной виртуальной среде по известному распределению активности радионуклидов в окружающем пространстве. Компьютерная визуализация взаимодействия излучения с веществом выполняется путем сопоставления ионизирующего излучения с видимым светом, устанавливая однозначное соответствие энергии спектральной линии гамма-излучения нуклида и длины волны видимого света. Это позволяет подключить зрение к анализу радиационной обстановки и сократить время принятия решений при работах на радиационно опасных объектах.

**Ключевые слова:** процессы взаимодействия гамма-излучения с веществом, мощность амбиентного эквивалента дозы, мощность воздушной кермы, визуализация, динамическое моделирование, объемные шейдеры, пункт временного хранения радиоактивных отходов, яркость объекта.

Ю.Н.Брагин<sup>1</sup>, К.А.Чижов<sup>1</sup>,  
Е.В.Клочкова<sup>1</sup>, А.И.Ксенофонтов<sup>2</sup>,  
А.А.Болотов<sup>1</sup>, Е.Н.Жирнов<sup>1</sup>,  
И.К.Теснов<sup>1</sup>, А.С.Галузин<sup>1</sup>,  
Ю.В.Абрамов<sup>1</sup>, А.В.Симаков<sup>1</sup>,  
В.Г.Барчуков<sup>1</sup>, А.Г.Цовьянов<sup>1</sup>,  
В.П.Крючков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна», г. Москва

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

### Список сокращений

- КИРО – комплексное инженерно-радиационное обследование;
- МАЭД – мощность амбиентного эквивалента дозы;
- МВК – мощность воздушной кермы;
- МД – мощность дозы;
- ММК – метод Монте-Карло;
- МОК – Международная осветительная комиссия;
- МЭД – мощность эквивалентной дозы;
- ОИАЭ – объект использования атомной энергии;
- ПВХ РАО – пункт временного хранения радиоактивных отходов;
- ПО – программное обеспечение;
- ППА – плотность поверхностной активности;
- ППЗ – плотность поверхностного загрязнения;
- РО – радиационная обстановка;
- СЗЗ – санитарно-защитная зона;
- ТРО – твердые радиоактивные отходы;
- ICRU – Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям;
- ЖРО – жидкие радиоактивные отходы;
- ИИ – ионизирующее излучение;
- ИИИ – источник ионизирующего излучения.

В последние 15–20 лет появились программные инструменты, работающие в режиме реального времени, которые предназначены для динамического моделирования радиационной обстановки и планирования последовательности действий в трехмерной (3D) виртуальной производственной среде. Примером может служить программа HVRC VRdose (другое название – Halden Planner) [1], которая позволяет решать задачу восстановления поля мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) по известному распределению активности радионуклидов в окружающем производственном пространстве. Тем самым становится возможным выполнение прогностических оценок индивидуальных и коллективных доз облучения персонала при планировании радиационно опасных работ.

Согласно принципу ALARA, при планировании радиационно опасных работ должны быть рассмотрены различные варианты их выполнения для выбора варианта с причинением наименьшего ущерба занятому в этих работах персоналу [2].

В частности, программа Halden Planner использовалась на пункте временного хранения радиоактивных отходов (ПВХ РАО) [3], где наряду с активностью, диспергированной по поверхности промплощадки (поверхностные распределенные источники), нужно было рассматривать заглубленные в почву источники излучения, а также локальные источники излучения, расположенные непосредственно на поверхности промплощадки. Если первые возникали в результате протечек жидких радиоактивных отходов (ЖРО) из мест хранения в почву, то вторые представляли собой контейнеры с твердыми радиоактивными отходами (ТРО) или непосредственно крупногабаритные ТРО, расположенные на площадке. Особенности радиационных полей, сформированных заглубленными источниками и кластерами компактных наземных источников ионизирующих излучений (ИИИ), описаны в работе [3].

При всех своих достоинствах программа Halden Planner имеет ряд недостатков: использование факторов накопления для бесконечной среды, учет вклада рассеянного излучения (альбеда) от окружающих предметов. В связи с этим для моделирования радиационной обстановки (РО) по известной локализации активности в/на производственных объектах предлагается использовать программный комплекс Blender 3D [4]. Данный комплекс содержит исчерпывающий набор программных инструментов, необходимых для обеспечения всей технологической цепочки создания динамической реалистичной компьютерной визуализации, в частности, процессов взаимодействия излучения с веществом.

В настоящей работе представлено сравнение результатов моделирования радиационных полей с помощью Blender 3D и расчетов, выполненных с помощью программы Geant4 [5]. Предлагаемый подход рассматривается авторами как альтернатива аналитическим методам и методу Монте-Карло (ММК). В первом случае рассматриваемая световая модель не ограничена в реализации сколь угодно сложных геометрий расчетов, а во втором существенно превосходит ММК по скорости выполнения расчетов взаимодействия излучения с веществом.

Как известно, человек с помощью органов чувств не может адекватно оценить уровень воздействия на него радиации, т. е. последняя выступает в роли невидимого психологического стрессора. Виртуальная реальность должна перевести РО из разряда невидимых психологических стрессоров [6] в непосредственно воспринимаемый стрессор, снижая тем самым неопределенности в оценке радиационного риска тех или иных производственных операций.

## Материалы и методы

### *Исходные положения*

При моделировании были приняты следующие основные требования и ограничения для разрабатываемого программного продукта:

- рассматриваются только гамма-кванты, испускаемые радионуклидами, т. е. гамма-кванты с начальной энергией не более 2 МэВ;
- в силу ограниченности калибровки по глубине рассматриваются только геометрии облучения, которые приводят к ослаблению мощности воздушной кермы (МВК) за счет установки различных защитных экранов и т. п. не более чем в сто раз;
- источники ионизирующего излучения (ИИИ) могут быть любой формы с поверхностным или объемным (не обязательно равномерным) распределением активности;
- были выбраны пять радионуклидов:  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  +  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  и  $^{152}\text{Eu}$ , в сумме дающих 22 спектральные линии.

В качестве материалов защиты рассматривались вода, бетон, железо и свинец, характеристики которых брались из работы [7]. В программе из процессов взаимодействия гамма-излучения с веществом учитывались только фотоэффект и комптоновское рассеяние.

### *Световая (цветовая) модель взаимодействия гамма-квантов с веществом*

Профессиональное свободное и открытое программное обеспечение для создания трехмерной компьютерной графики Blender 3D обладает большими вычислительными возможностями как по набору алгоритмов, так и по их оптимизации. При создании световой модели применялись следующие подходы:

**Табл.1.** Аналогии при сопоставлении процессов взаимодействия гамма-квантов с веществом со световой моделью Blender 3D Cycles.

