

Технология использования программной платформы Blender 3D как среды динамического моделирования полей гамма-излучения

В качестве аддона (дополнения) для Blender 3D разработан пакет для динамического моделирования полей гамма-излучения и предварительной оценки дозовых нагрузок персонала при выполнении работ на радиационно опасных объектах. Пакет использует функционал программы Blender 3D, включая редакторы шейдеров и геометрических нодов, а также сценарии, написанные на языке Python. Средствами визуального программирования смоделированы фотоэффект, комптоновское рассеяние и эмиссионные свойства материалов. Особое внимание уделено VDF-шейдерам для рассеивания и поглощения излучения в объеме объектов (защит и конструкционных материалов).

Ю.Н.Брагин, К.А.Чижов,
Е.В.Клочкова, С.В.Талдытов,
А.А.Болотов, Е.Н.Жирнов,
И.К.Теснов, А.С.Галузин,
А.А.Ашуркин, В.Г.Барчуков,
А.Г.Цовьянов, В.В.Барчуков,
В.П.Крючков

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА
России, г. Москва

Ключевые слова: взаимодействие гамма-излучения с веществом, визуальное программирование, динамическое моделирование, мощность воздушной кермы, световая модель, цифровой двойник ОИАЭ, Open Shading Language, VDF-шейдеры.

Список сокращений

- АЭД — амбиентный эквивалент дозы;
- ВК — воздушная керма;
- ДИИ — детектор ионизирующего излучения;
- ИИ — ионизирующее излучение;
- ИИИ — источник ионизирующего излучения;
- МАЭД — мощность амбиентного эквивалента дозы;
- МВК — мощность воздушной кермы;
- ММК — метод Монте-Карло;
- ОИАЭ — объект использования атомной энергии;
- ПО — программное обеспечение;
- РБ — радиационная безопасность;
- РО — радиационная обстановка;
- РОО — радиационно опасный объект;
- 3D — трехмерный (англ. Three Dimensional);
- API — интерфейс прикладного программирования (англ. Application Programming Interface);
- Blender 3D — программный комплекс для трехмерной компьютерной графики;
- BSDF — функция распределения двунаправленного рассеяния (англ. Bidirectional Scattering Distribution Function);
- GLSL — язык затенения OpenGL (англ. OpenGL Shading Language);
- GPU — графический процессор (англ. Graphics Processing Unit);
- GUI — графический интерфейс пользователя (англ. Graphical User Interface);
- ICRU — Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям;
- OpenGL — открытая графическая библиотека (англ. Open Graphics Library);
- OSL — открытый язык затенения (англ. Open Shading Language);
- VDF — функция объемного распределения (англ. Volumetric Distribution Function).

Планирование и выполнение работ в полях внешнего гамма-облучения сопряжено с облучением персонала радиационно опасных объектов (РОО). Особенно эта проблема актуальна при выводе из эксплуатации РОО, когда радиационная обстановка (РО) динамически меняется. Одним из путей управления дозовыми нагрузками является визуализация мощности дозы на объекте, где выполняются радиационно опасные работы. В качестве инструмента визуализации мощности дозы в настоящее время широко используются различные программные продукты. В данной работе описана технология использования методов и инструментов компьютерной графики, реализованных в пакете аддонов (дополнительных модулей) INTERLUM для компьютерной программы Blender 3D, для моделирования физических процессов взаимодействия гамма-излучения с веществом в целях динамической визуализации РО на РОО. Термины компьютерной графики и инструментов программного обеспечения (ПО) Blender 3D приведены в табл. 1.

Пакет аддонов (дополнений) INTERLUM для ПО Blender 3D разработан для совместного использования в рамках световой модели взаимодействия гамма-квантов с веществом [1]. INTERLUM содержит набор программных инструментов, необходимых для обеспечения всей технологической цепочки создания динамической реалистичной компьютерной визуализации

Табл.1. Термины компьютерной графики и инструментов Blender 3D.

