

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б. Н. Ельцина»  
Физико-технологический институт  
Кафедра теоретической физики и прикладной математики

**Отчет по итерации индивидуального проекта.  
Итерация №1 «???»**

Студент:	Агапов Д.П.
Преподаватель:	Вазиров Р.А.
Группа:	ФТ-330005

Екатеринбург  
2025

# 1. Цель работы

Практическое использование библиотеки geant4 на примере системы "Излучатель электронов(1MeV, 10MeV) + водная мишень". Проверить совпадение построенной модели с теоретическими и практическими данными.

## 2. Геометрия модели

Источник электронов задаётся энергией  $E_{beam}$ , положением центра пушки  $\vec{r}_{gun}$  и направлением нормали  $\vec{n}_{gun}$ , ориентированной на прямоугольную область  $\Omega_{beam}$ . Построение области  $\Omega_{beam}$  выполняется так: задаётся плоскость, проходящая через точку  $\vec{r}_{gun}$  с нормалью  $\vec{n}_{gun}$ ; далее в этой плоскости формируется прямоугольник со стороной 10 см, причём точка  $\vec{r}_{gun}$  расположена в центре прямоугольника (точка пересечения диагоналей).

В качестве мишени используется водный фантом в форме параллелепипеда со сторонами<sup>1</sup>  $l_x = 30$  см,  $l_y = 30$  см,  $l_z = 20$  см; центр фантома совпадает с началом координат. Объём за пределами фантома заполнен воздухом. В Geant4 воздух моделируется как газ с плотностью  $1.29 \times 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup> и составом: азот — 70%, кислород — 23%, аргон — 1%.

## 3. Динамика модели

Излучатель испускает электроны с заданной энергией  $E_{beam}$  из случайной точки прямоугольной области  $\Omega_{beam}$ , направляя частицы параллельно вектору  $\vec{n}_{gun}$ . Частицы транспортируются через среду фантома(вода) с полной симуляцией стохастических взаимодействий, которые описываются набором физических процессов Geant4.

При прохождении через фантом отдельная частица на каждом шаге может:

- испытывать множественное упругое и неупругое рассеяние (изменение направления движения и передача энергии среде);
- терять энергию через ионизацию и возбуждение молекул среды;
- порождать вторичные электроны и фото/комpton/брекет-фотоны;
- испускать тормозное излучение при взаимодействии с полем атомных ядер;
- вызывать атомную дезэкситацию — флуоресценцию и выброс электронов Оже при захвате вакансий;
- при наличии высокоэнергетических фотонов — возможны фотоэффект, комптон-рассеяние и, при достижении порога, процессы, связанные с образованием пар и фотоядерные реакции (вклад маловероятен при энергиях ближе к 1 MeV, возрастает при более высоких энергиях и/или при наличии высокоэнергетических фотонов).
- и т.д.

Вероятности и конкретный набор процессов в симуляции задаются зарегистрированными модулями физики Geant4 (см. раздел «Список физики»). Для точного моделирования на малых энергиях включены специализированные низкоэнергетические модели и атомные эффекты, что важно для корректного расчёта локальной дозы и образования вторичных электронов.

---

<sup>1</sup>Считается, что стороны ориентированы вдоль осей; индексы указывают соответствующую ось.

## 4. Список физики

Для моделирования взаимодействия электронов с веществом используется составная физическая модель, основанная на стандартных и низкоэнергетических пакетах Geant4, оптимизированных для медицинской и дозиметрической физики. Ниже приведено описание подключённых модулей.

- **G4DecayPhysics** — реализует распад нестабильных элементарных частиц и ядер. В данной задаче основная роль данного модуля заключается в обеспечении корректного поведения возможных короткоживущих вторичных частиц.
- **G4RadioactiveDecayPhysics** — описывает процессы радиоактивного распада нестабильных нуклидов и связанные с ними продукты (альфа-, бета-, гамма-излучение). Хотя для электронного пучка и водного фантома вклад таких процессов невелик, модуль обеспечивает физическую полноту модели.
- **G4EmExtraPhysics** — включает дополнительные электромагнитные процессы, такие как генерация гамма-квантов при аннигиляции позитронов, фотоядерные реакции и другие эффекты, дополняющие стандартный набор.
- **G4HadronElasticPhysics** — реализует упругое рассеяние адронов на ядрах. Актуален при возможном образовании вторичных адронов в результате высокоэнергетических фотонных или ядерных взаимодействий.
- **G4HadronPhysicsFTFP\_BERT** — описывает неупругие ядерные взаимодействия адронов с ядрами вещества, включая каскад Берта и модель Фрей-Шенкенберга (FTFP). Вклад этих процессов для электронных пучков мал, но модуль активен для корректной обработки редких вторичных адронных событий.
- **G4StoppingPhysics** — моделирует процессы торможения и захвата тяжёлых заряженных частиц в веществе. Для электронов данный модуль обеспечивает корректное завершение трека при полном поглощении энергии.
- **G4IonPhysics** — реализует взаимодействие ионов с веществом, включая ионизацию, возбуждение и ядерные процессы. Используется для моделирования вторичных ионов, которые могут возникать при взаимодействиях высокоэнергетических частиц.
- **G4EmStandardPhysics\_option4** — стандартный набор электромагнитных процессов с расширенной точностью, оптимизированный для медицинской физики. Включает процессы ионизации, возбуждения, тормозного излучения, множественного рассеяния, взаимодействий фотонов (фотоэффект, комптон-рассеяние, парное рождение) и аннигиляции позитронов. Данная опция обеспечивает высокую точность расчёта пробега и дозы при энергиях в диапазоне низких энергий.
- **G4EmLowEPPhysics** — модуль низкоэнергетической электромагнитной физики, использующий детализированные модели взаимодействия электронов, фотонов и ионов при энергиях вплоть до нескольких эВ. Учитывает атомную деэкситацию (флуоресценцию и эмиссию электронов Оже), что позволяет точно моделировать распределение дозы на микроуровне.
- **Настройка электромагнитных параметров (ConfigureEMPhysics)** — определяет пороги генерации вторичных частиц (production cuts), шаг интегрирования и другие параметры транспортировки. Правильная настройка этих параметров обеспечивает баланс между точностью моделирования и скоростью расчёта.