№ п/п	Взаимодействие гамма-квантов с веществом	Световая модель Blender 3D Cycles
1	Спектральная линия гамма-излучения радионуклида	Видимый свет определенной длины волны
2	Мощность воздушной кермы	Яркость объема, изотропно рассеивающего падающий на него свет
3	Источник гамма-излучения	Объект, испускающий свет
4	Защита от излучения или любой фрагмент здания (стена, пол, потолок), оборудование	Объект, поглощающий и рассеивающий свет в объеме
5	Материал: железо, бетон, вода, свинец с коэффициентами рассеяния и поглощения гамма-квантов	Материал (шейдер) с определенной плотностью и коэффициентом поглощения и рассеяния света
6	Детектор гамма-излучения	Рассеивающий объем в виде сферы с размерами и плотностью сферы ICRU [8]
7	Для регистрации необходим наблюдатель с дозиметром	Используется камера наблюдателя

- использование аналогии прохождения видимого света и ионизирующего излучения через вещество без каких-либо дополнительных расчетов;
- выполнение настройки поглощающих, рассеивающих и излучающих свойств среды вместо расчетов мощности воздушной кермы (МКВ);
- управление программой Blender 3D по сценариям, написанным на языке Python.

Развивая аналогию между фотонами видимого света и гамма-квантами, необходимо перечислить объекты реального мира в парадигме воздействия ИИ на окружающую среду, сопоставляя их с возможностями моделирования в Blender 3D (табл.1).

Длину волны видимого света, зрительно воспринимаемую как цвет, логично сопоставить с энергией гамма-кванта спектральной линии излучения радионуклида.

В программе Blender 3D рассматриваются два вида источников света: лампы и другие объекты, испускающие свет. Формы ламп ограничены двумя вариантами: сфера и плоскость. Формы эмиссионных объектов никак не ограничены: бочки, контейнеры, фрагменты трубопроводов и т. д. Поскольку ИИИ имеют разные формы, то в качестве их аналогов, очевидно, нужно использовать объекты, испускающие свет.

Защитные экраны от гамма-излучения также могут иметь различные формы и состоять из различных материалов, в которых происходит взаимодействие излучения с веществом. Наиболее сложным оказалось найти аналогию детекторам излучений. Blender 3D, характеризуя свет, оперирует двумя величинами: освещенностью и яркостью. Наш глаз непосредственно реагирует на яркость  $L$  источника. Пусть светящаяся площадка поверхности  $dS$  излучает световой поток  $d\Phi$  в телесный угол  $d\Omega$ , направление оси симметрии которого составляет угол  $\vartheta$  с нормалью  $\vec{n}$  к излучающей поверхности. Тогда величина  $L$  называется яркостью светящейся поверхности:

$$L = \frac{I}{dS \cdot \cos \vartheta}, \quad (1)$$

где  $I = d\Phi/d\Omega$  сила света источника, т. е. испускаемый в заданном направлении световой поток, приходящийся в элементарный телесный угол  $d\Omega$ . В программе Blender 3D – это характеристика на входе в камеру, которая вычисляется для каждого пикселя изображения.

Освещенность  $E$  – это количество света, исходящего от всех источников, которое попадает на определенную площадку:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}, \quad (2)$$

где  $d\Phi$  – световой поток, падающий на поверхность площади  $dS$ .

Интуитивно ясно, что освещенность является удачным аналогом МВК. Между величинами освещенности и яркости существует многообразная и неоднозначная связь, и задача заключается в выборе таких материалов и объектов, которые обеспечат постоянное соотношение между  $E$  и  $L$ . Такая однозначность достигается, если использовать только источники света, подчиняющиеся закону Ламберта [9].

Светимостью  $M$  излучающей площадки  $dS$  называется суммарный световой поток  $\Phi$ , который она излучает в полусферу:

$$M = \frac{\Phi}{dS}. \quad (3)$$

Согласно закону Ламберта, яркость идеально рассеивающей свет (диффузной) поверхности одинакова во всех направлениях. Такие источники получили название ламбертовых, и для них светимость и яркость прямо пропорциональны:

$$M = \pi \cdot L. \quad (4)$$

Если рассматривать сферическую поверхность, излучающую во всех возможных направлениях, то получим:

$$M = 2\pi \cdot L. \quad (5)$$

Светимость  $M$  характеризует свечение поверхности, т. е. поток, исходящий от единицы поверхности; освещенность  $E$  характеризует освещение поверхности, т. е. поток, приходящий на единицу поверхности. Очевидно, что между этими величинами существует пропорциональная связь:

$$M = f \cdot E, \quad (6)$$

где коэффициент  $f$  показывает долю падающего потока света, перешедшую в исходящий поток света в результате диффузного отражения или рассеяния. В итоге получаем, что для ламбертова источника света имеют место соотношения:

$$L = f \cdot E/\pi - \text{для площадки, } L = f \cdot E/2\pi - \text{для сферы.} \quad (7)$$

Таким образом, величины освещенности и яркости являются однозначно связанными, а коэффициент  $f$  можно определить опытным путем.

Освещенность  $E$  от точечного источника находят по соотношению:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \phi, \quad (8)$$

где  $I$  – сила света;  $r$  – расстояние до источника света;  $\phi$  – угол падения лучей света относительно нормали к поверхности.

Выражение (8) напоминает выражение для МВК для точечного изотропного источника гамма-излучения:

$$\dot{K} = \frac{A\Gamma_{\delta}}{r^2}, \quad (9)$$

где  $A$  – активность источника,  $\Gamma_{\delta}$  – его керма-постоянная [10].

**Табл.2.** Определение величин, входящих в выражение (10).

Параметр	Определение	Размерность
$\dot{K}$	Мощность воздушной кермы	мкГр/ч
$L$	Яркость пробного тела	кд/м <sup>2</sup>
$E_{0i}$	Начальная энергия гамма-кванта $i$ -й спектральной линии	МэВ
$\Gamma_{Ki}^*$	Нормализованная дифференциальная керма-постоянная	аГр·м <sup>2</sup> /(с·Бк)
$A$	Активность радионуклидного источника	МБк
$\mu_a, \mu_s$	Массовый коэффициент поглощения или рассеяния излучения	м <sup>2</sup> /кг
$\rho$	Плотность материала защиты	кг/м <sup>3</sup>
$S$	Площадь источника света/гамма-излучения	м <sup>2</sup>
$V$	Объем источника света/гамма-излучения	м <sup>3</sup>
$R$	Радиус-вектор в точку, где определяется МВК/освещенность	м
<i>Strength</i>	Сила света источника на единицу его поверхности	Вт/м <sup>2</sup>
<i>Density</i>	Плотность материала защиты с учетом $\mu_a$ или $\mu_s$	1/м
<i>Anisotropy</i>	Коэффициент анизотропии рассеяния	-

Из сравнения соотношений (8) и (9) следует, что эти выражения будут подобны только для поверхностей, перпендикулярных к направлению на источник света. В этом случае необходимо рассматривать сферический объем, аналогичный сфере ICRU [8], равномерно рассеивающий падающий на него свет.