Термин	Объяснение термина
Аддоны (англ. add-ons)	Расширения (или скрипты) базового функционала Blender, которые добавляют в программу новые функции, автоматизируют рутинные задачи и позволяют персонализировать Blender под конкретные задачи — от создания сложных сцен и анимаций до оптимизации моделирования и рендеринга.
Ноды (узлы)	Элементы в программных пакетах визуализации (например, в Blender 3D) для моделирования сцен и оптических эффектов в трехмерном пространстве. Ноды позволяют создавать сложные материалы, текстуры и эффекты, используя визуальное программирование. Параметры нодов описывают их свойства. Ноды реализуются путем написания шейдеров.
Рендер	Программа-визуализатор данных в компьютерной графике. При создании изображения рендер обрабатывает данные, которые определяют текстуру, цвет и материал визуализируемого объекта. Рендеринг (англ. rendering — визуализация) — это процесс перевода трехмерной сцены (вида) в двухмерное растровое изображение с учетом заданных параметров: освещения, расположения точки наблюдения, материалов.
Трассировка лучей (англ. ray tracing)	В узком смысле в компьютерных программах — технология построения изображения трехмерных моделей, при которой отслеживается обратная траектория распространения луча (от экрана к источнику).
Шейдер (англ. Shader — затеняющий, создающий тень)	Компьютерная программа, предназначенная для исполнения графическими процессорами видеокарты (GPU). Шейдеры составляются на одном из специализированных языков программирования (например, GLSL или OSL) и компилируются в инструкции для графического процессора.
Blender API Python	Прикладной программный интерфейс для Blender 3D на языке Python.
CSV-файл	Файл в текстовом формате CSV (англ. Comma-Separated Values) для хранения табличных данных. Аббревиатура расшифровывается как «значения, разделенные запятыми».
GLSL (OpenGL Shading Language, Graphics Library Shader Language)	Высокоуровневый язык программирования, предназначенный специально для написания шейдеров (шейдинг-программ) в компьютерной графике.
GUI — Графический интерфейс пользователя (англ. Graphical User Interface)	Способ взаимодействия пользователя с компьютером, основанный на манипуляции динамически выводимыми на экран объектами.
OpenGL (Open GraphicsLibrary)	Спецификация, определяющая независимый от языка программирования программный интерфейс для написания приложений, использующих двумерную и трехмерную компьютерную графику.
OSL (Open Shading Language)	Язык программирования шейдеров. Используется, в частности, в имеющейся в свободном доступе программе Blender 3D, которая предназначена для создания трехмерной компьютерной графики.
Principled BSDF	Композитный шейдер для программы-визуализатора Cycles в программе Blender, который объединяет настройки нескольких шейдеров в одном ноде.
VDF-шейдер	Исполняемая графическими процессорами видеокарты компьютерная программа для получения объемного (трехмерного) изображения с использованием заданной функции распределения света по объему отдельных элементов (примитивов) сцены.

процессов взаимодействия ионизирующего излучения (ИИ) с веществом. INTERLUM реализован на основе ПО Blender 3D [2], написан на языках Python, Open Shading Language (OSL) и языке визуального программирования. Основные функции INTERLUM:

- расчет 3D поля мощности воздушной кермы (МБК) или мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) по известному распределению объемной и/или поверхностной активности в заданной точке 3D-модели рабочего помещения или промышленной площадки предприятия, например, в месте нахождения детектора излучений;
- оценка воздушной кермы (ВК) или амбиентного эквивалента дозы (АЭД) в месте расположения детектора излучений или по маршруту перемещения детектора излучений. Изменение РО при этом не влияет на возможность оценки ВК или АЭД;

- экспресс-оценка поля МВК (МАЭД) по известному распределению объемной и/или поверхностной активности внутри 3D-модели рабочего помещения или промышленной площадки. Пакет INTERLUM включает в себя следующие аддоны:
- «X3Dtracker», который позволяет определять МВК (МАЭД) в центре выделенного объекта в режиме «Камера», делать анимации (сценарии) с вычислением МВК в каждом кадре, а также ретроспективно демонстрировать значения МВК и накопленной воздушной кермы по каждому фрейму сценария. Дополнительно в режиме «False color» аддон «X3Dtracker» позволяет просматривать РО в каждой точке сцены, поскольку в этом режиме цвет пикселя можно соотносить со шкалой МВК, генерируемой аддоном «Scale».
- «X3Dpath», который является существенным развитием «X3Dtracker» и может работать с любым количеством спектральных линий (в текущей версии аддон «X3Dpath» работает с 22 спектральными линиями для пяти радионуклидов).
- «Scale» (Не путать с известной программой Scale, реализующей метод Монте-Карло для гамма-квантов), который работает с аддоном «X3Dtracker» в обычном и false-режимах. Его назначение – быстрое определение (оценка) значений МВК (МАЭД) в различных точках сцены. Этот аддон позволяет определить МВК лишь приблизительно, но часто этого достаточно. Для точного определения МВК нужно использовать аддон «X3Dtracker».
- «Calibrovka», который выполняет сценарий, когда источник излучения, защита и детектор неподвижны, а толщина защиты растет от нулевых до максимальных значений. Рассчитанные зависимости сравниваются с зависимостями МВК от толщины защиты, полученными в программе «Geant4» [3] или в других программах, использующих метод Монте-Карло (ММК). Цель сравнения – поиск наилучшего совпадения результатов, полученных с использованием световой модели, с результатами, полученными в программе «Geant4».

Материалы и методы

Общие положения

Световая модель взаимодействия излучения с веществом использует метод трассировки лучей, который реализован в программе-визуализаторе «Cycles» Blender 3D и обеспечивает высокую точность визуализации и моделирования. «Cycles» позволяет реализовать основные оптические свойства при взаимодействии с материалами: прохождение, отражение, рассеяние, преломление и поглощение лучей. По умолчанию в программе реализована поддержка около 200 нодов различных материалов и геометрических нодов. Кроме встроенных нодов программа «Cycles» предоставляет возможность создания дополнительных шейдеров на языке OSL.