Совокупность перечисленных модулей обеспечивает полное описание электромагнитных взаимодействий электронов с веществом в диапазоне энергий 1–10 МэВ, а также корректное моделирование побочных фотонных и (при необходимости) ядерных процессов. Такой набор соответствует рекомендациям Geant4 для медицинских и дозиметрических расчётов и обеспечивает реалистичное распределение дозы в водном фантоме.

## 5. Эксперимент и результаты моделирования

Для оценки распределения дозы, создаваемой электронным пучком в водном фантоме, была проведена серия численных экспериментов с использованием пакета Geant4. Источник частиц моделировался как электронный пучок с энергией  $E_{\text{beam}} = 10$  MeV, направленный вдоль оси  $z$ . Точки испускания электронов выбирались случайным образом в пределах прямоугольной области  $\Omega_{\text{beam}}$ , что имитирует распределение частиц по поверхности излучателя.

Моделирование проводилось с использованием набора физических процессов, описанных в разделе 4. Фантом представлял собой объём воды, достаточный для полного поглощения пучка  $l_z = 20$  см. Распределение поглощённой дозы регистрировалось в виде зависимости  $D(z)$  — средней дозы на единицу объёма в зависимости от координаты  $z$ , соответствующей глубине проникновения электронов.

На рис. 1 представлена рассчитанная зависимость поглощённой дозы от глубины в водном фантоме. Характерный профиль дозы демонстрирует наличие выраженного пика Брэгга — области максимального энерговыведения, соответствующей конечному пробегу электронов в веществе. За пределами максимума доза резко падает, что отражает полное торможение электронов и отсутствие дальнейшего проникновения частиц в глубь среды.

Положение пика Брэгга для электронов с энергией 10 MeV соответствует глубине около 3.5 см, что согласуется с табличными значениями пробега электронов в воде при данных энергиях (около 4,2 см по данным NIST ESTAR). Наблюдаемая форма кривой отражает совокупность эффектов ионизации, множественного рассеяния и тормозного излучения, описанных в предыдущем разделе.

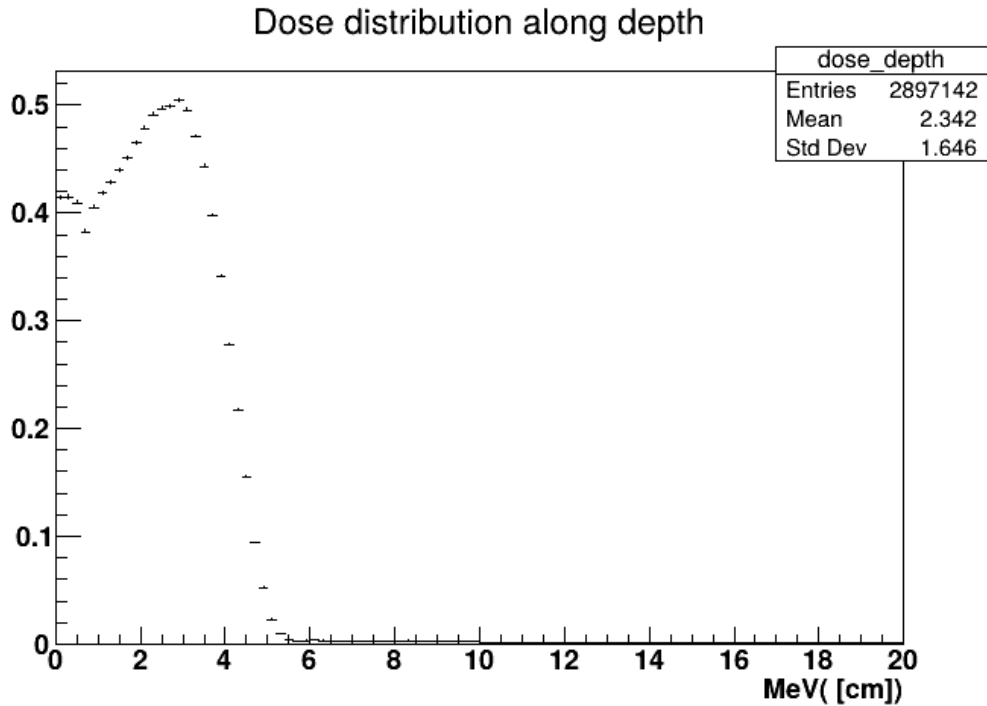


Рис. 1: Зависимость поглощённой дозы  $D(z)$  от глубины  $z$  в водном фантоме при облучении электронами с энергией 10 MeV. Видно наличие пика Брэгга, соответствующего максимальному энерговыведению.