### Основная часть

Сопоставим энергию гамма-квантов в диапазоне 0,04–2,0 МэВ с длиной волны видимого света в диапазоне длин волн 380–780 нм, запишем связь между мощностью воздушной кермы и яркостью детектора излучений в виде:

$$\dot{K}(\vec{r}, \Gamma_{Ki}^*, A, \mu, \rho) = L(\vec{r}, S, Strength, Density, Anisotropy), \quad (10)$$

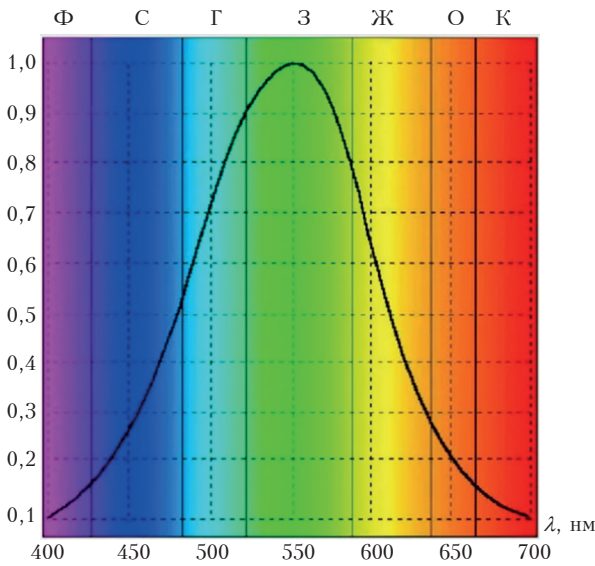
где определения входящих в формулу величин представлены в табл.2.

Параметры в трех нижних строках табл.2 относятся к программе Blender 3D, в которой первоначальная энергия гамма-квантов моделируется цветом, анизотропией рассеяния гамма-квантов, а уменьшение энергии гамма-квантов смещением первоначального цвета в красную область спектра. Инструментарий Blender 3D, использованный в настоящей работе, подробно описан в работе [11].

### Моделирование гамма-излучения по отдельным спектральным линиям

При работе с Blender 3D необходимо принимать во внимание относительную спектральную чувствительность глаза человека, т. е. зрительное восприятие энергии света (цвета).

Чувствительность глаза человека  $\nu(\lambda)$  к свету различной длины волны можно охарактеризовать кривой видности [9], представленной на рис.1. Величина относительной чувствительности глаза обратно пропорциональна мощности монохроматического излучения, дающего одинаковые зрительные ощущения.



**Рис.1.** Спектральная чувствительность глаза человека  $v(\lambda)$  (кривая видности) в относительных единицах.

Несмотря на субъективность таких оценок, их воспроизводимость достаточно хорошая. Кривая видности имеет максимум при длине волны  $\lambda = 555$  нм, так что для одинаковых зрительных ощущений для света с  $\lambda = 650$  нм требуется мощность примерно в 5 раз большая.

Казалось бы, отмеченная особенность Blender 3D – чувствительность глаза человека к свету различной длины волны порождает трудности для реализации аналогии «видимый свет – гамма-излучение». Однако все обстоит наоборот, поскольку можно использовать данную особенность Blender 3D для проводимой аналогии.

Действительно, формула (8) освещенности площадки от точечного источника света принимает вид:

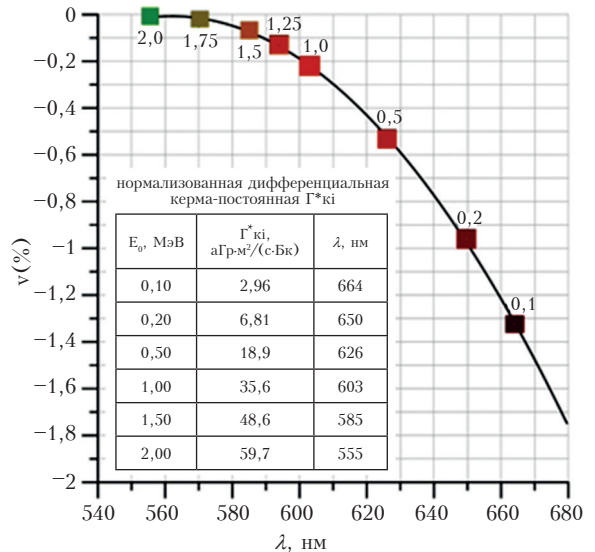
$$E = \frac{I}{r^2}. \tag{11}$$

Если вместо площадки, на которую падает свет, перейти к освещенности сферы  $E$  и далее к яркости сферы  $L$ , определяемой по соотношению (7), получим выражение:

$$L = \left(\frac{f}{2\pi}\right) \cdot \frac{I}{r^2}, \tag{12}$$

где величину  $I$ , отвечающую за энергетическую составляющую яркости, можно считать пропорциональной активности точечного источника гамма-излучения.

Коэффициент  $(f/2\pi)$  отвечает за чувствительность восприятия света данной длины волны. Отсюда, сопоставляя длину волны видимого света с начальной энергией гамма-кванта  $E_0$ , так, чтобы чувствительность к свету  $v(\lambda)$  была пропорциональна нормализованной дифференциальной керма-постоянной



**Рис.2.** Длины волн спектральных линий радионуклидов по кривой видности и по нормализованным дифференциальным керма-постоянным  $\Gamma_{Кт}^*$ . По оси ординат отложен логарифм спектральной чувствительности  $v(\lambda)$ . Числа у маркеров цвета – энергии соответствующих спектральных линий в МэВ.

$\Gamma_{Ki}^*$  для рассматриваемой начальной энергии гамма-кванта  $E_0$ , можно выразить яркость сферы следующим образом:

$$L = (\text{const} \cdot \Gamma_{Ki}^*) \frac{A}{r^2} \quad (13)$$

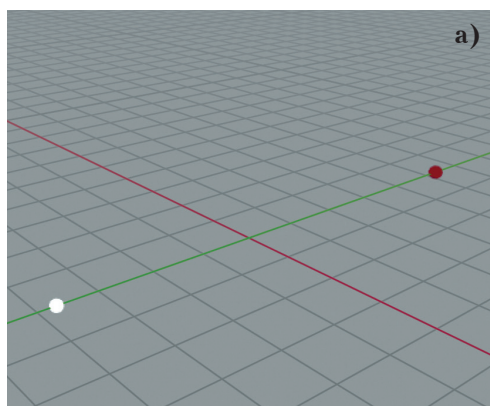
При этом величина  $\text{const} \cdot \Gamma_{Ki}^*$  будет одинаковой для всех радионуклидов, что иллюстрирует рис.2, где приведены значения нормализованных дифференциальных керма-постоянных нескольких спектральных линий радионуклидов и соответствующие им длины волн видимого диапазона света, и показана только нисходящая ветвь зависимости  $\nu(\lambda)$  (кривой видности). Соответствие между нормализованной дифференциальной керма-постоянной и длиной волны устанавливалось следующим образом: нисходящая ветвь  $\nu(\lambda)$  аппроксимировалась квадратичной зависимостью, значения  $\Gamma_{Ki}^*$ , нормированные на максимальное значение керма-постоянной для гамма-излучения с энергией 2 МэВ, приравнивались к значениям спектральной чувствительности  $\nu(\lambda)$ , и затем по установленной квадратичной зависимости переходили от спектральной чувствительности к длине волны видимого света. На рис.2 показаны длины волн видимого света, соответствующие отдельным спектральным линиям гамма-излучения, а также монокромные цвета, которые соответствуют этим длинам волн.

Таким образом, получено взаимно однозначное соответствие длины волны видимого света и энергии гамма-кванта спектральных линий радионуклидов, так что яркость  $L$  пробного тела (детектора излучений) становится численно равной МВК от всех действующих радионуклидов в месте размещения пробного тела.