Поскольку взаимодействие ИИ с веществом происходит в объеме, а не на поверхности материальных объектов, используются VDF-шейдеры – объемные шейдеры, описывающие взаимодействие лучей света с материалом внутри геометрических примитивов, а не на их поверхности.

В Blender 3D существует четыре VDF-шейдера (рис.1), а именно:

- «Volume Absorption» — описывает поглощение фотонов в объеме материала,
- «Volume Scatter» — описывает рассеяние фотонов в объеме материала,
- «Emission» — описывает эмиссию фотонов из объема или с поверхности,
- «Principled Volume» — описывает рассеяние, поглощение и эмиссию фотонов из материала.

На рис.1 четыре шейдера представлены виде прямоугольников. С левой стороны прямоугольников расположены входы в шейдеры, а с правой – выходы. В теле шейдеров располо-

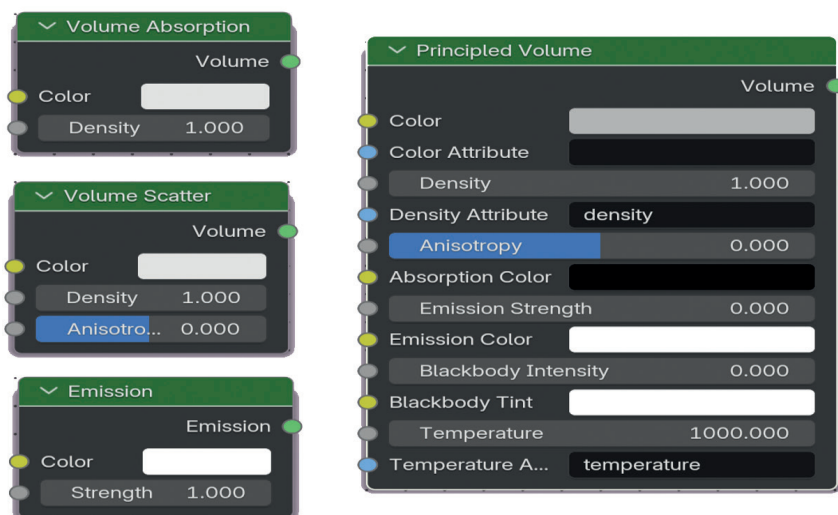


Рис.1.
Интерфейс
VDF-шейдеров
в Blender 3D.

жены их параметры. Первый из VDF-шейдеров моделирует поглощение гамма-квантов, т. е. фотоэффект, второй – комптоновское рассеяние, третий – моделирует как поверхностные, так и объемные источники ИИ. Первый и второй шейдеры имеют параметр Color, который в представлении световой модели взаимодействия излучения с веществом [1] связан с энергией поглощаемого и рассеиваемого излучения, соответственно. В третьем шейдере имеется параметр Emission Color, который можно связать с энергией испускаемых фотонов.

Комбинирование шейдеров и нодов является средством для создания в Blender 3D путем визуального программирования сложных материалов и геометрий без необходимости углубляться в низкоуровневое программирование, обеспечивая наглядность, простоту, эффективность и производительность.

Основная часть

Пакет INTERLUM написан на языках Python, OSL и языке визуального программирования. В создании пакета аддонов INTERLUM можно выделить три уровня разработки. На нижнем уровне – уровне создания дополнительных шейдеров – использовался OSL, на среднем уровне – уровне описания свойств объектов – использовалось визуальное программирование шейдеров, на верхнем уровне – уровне создания аддонов – использовался Python.

Созданные виртуальные материалы (ноды) представлены в табл.2. Написанные на OSL шейдеры поименованы «Script» в прямоугольниках с сине-зеленой заливкой.

Нижний уровень моделирования: создание дополнительных шейдеров

На OSL был написан код для трех дополнительных шейдеров:

- «Spectrum+.osl» – определение спектральных линий гамма-квантов;
- «Energy_color.osl» – преобразование энергии гамма-квантов в цветовую палитру;
- «Monodensity.osl» – расчет поглощающей способности материалов.

В остальных случаях использовались стандартные шейдеры материалов Blender 3D.

Шейдер радионуклидов «spectrum+.osl» [4] (табл.2, строки 1 и 2, 1-й слева) создан на основе данных о начальных энергиях гамма-квантов и квантовых выходах спектральных линий излучения, взятых из справочника [5], и предназначен для расчета выхода (активности)

Табл.2. Визуальное программирование виртуальных материалов (нодов).

Объект	Группа нодов, создающих объект
Шейдеры источника излучения – поверхностный источник Source	
Шейдеры защиты – защита, элемент строения или оборудования Shield	
Шейдеры детектора – детектор гамма-излучения Detector	

i -й спектральной линии. Всего в шейдере реализованы 22 линии. Номер спектральной линии задается на входе шейдера параметром `frame_current`. На выходе шейдера параметры `Energy` и `Strength` содержат информацию об энергии и активности (силе света) спектральной линии, указанной во входном параметре `frame_current`.