Аналогично проводился эксперимент с  $E_{\text{beam}} = 1 \text{ MeV}$ . Полученный график поглощённой дозы в котором приведён на рис. 2.

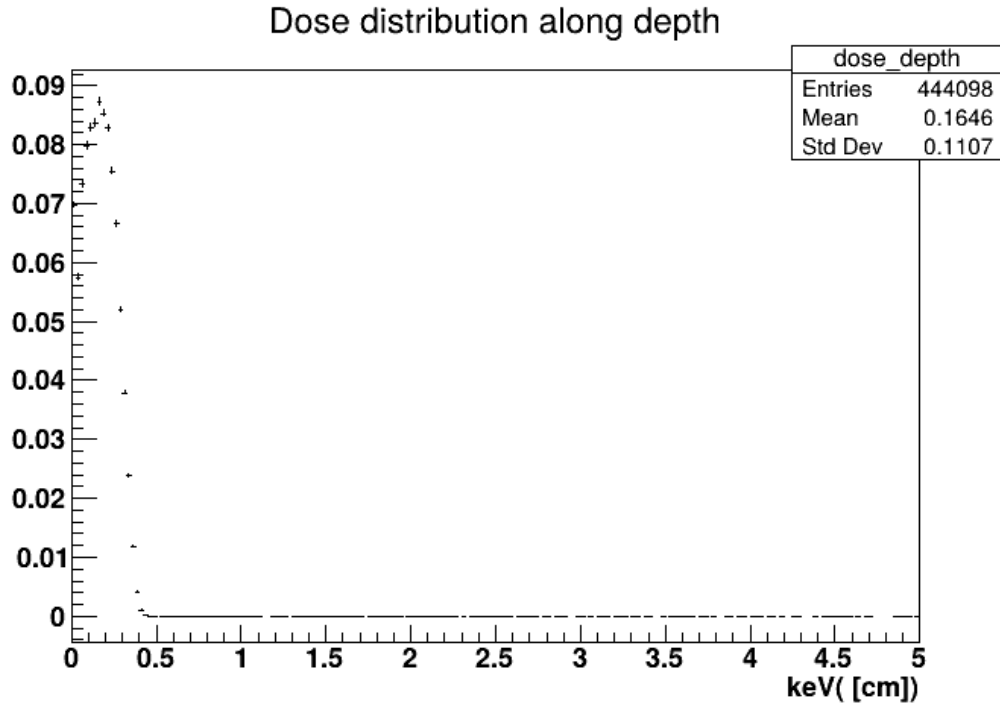


Рис. 2: Зависимость поглощённой дозы  $D(z)$  от глубины  $z$  в водном фантоме при облучении электронами с энергией 1 MeV.

Таким образом, результаты моделирования демонстрируют ожидаемое распределение дозы и подтверждают корректность реализованной модели взаимодействия электронов с веществом.

## 6. Основные проблемы

В ходе итерации проекта были допущены несколько важных ошибок:

В процессе моделирования возникла существенная ошибка интерпретации данных. Первоначально результаты, полученные при анализе распределения поглощённой энергии по глубине фантома, трактовались некорректно: значения, представляющие количество вызовов депонирования энергии, были ошибочно приняты за величину депонированной энергии в соответствующем бине.

Вследствие этого построенный график не отражал реального распределения поглощённой энергии и не совпадал с ожидаемым профилем, в частности — отсутствовал характерный пик Брэгга. После уточнения логики работы гистограммы и перехода к суммированию именно депонированной энергии (в единицах энергии, а не количества событий), результаты пришли в соответствие с теоретическими ожиданиями.

Также в процессе интерпретации данных обнаружилась ошибка с нарушением размерности. При расчёте численного интеграла по графику средней поглощённой за итерацию энергии от глубины мишени энергия не совпадала со средней энергией поглощённой на итерации фантомом, которая в эксперименте с энергией пучка  $E_{\text{beam}} = 10 \text{ MeV}$  составляет  $9.74 \text{ MeV}^2$ .

---

<sup>2</sup>Разница объясняется скорее всего рассеиванием энергии в воздухе

## 7. Вывод

В ходе работы была проведена практическая реализация и исследование системы «электронный излучатель (1 МэВ, 10 МэВ) + водный фантом» с использованием библиотеки Geant4. Полученные результаты подтвердили корректность модели: распределение поглощённой дозы и наличие пика Брэгга соответствуют теоретическим и экспериментальным данным.