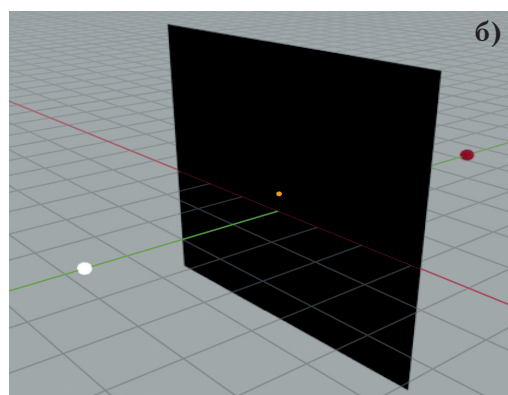
### Калибровка световой модели

Величина, показывающая, во сколько раз требуется уменьшить характеристики поля излучения (интенсивность излучения, мощность дозы и т. д.) за защитой, является кратностью ослабления излучения  $k$  [7,10].

В работе была использована схема калибровки в соответствии с параметрами виртуальных объектов (табл.2). Таких параметров, как уже говорилось выше, всего три: *Strength*, *Density* и *Anisotropy*. Параметр *Strength* отвечает за силу света источника на единицу его поверхности и



а)  $\dot{K} = (A\Gamma_0)/r^2$



б)  $\dot{K} = (A\Gamma_0)/r^2 \cdot \exp(-\mu d) B_D^{\text{cap}}(E_0, \mu d, Z)$

**Рис.3.** Два вида геометрии калибровки в Blender 3D: а) точечный изотропный источник в вакууме, б) геометрия «широкого» пучка.

**Табл.3.** Калибровка сферического поверхностного источника света, моделирующего точечный изотропный источник гамма-излучения. Диаметр источника 0,5 м, активность 1 МБк.

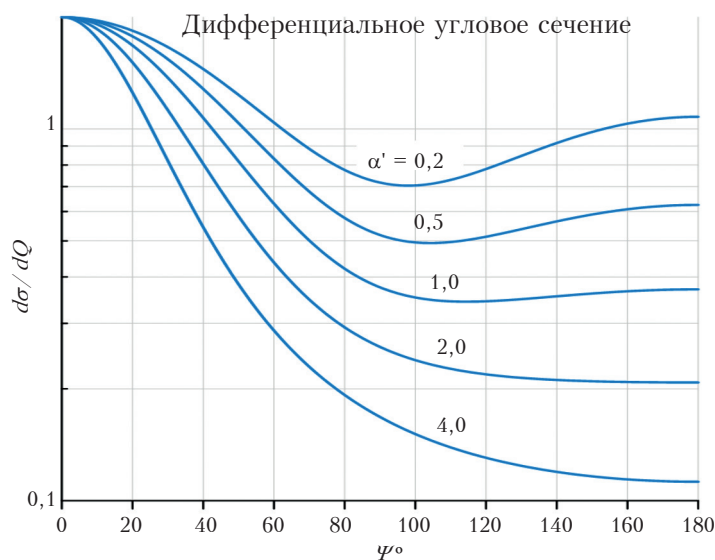
Радионуклид	$\Gamma_{\delta}$ , аГр·м <sup>2</sup> /(с·Бк)	$S_{ист}$ , м <sup>2</sup>	Расстояние, м	МВК, мкГр/ч	$1/C_1$	$L$
<sup>137</sup> Cs + <sup>137m</sup> Ba	21,3	0,049	5	3,08	<b>5620</b>	3,08

должен быть сопоставлен с плотностью поверхностной активности источника. Параметр *Density* представляет собой произведение плотности материала защиты или конструкционного материала на массовый коэффициент рассеяния или поглощения этим материалом гамма-излучения рассматриваемой энергии. Параметр *Anisotropy* отвечает за анизотропию комптоновского рассеяния гамма-квантов.

Для калибровки использовались два вида геометрии (рис.3). В первом случае (слева) детектор регистрирует величину мощности воздушной кермы, создаваемой фотонами расположенного в вакууме точечного изотропно излучающего источника данного радионуклида. Во втором случае, в геометрии «широкого пучка» (справа) детектор регистрирует излучение, проходящее через защиту. Поправки на ослабление излучения за счет поглощения в защитном слое  $d$  вычисляются аналитически. Зависимость кратности ослабления от толщины  $d$  вычисляется путем деления величины МВК для толщины защиты  $d$  на значение МВК для  $d = 0$ . Используя величину кратности ослабления  $k$ , получим зависимость от толщины защиты дозового фактора накопления  $B_D^{бар}$  ( $\mu d$ ) =  $\exp(-\mu d)/k$ .

Однако для численных расчетов при калибровке необходимы факторы накопления для ограниченной защиты (с приближением можно использовать поправки Бергера для барьерной защиты [7,10]). Кроме того, такие расчеты не учитывают зависимость фактора накопления от взаимного расположения составляющих в системе «источник–защита–детектор» [12]. Поэтому при калибровке были использованы результаты, полученные с помощью ММК.

Калибровка параметра *Strength* по активности источника для стандартной сферы ICRU [8] производилась в геометрии, показанной слева на рис.3а, на основании численного равенства между величинами  $\dot{K}(r)$  и  $L(r)$ , которые определяются согласно выражениям (9,13):



**Рис.4.** Дифференциальное угловое сечение комптоновского рассеяния в томсоновских единицах.

$$L(r) = \frac{C_I \cdot S \cdot \Gamma_\delta \cdot \text{Strength}}{r^2}, \quad (14)$$

где  $C_I$  – калибровочный коэффициент, численное значение которого определяется в результате калибровки; остальные величины, входящие в формулу (14), определены в табл.2. Из численного равенства  $\dot{K}(r) = L$  следует, что сила света равна:

$$\text{Strength} = A / (C_I \cdot S). \quad (15)$$

Калибровка была выполнена для радионуклида  $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$ . Значения активности, расстояния от источника до детектора, площади источника, кермы-постоянной радионуклида, а также силы света, при которой достигается равенство  $\dot{K}(r) = L$ , указаны в табл.3. При калибровке параметра *Anisotropy* по начальной энергии гамма-излучения в программе Blender 3D для описания рассеяния фотонов в объемах использовалась фазовая функция Хеньи и Гринштейна [13],