Шейдер перехода от начальной энергии гамма-кванта к длине волны видимого света «`Energy_color.osl`» реализует процедуру, описанную ранее [1]. Переход основан на установлении зависимости между длиной волны света λ и начальной энергией гамма-кванта выбранной спектральной линии, основанной на кривой видности [6], и нормализованной дифференциальной керма-постоянной выделенной спектральной линии. Связь между керма-постоянной Γ_{Ki}^* и длиной волны света λ описывается выражением:

$$\log_{10}(\Gamma_{Ki}^* / 59,7) = -39,790194 + 0,141573 \cdot \lambda - 0,000126 \cdot \lambda^2, \quad (1)$$

где значения Γ_{Ki}^* взяты из справочника [5]. Шейдер «`energy_color.osl`» [4] (табл.2, строка 1, 2-й слева) имеет один вход `energy` – начальную энергию гамма-кванта и один выход `out_color` – длину волны света, которая вычисляется по начальной энергии гамма-кванта выбранной спектральной линии (1).

Спектральные линии радионуклидов, включенных в программу, представлены на рис.2.

Комбинация шейдеров «`spectrum+.osl`» и «`energy_color.osl`» на основе входного параметра `frame_current`, соответствующего номеру спектральной линии гамма-квантов, генерирует на выходе в параметре `out_color` соответствующую спектральную линию видимого света, рис.2.

Шейдер материалов защиты и конструкционных материалов «`monodensity.osl`» [4] формирует поглощающие и рассеивающие свойства материалов защит, используя табличные данные о коэффициентах ослабления и поглощения гамма-квантов материалами. Значения коэффициентов рассеяния образуются в ходе выполнения шейдера путем вычитания значений коэффициентов поглощения из соответствующих значений коэффициентов ослабления [5]. В шейдере вычисляются также значения параметра `Anisotropy`, процедура определения которого описана в статье [1].

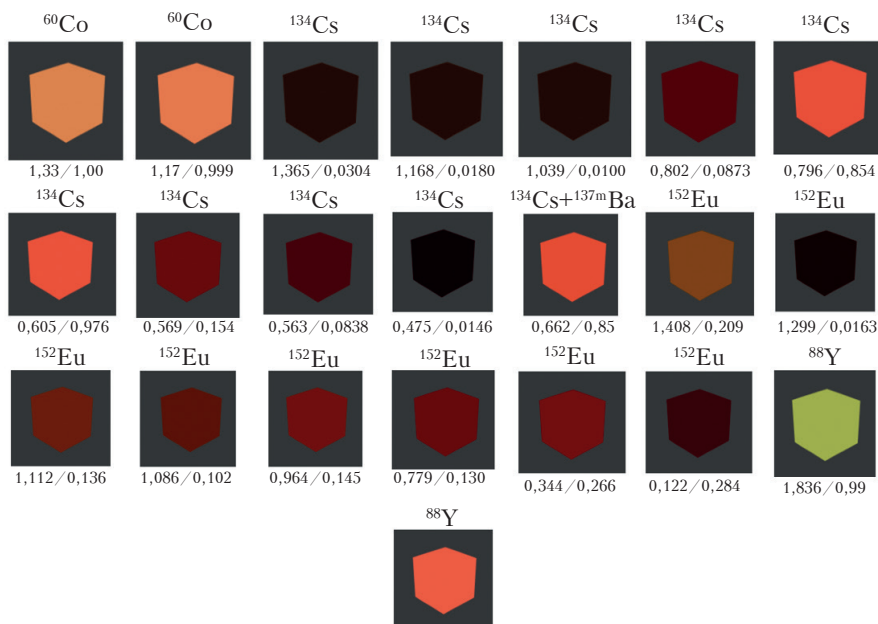


Рис.2. Спектральные линии радионуклидов, включенных в программу. Под цветовыми представлениями спектральных линий числа через дробь обозначают: в числителе E_{0i} – начальная энергия гамма-квантов данной спектральной линии, в знаменателе n – квантовый выход данной спектральной линии.

Шейдер «monodensity.osl» (табл.2, строка 2, 2-й слева) имеет два входа и три выхода. На входе: параметр Energy – начальная энергия гамма-кванта выбранной спектральной линии и параметр Material – вид материала. В текущей версии аддона «X3Dtracker» параметр Material принимает следующие значения: 0 – вода, 1 – бетон, 2 – железо, 3 – свинец. В шейдере вычисляются значения трех выходных параметров: Density_scatter, Density_absorption, Anisotropy. Первый параметр – это коэффициент рассеяния, второй – коэффициент поглощения, а третий параметр – анизотропия рассеяния гамма-квантов.

Средний уровень моделирования: создание источников ионизирующего излучения, защит и детекторов ионизирующего излучения

Свойства объектов моделирования в Blender 3D и сам внешний вид этих объектов определяются связями между шейдерами. Среди них есть как шейдеры «Cycles», так и дополнительные шейдеры, написанные на OSL. Визуальное программирование занимается установлением связей между шейдерами (нодами) для придания объектам необходимых свойств.

В световой модели взаимодействия ИИ с веществом [1] определено три вида материалов. Это Источники ионизирующего излучения (ИИИ), Защиты и Детекторы ионизирующего излучения (ДИИ). Каждый из этих материалов имеет свои характеристики, которые отличаются настройками шейдеров, их описывающих. Название каждого вида материала должно начинаться с определенного слова: «Source» для материала ИИИ, «Shield» для материала защиты и «Detector» для материала ДИИ. Затем в названии следует точка и конкретное обозначение материала латиницей или кириллицей, например, Source.cobalt_60 или Shield.бетон.

В табл.2, в строке 1 шейдеры ИИ представлены для поверхностного источника. Группа нодов, создающих ИИИ, состоит из четырех нодов. Ноды «Spectrum+.osl» и «energy_color.osl» являются дополнительными нодами, написанными на OSL. Оба дополнительных нода рассмотрены выше. Вычисленный нодом «energy_color.osl» цвет передается на вход Color следующего нода «Emission», который является стандартным нодом Blender 3D для материалов, эмитирующих фотоны. Этот нод оперирует двумя параметрами: Color – цвет, который ему передает нод «energy_color.osl», и Strength – сила света, которую ему передает нод «Spectrum+.osl».

Переданная сила света соответствует активности нуклида с учетом квантового выхода его спектральной линии, которая рассчитывается в данный момент. Активность каждого радионуклида вводится пользователем вручную перед началом расчетов. Четвертый нод «Material Output» отвечает за вывод изображения на экран.

В табл.2, в строке 2 представлены ноды, которые отвечают за материалы защит, а также за любые конструкционные материалы и оборудование, кроме ИИИ и ДИИ. В этой группе нодов присутствует три новых шейдера «Cycles».

Нод «Volume Absorption» отвечает за поглощение излучения в материале защиты. У этого шейдера два входных параметра: Color и Density. Параметр Color отвечает за цвет, который поглощает материал защиты (если цвет белый, то поглощаются все цвета). Параметр Density зависит от материала защиты и типа излучения, он отвечает за интенсивность поглощения излучения в защите.

Нод «Volume Scatter» отвечает за рассеяние фотонов. Он имеет три параметра: Color, Density и Anisotropy. Действие параметра Color аналогично действию такого же параметра для нода «Volume Absorption». Параметр Density зависит от материала защиты и типа излучения,

он отвечает за интенсивность рассеяния излучения в защите. Параметр Anisotropy отвечает за анизотропию рассеяния фотонов в защите. Значения этих параметров вычисляются в двух дополнительных шейдерах – «spectrum+.osl» и «monodensity.osl», (табл.2, строка 2), которые рассмотрены выше.

В табл.2, в строке 3 представлены ноды, которые отвечают за вид детектора ионизирующего излучения (ДИИ). В световой модели [1] ДИИ рассматривается как модель, максимально приближенная к сфере ICRU (Сфера ICRU является установленной Международной комиссией по радиационным единицам и измерениям (ICRU) моделью человеческого тела для расчета поглощения ионизирующего излучения; сфера представляет собой шар из тканеэквивалентного материала диаметром 30 см с плотностью 1 г/см³) [7], поэтому под ДИИ в данном случае мы понимаем сферу диаметром 30 см единичной плотности, которая изотропно рассеивает входящее в ее объем излучение, не поглощая его. В соответствии с данным определением ДИИ можно было описать простой моделью, состоящей из двух шейдеров – «Volume Scatter» и «Material Output». Однако такой ДИИ дает очень малую освещенность, поэтому была использована конструкция из шейдеров, которая работает как усилитель сигнала: в группе нодов ДИИ используется не один шейдер «Volume Scatter», а четыре. Дополнительно используется шейдер «Add Shader», который позволяет суммировать освещенность изображения отдельных шейдеров «Volume Scatter». В результате освещенность значительно возрастает, а искажение светового поля за детектором остается незначительным.

Верхний уровень моделирования: аддоны световой модели на языке Python

Аддоны на языке Python являются основой функционирования пакета аддонов INTERLUM. Аддоны «X3Dtracker», «X3Dpath», «Calibrovka», «Scale» (не путать с известной программой Scale, реализующей метод Монте-Карло для гамма-квантов) в случае их активации становятся частью интерфейса Blender 3D.

Интерфейсы аддонов пакета INTERLUM представлены на рис.3.