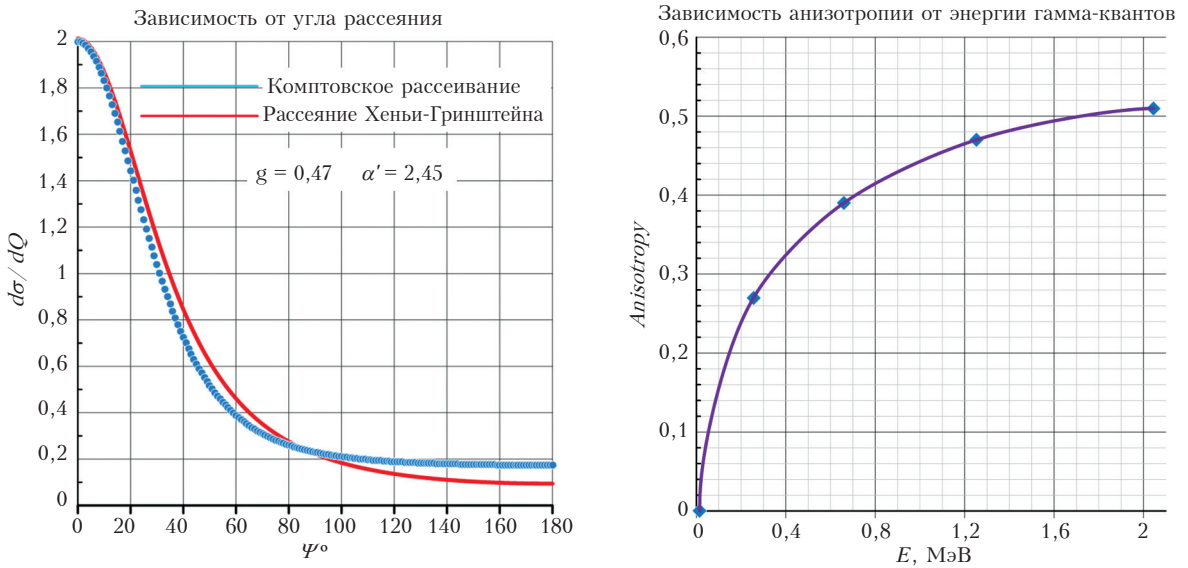


Рис.5. Аппроксимация углового сечения комптоновского рассеяния фазовой функцией Хеньи-Гринштейна.

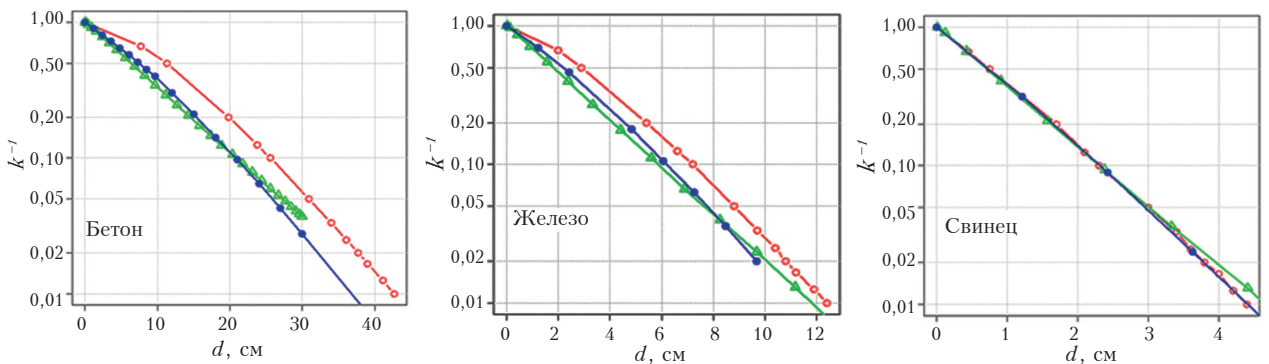


Рис.6. Калибровка модели по  $k$  – кратности ослабления гамма-излучения  $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$  для бетона, железа и свинца.

$\triangle$  – Blender 3D,  $\bullet$  – GEANT4,  $\circ$  – универсальные таблицы Н.Г. Гусева [10].

**Табл.4.** МВК в месте нахождения детектора в первом фрейме анимации, мкГр/ч.

№ п/п	Источники	Свободное пространство	Помещение со стенами, полом, колоннами и выгородкой
1	Бочка с раствором $^{137}\text{Cs}$	0,07	0,02
2	Контейнер с р/а веществами	0,16	0,02
3	Пенал	0,31	0,05
4	Фрагмент оборудования	0,32	0,42 (5,62)
5	Все источники	0,89	0,54

описывающая рассеяние межзвездной пыли, с параметром *Anisotropy* и с угловым распределением интенсивности рассеянной компоненты оптического или электромагнитного излучения вида:

$$\beta_{HG}(g, \psi) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \psi)^{3/2}} \quad (16)$$

с нормировкой:

$$2\pi \int_{-1}^1 \beta_{HG}(g, \psi) d \cos \psi = 1, \quad (17)$$

где  $\psi$  – угол рассеяния фотона;  $g$  – среднее значение косинуса угла рассеяния, который регулирует относительные величины прямого и обратного рассеяния:  $g = 0$  соответствует изотропному рассеянию, при  $g \rightarrow 1$  прямое и при  $g \rightarrow -1$  обратное рассеяние.

Программа Blender 3D не допускает использование другой функции для описания рассеяния фотонов, однако можно подобрать такие значения параметра анизотропии рассеяния  $g$ , чтобы аппроксимировать комптоновское рассеяние.

Дифференциальное угловое сечение комптоновского рассеяния гамма-кванта в веществе выражается формулой Клейна-Нишины-Тамма [10] и показано на рис.4:

$$\frac{d\sigma(\alpha', \psi)}{d\Omega} = \frac{zr_e^2}{2} [1 + \alpha' (1 - \mu_s)]^{-2} \left[ 1 + \mu_s^2 + \frac{(\alpha')^2 (1 - \mu_s)^2}{1 + \alpha' (1 - \mu_s)} \right] \text{ см}^2/\text{ср}, \quad (18)$$

где  $\psi$  – угол рассеяния;  $\mu_s = \cos \psi$ ;  $\alpha'$  – начальная энергия гамма-кванта в единицах  $m_0 c^2$ . Тогда энергия  $^{137}\text{Cs}$  равна 1,29, а энергия двух спектральных линий  $^{60}\text{Co}$  – соответственно 2,29 и 2,60.

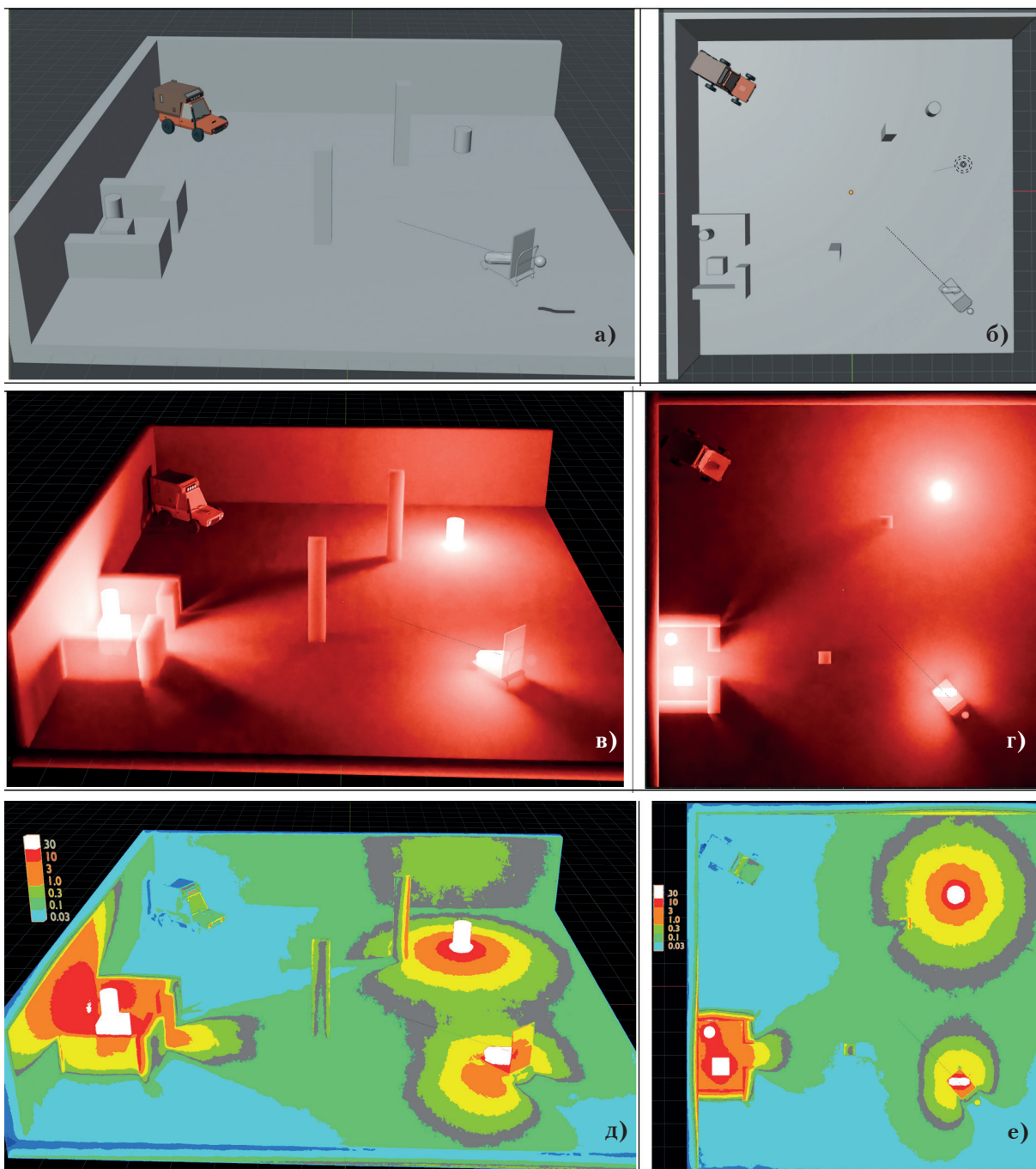
Аппроксимация распределения (18) распределением Хеньи-Гринштейна была выполнена с помощью программы Golden software Grapher [14] для углового сечения комптоновского рассеяния без множителя  $\frac{zr_e^2}{2}$  для пяти значений начальной энергии гамма-квантов  $\alpha'$ , равных: 0,03; 0,5; 1,29; 2,45 и 4,0.

Результаты аппроксимации для  $\alpha' = 2,45$  представлены на рис.5 слева. Затем была выполнена интерполяция значений параметра анизотропии и получена зависимость этого параметра от начальной энергии гамма-квантов, которая приведена на рис.5 справа. Представленные на рис.5 результаты аппроксимации позволяют сделать вывод, что угловое сечение комптоновского рассеяния вполне удовлетворительно аппроксимируется распределением Хеньи-Гринштейна.

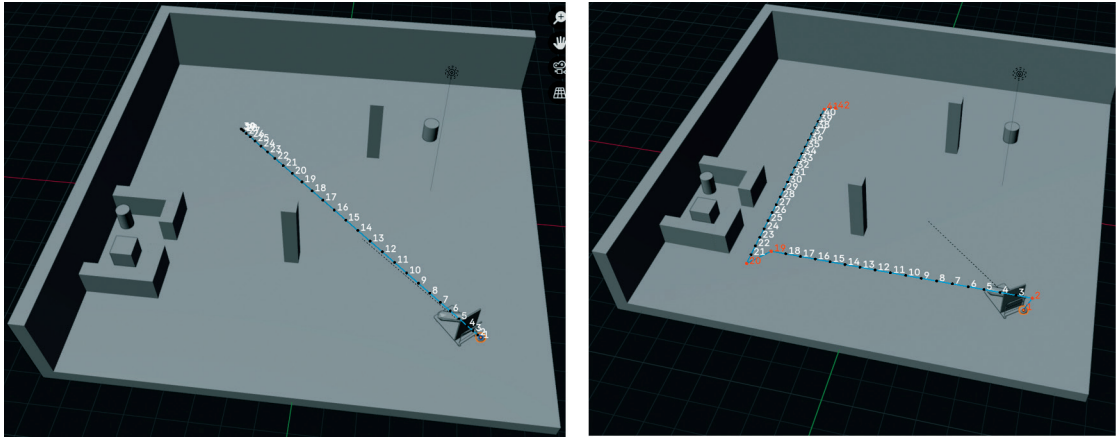
В результате выполнения данной процедуры были определены значения параметра *Anisotropy*, который используется в Blender 3D, для каждой спектральной линии излучения радионуклидов.

Калибровка ослабления гамма-излучения выполнялась по модели, представленной на рис.3б (справа). Толщина защиты последовательно изменялась от нуля до максимальных значений. Для калибровки в этом случае достаточно использовать только зависимость мощности кермы

$\dot{K}(d)$  от толщины, а программа Blender 3D определяет коэффициенты пропорциональности параметра *Density*. Графически зависимость обратной величины кратности ослабления МВК от толщины  $d$  слоя ограниченной защиты для гамма-излучения  $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$  для бетона, железа, свинца представлена на рис.6.



**Рис.7.** Три режима изображения первого фрейма анимации по маршруту перемещения тележки с РАО. Режим изображения – «сплошной»: вид из камеры – (а), вид сверху – (б); режим изображения «рендер»: вид из камеры – (в), вид сверху – (г); режим изображения «тепловая карта»: вид из камеры – (д), вид сверху – (е). Цветовая градуировка шкалы мощности воздушной кермы дана в мкГр/ч.



Маршрут №1. Воздушная керма – 0,0084 мкГр    Маршрут №2. Воздушная керма – 0,0125 мкГр

**Рис. 8.** Два маршрута перемещения тележки с фрагментом оборудования с фиксированной скоростью.

Для калибровки световой модели было проведено сравнение с результатами расчетов по программе GEANT4, использующей ММК [5,15]. Были проведены расчеты кратности ослабления гамма-излучения с оценкой погрешности 0,2%. Кроме этого, проводилось сравнение с зависимостью кратности ослабления гамма-излучения от толщины защиты по данным универсальных таблиц Н.Г. Гусева [10].

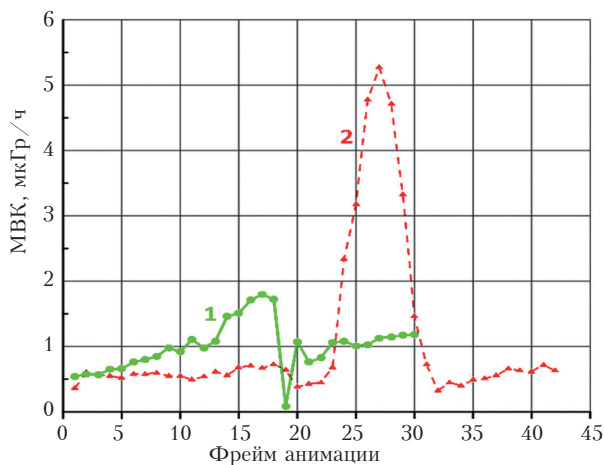
На рис.6 зеленым цветом обозначены результаты расчетов по программе Blender 3D, красным – данные из универсальных таблиц [10], синим цветом – расчеты по программе GEANT4 [16]. Необходимо обратить внимание на то, что коэффициенты пропорциональности определялись по зависимости кратности ослабления излучения  $k$  для бетона.