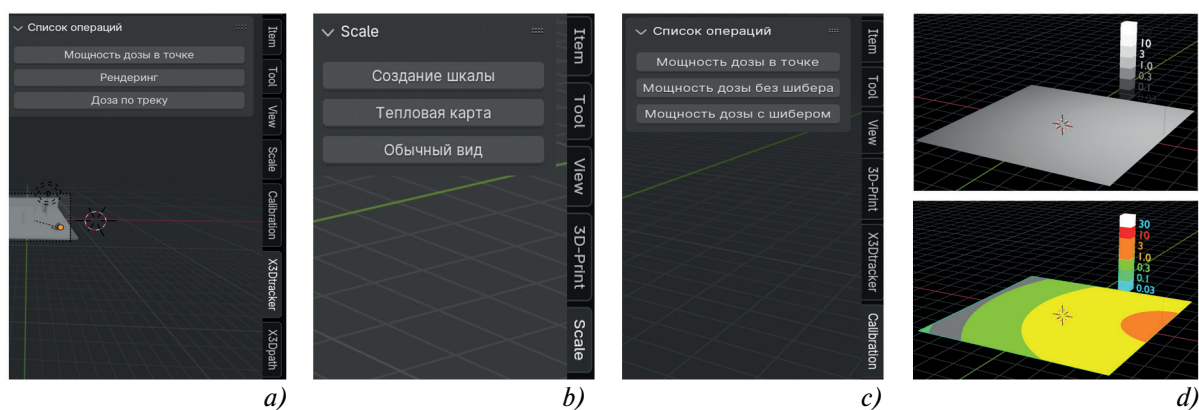


Рис.3. Интерфейсы аддонов пакета INTERLUM. Главное меню программы «X3Dtracker» – (a), главное меню программы «Scale» – (b), главное меню программы «Calibrovka» – (c), пример работы программы «Scale» – (d). Главное меню аддона «X3Dpath» совпадает с главным меню аддона «X3Dtracker».

Аддон «X3Dtracker» [4] является базовой программой, написанной на языке Python, для пакета аддонов INTERLUM. Аддон позволяет определять мощность дозы в центре выделенного объекта в режиме «Камера», делать анимации (сценарии) с вычислением МВК или МАЭД в каждом фрейме, а также позволяет ретроспективно демонстрировать значения МВК и накопленной воздушной кермы по каждому фрейму сценария. Дополнительно в режиме «False color» аддон позволяет просматривать РО по каждой точке сцены, поскольку в этом случае цвет пикселя можно соотносить со шкалой МВК, которая генерируется программой «Scale». Аддон «X3Dtracker» вычисляет МВК или МАЭД во всех пикселях сцены, хотя выводит МВК/МАЭД только для одного пикселя. Скорость выполнения программы можно увеличить (в тысячу и более раз), если использовать окно рендеринга (открытие — Ctrl+B, отмена — Ctrl+Alt+B).

Аддон «Calibrovka» [4] создан на основе кода аддона «X3Dtracker». В этом аддоне выполняются сценарии, когда источник излучения, защита и детектор неподвижны, а толщина защиты растёт от нуля до максимальных значений. Варьируемая толщина защиты и значения МВК записываются в csv-файл для сравнения с зависимостями МВК от толщины защиты, полученными в программе «Geant4» [3] или в других программах, использующих метод Монте-Карло (ММК). Наилучшее совпадение с результатами, полученными в программе «Geant4», достигается путем ввода соответствующих коэффициентов в шейдер «monodensity.osl» световой модели.

Процедура калибровки была подробно описана прежде [1]. В результате калибровки в последнюю строку шейдера «spectrum+.osl» добавляется множитель 2800:

$$out_color = 2800 * wavelength_color(\lambda) . \quad (2)$$

Этот множитель остается неизменным для любой спектральной линии гамма-квантов, а не только для линии $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$.

Аддон «Scale» [4] может работать вместе с аддонами «X3Dtracker» и «X3Dpath» в обычном и false-режимах. Назначение аддона — быстрое определение значений МВК в любых точках сцены. Эта программа может лишь приблизительно определить МВК, но для решения большинства прикладных задач этого достаточно. Для точного определения МВК или МАЭД нужно пользоваться аддоном «X3Dtracker» или «X3Dpath». Пример работы программы «Scale» представлен на рис.3 справа.

Аддон «X3Dpath» [4] является развитием программы «X3Dtracker». В отличие от «X3Dtracker», «X3Dpath» может работать с любым количеством спектральных линий (в текущей версии программа «X3Dpath» работает с 22 спектральными линиями для пяти радионуклидов), однако если «X3Dtracker» работает с любыми шейдерами материалов, аддон «X3Dpath» может работать корректно только с шейдерами материалов, которые представлены в табл.2. Ограничение связано с тем, что аддон «X3Dpath» в ходе расчетов меняет поглощающие и рассеивающие свойства материалов на свойства, соответствующие той спектральной линии, для которой выполняются расчеты, а в аддоне «X3Dtracker» это делается вручную. Скорость выполнения программы можно увеличить, если использовать окно рендеринга.