Таким образом, на основе калибровки световой модели прохождения гамма-излучения через вещество были подобраны коэффициенты пропорциональности для источников света, поглощающих свойств защитных и конструкционных материалов. Отметим, что выбранная световая модель не имеет свободных параметров для дополнительной калибровки таких эффектов, как альbedo от окружающих предметов или рассеянного излучения в воздухе.

### *Пример динамической световой модели*

Рассматривается перемещение на тележке поверхностно загрязненного фрагмента оборудования в помещении площадью  $16 \times 16 \text{ м}^2$  (рис.7). Стены и пол помещения сделаны из бетона толщиной 0,5 м. Фрагмент оборудования помещен на железную тележку. Геометрия работника, перевозящего фрагмент, моделируется стандартной сферой ICRU, которая отделена от фрагмента оборудования защитным листом свинца площадью  $1,2 \times 0,8 \text{ м}^2$  и толщиной 3 см.

В помещении также находятся еще три источника излучения: бочка с раствором, контейнер и пенал с РАО. Для моделирования заглубления ИИ большая часть пенала (примерно 3/4) расположена ниже уровня пола. Во всех четырех случаях источником гамма-излучения является  $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$ . Бочка и контейнер находятся внутри выгородки из бетона, толщина стен которой равна 0,5 м. В помещении имеются две колонны из бетона с прямоугольным сечением  $0,5 \times 0,5 \text{ м}^2$ . Все источники считаются поверхностно загрязненными с плотностью поверхностного загрязнения (ППЗ), равной  $1 \text{ МБк/м}^2$ .



**Рис.9.** Профили МВК по маршрутам № 1 (зеленый) и № 2 (красный).

кающему ИИ. Поскольку световая модель подгоняется под каноны взаимодействия гамма-квантов с веществом, эта модель не обязана выглядеть гармонично с точки зрения восприятия человеческим зрением, а скорее наоборот. К тому же человеческий глаз довольно плохо различает градации яркости. По этой причине удобно пользоваться для отображения яркости предметов так называемой «тепловой картой». Была подготовлена анимация из 30 фреймов с длительностью показа каждого кадра в 1 секунду, демонстрирующая перемещение тележки с фрагментом оборудования из правого ближнего угла помещения в левый дальний угол, где стоит автомобиль, показанный для лучшего восприятия масштаба помещения («маршрут» № 1).

На рис.7 показан первый, начальный кадр анимации. Виртуальная реальность позволяет оценить вклад каждого из источников ИИ в МВК по отдельности в месте расположения детектора, см. табл.4. МВК представлена в таблице в двух вариантах: источники и детектор в свободном пространстве и в помещении со стенами и полом. Это позволяет оценить защитную роль и вклад альbedo-излучения от этих конструкций в точке детектирования. Так, выгородка снижает МВК в точке детектирования в три с половиной раза, бочка и контейнер – в восемь раз, а наличие пола снижает дозу от пенала в шесть раз. В случае фрагмента оборудования на тележке МВК для случая без пола и стен меньше, чем при наличии бетонного пола, что является следствием альbedo гамма-квантов от пола. В четвертой строке табл.4 в скобках показана МВК от фрагмента оборудования в случае, если свинцовый экран будет отсутствовать.

Была также выполнена анимация альтернативного «маршрута» № 2. Оба маршрута показаны на рис.8 с номерами фреймов анимации. Профили МВК при движении по маршрутам № 1 и № 2 представлены на рис.9. МВК по маршруту № 2 оказалась больше, чем по маршруту № 1 примерно на 50%.

На рис.9 можно видеть, что МВК на большей части фреймов маршрута № 2 ниже, чем для фреймов маршрута № 1, и в случае, если МВК для фреймов 24–30 маршрута № 2 уменьшить за счет использования локальной защиты, полная доза излучения по маршруту № 2 станет меньше, чем по маршруту № 1.

Как можно видеть на рис.7, при описании примера световой модели используется два вида: «вид сверху» и «вид из камеры», а также три режима изображения: «сплошной», «рендер» и «тепловая карта». Каждый из использованных видов имеет свои преимущества и недостатки.

В первом случае хорошо видна геометрия сцены, второй случай является максимальным приближением к реальности, которую воссоздает световая модель, для которой МВК соответствует яркость пробного тела или детектора излучений. Мир световой модели – это мир полупрозрачных материалов и предметов, т. к. свет в нашем случае эквивалентен проникающему ИИ.

## Заключение

Создание световой модели для ОИАЭ должно базироваться на материалах проекта рассматриваемого объекта и данных радиационного контроля. Для ОИАЭ, подлежащих выводу из эксплуатации, в качестве исходных материалов для световой модели целесообразно использовать данные о параметрах радиационной обстановки, полученные в результате комплексного инженерного и радиационного обследования. Исходные материалы должны содержать необходимые для создания виртуальной модели данные, в том числе данные по МАЭД, удельной активности в помещениях, на площадках и в санитарно-защитной зоне, уровню и радионуклидному составу поверхностного загрязнения зданий, объемному распределению активности радионуклидов в материалах конструкций, суммарной и удельной активности отложений на внутренних поверхностях технологических систем, трубопроводов, оборудования и т. д. Коэффициенты для пересчета МВК в МАЭД следует брать из Публикации 74 МКРЗ.

Главным преимуществом созданной динамической световой модели взаимодействия гамма-излучения с веществом является выполнение подавляющей части операций в ней за счет функционала программы Blender 3D, в том числе:

- создание объектов виртуальной реальности, включающей модели промышленной площадки, зданий и сооружений, производственных механизмов, транспортных средств, инструментов, оборудования и т. д.;
- создание анимаций – динамических сценариев выполнения работ;
- учет поглощения и многократного рассеяния фотонов в конструкционных и защитных материалах.

Задача разработчика световой модели заключается в создании цифровых хранилищ моделей зданий и помещений, виртуальных транспортных средств, подъемных механизмов, инструментов, контейнеров, резервуаров и т. д. и, в последующей настройке, параметров источников излучения, конструкционных и защитных материалов. Содержимое этих хранилищ должно способствовать приданию создаваемым сценариям выполнения работ реалистичности, которая будет способствовать обучению персонала.

В настоящее время модель разработана для четырех защитных и конструкционных материалов: воды, бетона, железа и свинца, а также для пяти радионуклидов:  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$  и  $^{152}\text{Eu}$ . Четыре из пяти указанных радионуклидов доминируют в создании радиационной обстановки на ПВХ РАО, а радионуклид  $^{88}\text{Y}$  включен для демонстрации возможностей световой модели при максимально возможных энергиях гамма-квантов. Световая модель реализуется через настройки свойств защитных и конструкционных материалов, а также в настройках свойств поверхностных и объемных источников гамма-излучения. Никаких принципиальных ограничений для расширения списка радионуклидов или защитных и конструкционных материалов не существует.