Результаты

Пример виртуальной световой модели реального производственного здания

В качестве примера построена виртуальная модель реального здания одного из предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». В ней используется более 200 эле-

ментов (примитивов) конструкций. Данный пример модели производственного объекта демонстрирует возможности функционала Blender 3D. Действительно, модель здания была первоначально построена на обычных поверхностных шейдерах типа «Principal BSDF». Модель с такими шейдерами представлена на рис.4 слева. Эти шейдеры неприемлемы для моделирования процессов взаимодействия ИИ с веществом в соответствии со световой моделью.

Чтобы использовать световую модель, материал модели здания под названием «beton» из BSDF-шейдеров нужно преобразовать в материал защит или конструкционных материалов (табл.2, вторая строка) из VDF-шейдеров. Большое количество элементов конструкции здания исключает ручной способ замены материалов. Однако необходимую замену материалов можно выполнить сразу для всех элементов конструкций здания. Чтобы трансформировать материал объекта на нужный материал «Shield.бетон», необходимо выполнить следующие операции.

1. Выделить все объекты с материалом «beton».

Выделить произвольный объект с материалом «beton», затем выполнить операции Select → Select Linked → Material. Все объекты с материалом «beton» выделяются оранжевым цветом, а первоначально выделенный объект – желтым цветом.

2. Создать дополнительный mesh-объект (например, кубик) и присвоить ему с материал «Shield.beton».

3. Присвоить всем выделенным объектам новый материал «Shield.бетон».

Нажав и удерживая Shift, выделить дополнительный объект с материалом «Shield.бетон». При этом вновь выделенный объект становится желтым, а первоначально желтый – оранжевым. Нажать «Ctrl-L». Произойдет замена старого материала на новый у всех выделенных объектов.

4. Удалить дополнительный объект, созданный в п.2 с материалом «Shield.бетон».

В результате выполнения этой процедуры происходит замена материала «beton» на материал «Shield.бетон» с VDF-шейдерами. Модель здания с VDF-шейдерами представлена на рис.4 справа.

Пример оценки радиационной обстановки приведен для ИИИ $^{137}\text{Cs}+^{137\text{m}}\text{Ba}$ (5000 МБк), помещенного внутрь здания (рис.4.).

На рис.4 справа показаны два ДИИ (маленькие сферы), расположенные слева от воображаемой оси Z. На рисунке также показана шкала значений МБК в мкГр/ч, визуализация которой является результатом работы аддона «Scale». Как можно видеть, яркость этих двух сфер различна, что свидетельствует о разных значениях МБК в местах расположения ДИИ. Точные значения МБК получены для каждой из сфер с использованием аддона «X3Dtracker» (верхний источник $\dot{D}_{\text{ВИ}} = 0,04$ мкГр/ч, нижний источник $\dot{D}_{\text{НИ}} = 0,35$ мкГр/ч).

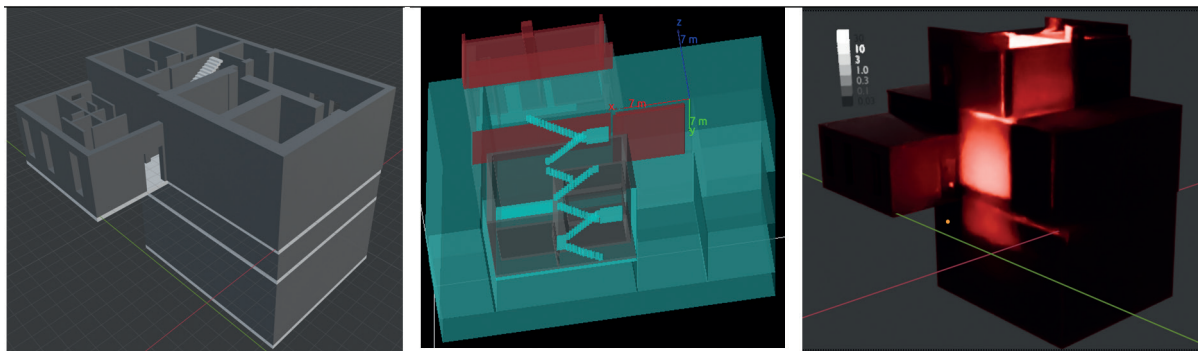


Рис.4. Модели здания в BDSF-шейдерах (слева) и VDF-шейдерах (справа). Посередине – модель здания в GUI Geant4.

Дискуссия

Целью световой модели описания взаимодействия гамма-излучения с веществом [1] является предварительная оценка дозовых нагрузок на персонал при разных сценариях выполнения работ. Цель достигается за счет создания цифровой виртуальной 3D-модели участков работ, где будет реализовываться выбранный сценарий работы.

Световую модель можно и нужно рассматривать как существенную составляющую цифрового двойника объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) в части реалистичного цифрового динамического моделирования РО.

Цифровой двойник ОИАЭ — это виртуальная копия объекта (атомной электростанции (АЭС), исследовательского реактора, установки обращения с радиоактивными отходами и т. п.), созданная с помощью цифровых технологий для анализа, контроля и управления состоянием реального объекта. Сущностным вопросом цифровых двойников ОИАЭ является анализ РО, позволяющий выявлять состояние радиационной безопасности (РБ) и прогнозировать развитие ситуации, тестировать изменения и инновации на виртуальной копии, снижая риски при внедрении в реальный объект. Прежде чем анализировать процессы, протекающие в виртуальной среде, их нужно научиться адекватно моделировать в динамике. Для этой цели и предназначена световая модель взаимодействия ИИ с веществом.

Компьютерная реализация световой модели работает гораздо быстрее, чем программы расчетов по ММК, для достижения той же точности результатов, а получаемые с использованием световой модели результаты существенно точнее, чем получаемые при инженерных расчетах. Таким образом, по совокупности характеристик — точности расчета и его скорости — она лидирует среди известных расчетных методов.

Будущие улучшения комплекса могут включать расширение функциональности для поддержки большего числа радионуклидов и материалов, а также улучшения качества световой модели с целью повышения точности оценки дозовых нагрузок.

Заключение

Основными преимуществами пакета аддонов INTERLUM, реализующего постулаты световой модели взаимодействия ИИ с веществом, являются следующие.

- Возможность динамического моделирования различных сценариев, включая перемещение оборудования и изменение условий окружающей среды, тестирование инновационных решений и подходов. Виртуальное моделирование различных сценариев развития аварийных ситуаций позволяет заранее разработать планы экстренных мер по эвакуации персонала и локализации последствий радиационных происшествий.
- Высокий уровень детализации и реалистичности визуализации, достигаемый за счет продвинутого алгоритма рендеринга и физически обоснованного моделирования взаимодействия излучения с веществом.
- Световая модель описания взаимодействия ИИ с веществом может стать важным функциональным элементом в парадигме цифрового двойника ОИАЭ.

Литература

1. Брагин Ю.Н., Чижев К.А., Клочкова Е.В., Ксенофонтов А.И., Болотов А.А., Жирнов Е.Н., Теснов И.К., Галузин А.С., Барчуков В.Г., Цовьянов А.Г., Крючков В.П. Программная платформа Blender 3D как среда динамического моделирования полей гамма-излучения // АНРИ. 2026. № 1(124). С. 3-20.
2. Blender Foundation, 2023. Blender – Free and Open Source 3D Creation Software. Retrieved from URL: <https://www.blender.org> (дата обращения 27.10.2025).
3. 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, 2003, pp. 250-303.
4. Nicemind/Interlum: Репозиторий материалов для статьи «Технология использования программной платформы Blender 3D как среды динамического моделирования полей гамма-излучения». Gitverse. URL: <https://gitverse.ru/nicemind/Interlum> (дата обращения: 27.10.2025).
5. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. М: Энергоатомиздат, 1995, 496 с.
6. Ландсберг Г.С. Оптика. Учеб. пособие для вузов. 6-е изд., стереот. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. ISBN 5-9221-0314-8.
7. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. Под общей ред. Киселева М.Ф. и Шандалы Н.К. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.

Technology for Using the Blender 3D Software Platform as an Environment for Dynamic Modeling of Gamma Radiation Fields

Bragin Yuri, Chizhov Konstantin, Klochkova Elena, Taldytov Sergey, Bolotov Alexander, Zhirnov Yevgeniy, Tesnov Ivan, Galuzin Alexander, Ashurkin Artem, Barchukov Valeri, Tsovyanov Aleksandr, Barchukov Vladimir, Kryuchkov Victor (State Research Center Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia)

Abstract. As an addon for Blender 3D, a package has been developed for dynamic modeling of gamma radiation fields and preliminary assessment of personnel dose loads when performing work at radiation-hazardous facilities. The package uses the functionality of the Blender 3D program, including shader and geometric node editors, as well as scripts written in Python. The photoelectric effect, Compton scattering, and emission properties of materials are modeled using visual programming. Special attention is paid to VDF shaders for scattering and absorbing radiation in the volume of objects (shields and structural materials).

Keywords: *interaction of gamma radiation with matter, visual programming, dynamic modeling, air kerma rate, light model, digital twin of the nuclear facility, Open Shading Language, VDF shaders.*

Ю.Н.Брагин (с.н.с.), К.А.Чижов (к.б.н., с.н.с.), Е.В.Клочкова (с.н.с.), С.В.Талдытов (инж.), А.А.Болотов (к.т.н., в.н.с.), Е.Н.Жирнов (к.мед.н., в.н.с.), И.К.Теснов (н.с.), А.С.Галузин (инж.), А.А.Ашуркин (инж.), В.Г.Барчуков (чл.-кор., д.мед.н., профессор, зав. лаб.), А.Г.Цовьянов (к.б.н., зав.лаб.), В.В.Барчуков (к.мед.н., зав.лаб.), В.П.Крючков (к.ф.-м.н., в.н.с.)

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г. Москва

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