Разработанная световая модель моделирования радиационной обстановки предлагается для использования при планировании защитных мероприятий во время выполнения радиационно опасных и аварийно-восстановительных работ. До практического применения целесообразно провести сравнительную оценку моделирования радиационной обстановки при использовании разработанной световой модели с результатами моделирования по ММК и с результатами оперативного радиационного контроля.

## Литература

1. I. Szoke, M.N. Louka, T.R. Bryntesen, J. Bratteli, S.T. Edvardsen, K.K. RoEitrheim, K. Bodor, «Real-time 3D radiation risk assessment supporting simulation of work in nuclear environments», *J. Radiol. Prot.*, vol. 34, pp. 389-416, 2014. URL: <https://doi.org/10.1088/0952-4746/34/2/389> (дата обращения: 20.08.2025).
2. K. Chizhov, I. Mazur, I. Kudrin, N. Shandala, A. Simakov, V. Kryuchkov, M.K. Sneve, I. Szoke, N.K. Mark, G.M. Smith, A. Krasnoschekov, A. Kosnikov, I. Kemsy, «3D simulation as a tool for improving the safety culture during the remediation at Andreeva Bay», *J. Radiol. Prot.*, vol. 34, no. 4, pp. 755-773, 2014.
3. K. Chizhov, Yu. Bragin, M.K. Sneve, N. Shandala, V. Seregin, K. Siegien, G.M. Smith, A. Ksenofontov, A. Kryanev, I. Tesnov, Yu. Shimansky, G. Goncharenko, V. Drozdovitch, V. Kryuchkov, «Further development and application of a method for assessing radionuclide surface activity distribution and source location based on measurements of ambient dose equivalent rate. Examples for Andreeva Bay, Chernobyl NPP and Istiklol», *J. Radiol. Prot.*, vol. 43, no. 4, 041506, 2023. Doi: [10.1088/1361-6498/ad005c](https://doi.org/10.1088/1361-6498/ad005c).
4. Филиппов С.В. Программная платформа Blender как среда моделирования объектов и процессов естественно-научных дисциплин // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 230. 42 с. Doi: [10.20948/prepr-2018-230](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-230).
5. Agostinelli, Sea, et al., «GEANT4 – a simulation toolkit», *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506.3, pp. 250-303, 2003.
6. Ларцев М.А., Метляева Н.А., Щербатых О.В. Пути совершенствования системы медицинского и психофизиологического обеспечения персонала объектов использования атомной энергии // Медицина катастроф. 2010. № 3. С. 34-37.
7. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с.
8. Публикация 103 Международной комиссии по Радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. Под общей ред. М.Ф. Киселева и Н. К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.
9. Ландсберг Г.С. Оптика. Учеб. пособие: Для вузов. 6-е изд., стереот. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. ISBN 5-9221-0314-8.
10. Защита от ионизирующих излучений: В 2 т. Т.1. Физические основы защиты от излучений: Учебник для вузов/Гусев Н.Г., Климанов В.А., Машкович В.П., Суворов А.П. Под ред. Гусева Н.Г. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989. 512 с.
11. Инструментарий к программе Blender. URL: <https://github.com> (дата обращения: 9.07.2025).
12. Лощаков И.И. Введение в дозиметрию и защита от ионизирующих излучений. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета. 2008. 102 с.
13. T. Binzoni, T.S. Leung, A.H. Gandjbakhche et. al. «The use Henyey-Greenshtein phase function in Monte Carlo simulations in biomedical optics», *Phys Med Biol.*, vol. 51(17), № 313-22, 2006, Sep. 7. Doi: [10.1088/0031-9155/51/17/N04](https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/17/N04).
14. [Goldensoftware.com>Product>Grapher](https://www.goldensoftware.com/Product/Grapher).
15. J.F. Carrier et al., «Validation of GEANT4, an object-oriented Monte Carlo toolkit, for simulations in medical physics», *Med Phys.*, vol. 31, no. 3, pp. 484-492, Mar. 2004. Doi: [10.1118/1.1644532](https://doi.org/10.1118/1.1644532).

16. Гетерогенная платформа «HybriLIT». URL: <http://hlit.jinr.ru/> (дата обращения: 20.08.2025).
17. РБ-159-19. Афанасьев И.А., Бочкарев В.В., Савин Д.А., Терешкин В.И., Щадилов А.Е., Чесноков А.В. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по проведению комплексного инженерного и радиационного обследования объекта использования атомной энергии». Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 ноября 2019 г. № 432. Введено в действие с 11 ноября 2019 г.

## Blender 3D Software Platform as An Environment for Dynamic Modeling of Gamma Radiation Fields

Bragin Yuri <sup>1</sup>, Chizhov Konstantin <sup>1</sup>, Klochkova Elena <sup>1</sup>, Ksenofontov Alexandre <sup>2</sup>, Bolotov Alexander <sup>1</sup>, Zhirnov Yevgeniy <sup>1</sup>, Tesnov Ivan <sup>1</sup>, Galuzin Alexander <sup>1</sup>, Abramov Yury <sup>1</sup>, Simakov Anatoly <sup>1</sup>, Barchukov Valeri <sup>1</sup>, Tsovyanov Aleksandr <sup>1</sup>, Kryuchkov Victor <sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

**Abstract.** Using the Blender 3D complex, programs have been developed for dynamic modeling of the radiation situation in real time in a three-dimensional virtual environment based on the known distribution of radionuclide activity in the surrounding space. Computer visualization of the interaction of radiation with matter is performed by comparing ionizing radiation with visible light, establishing a one-to-one correspondence between the energy of the spectral line of gamma radiation of a nuclide and the wavelength of visible light. This allows us to connect vision to the analysis of the radiation situation and reduce the time it takes to make decisions when working at radiation-hazardous facilities.

**Keywords:** *processes of interaction of gamma radiation with matter, ambient dose equivalent rate, air kerma rate, visualization, dynamic modeling, volume shaders, temporary storage facility for radioactive waste, object brightness.*

Ю.Н.Брагин <sup>1</sup> (с.н.с.), К.А.Чижов <sup>1</sup> (к.б.н., с.н.с.), Е.В.Клочкова <sup>1</sup> (с.н.с.), А.И.Ксенофонов <sup>2</sup> (к.ф.-м.н., с.н.с., доцент), А.А.Болотов <sup>1</sup> (к.т.н., в.н.с.), Е.Н.Жирнов <sup>1</sup> (к.мед.н., в.н.с.), И.К.Теснов <sup>1</sup> (н.с.), А.С.Галузин <sup>1</sup> (инж.), Ю.В.Абрамов <sup>1</sup> (к.т.н., в.н.с.), А.В.Симаков <sup>1</sup> (к.мед.н., с.н.с., зав.лаб.), В.Г.Барчуков <sup>1</sup> (д.мед.н., профессор, зав.лаб.), А.Г.Цовьянов <sup>1</sup> (к.б.н., зав.лаб.), В.П.Крючков <sup>1</sup> (к.ф.-м.н., в.н.с.)

<sup>1</sup> ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна», г. Москва

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

Контакты: +7 (910) 470-36-25; [braginyu@gmail.com](mailto:braginyu@gmail.com)