

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Филиал федерального государственного автономного образовательного  
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский  
ядерный университет МИФИ» в городе Алматы (АФ НИЯУ МИФИ)

УДК 524.1

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Моделирование кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD с  
использованием пакета компьютерного моделирования Geant4**

Научный руководитель \_\_\_\_\_ Дмитриева А.Н.

Студент \_\_\_\_\_ Громов Т.Р.

Москва 2026

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение . . . . .</b>	<b>2</b>
1.1	Общие сведения . . . . .	2
1.2	Конструкция оптического модуля Baikal-GVD . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Цели и Задачи . . . . .</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Моделирование . . . . .</b>	<b>7</b>
3.1	Geant4 . . . . .	7
3.2	Модель оптического модуля . . . . .	8
3.3	Реализация модели кластера . . . . .	10
3.4	Моделирование срабатывания триггера кластера . . . . .	12
3.5	Переход на многопоточный расчет . . . . .	14
3.6	Рассеяние света . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Заключение . . . . .</b>	<b>20</b>

# 1. ВВЕДЕНИЕ

## 1.1 Общие сведения

Нейтрино — это фундаментальные частицы, относящиеся к классу лептонов, которые не участвуют ни в сильных, ни в электромагнитных взаимодействиях. Они не имеют ни цветового заряда, ни электрического, и поэтому путь, проходимый нейтрино от источника до регистрирующего устройства измеряется тысячами световых лет, в зависимости от энергии частицы. Эти свойства данной частицы делают ее исследования ключевыми для поиска ответов на вопросы о природе темной материи, об асимметрии материи и антиматерии, о внутреннем устройстве звезд, а также поиска информации о ранней вселенной. Однако эти же свойства имеют обратный эффект, делая нейтрино крайне неуловимыми для детекторов [1].

Baikal Gigaton Volume Detector (Baikal-GVD) — это проект нейтринного телескопа размером 1 кубический километр, который в настоящий момент уже достиг размеров в  $0.8 \text{ км}^3$  и продолжающий увеличиваться в объеме. Данный телескоп предназначен для регистрации и исследования потоков нейтрино сверхвысоких энергий ( $>10^{15}$  эВ) от астрофизических источников. Телескоп состоит из 16 независимых кластеров (см. рисунок 1.1), каждый из которых подключен к береговой станции посредством своего оптоэлектрического кабеля. Каждый кластер включает в себя 8 или 9 гирлянд, содержащих по 36 оптических модулей (ОМ) [2]. Оптические модули регистрируют черенковское излучение, создаваемое ультрарелятивистскими вторичными заряженными частицами, рождающимися при взаимодействии нейтрино высоких энергий. Примеры подобных реакций описываются формулами (1.1) и (1.2):

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow p + \mu^{-}, \quad (1.1)$$

$$\tilde{\nu}_{\mu} + p \rightarrow n + \mu^{+}. \quad (1.2)$$

Доминирующим источником нейтринных событий, регистрируемых телескопом, являются атмосферные нейтрино. Учитывая, что поток атмосферных нейтрино резко падает с ростом энергии, предпочтительный энергетический диапазон для наблюдения астрофизических нейтрино находится выше 30 ТэВ [1]. Возможными источниками астрофизических нейтрино считаются: двойные звезды, активные ядра галактик (блазары), вспышки гамма-излучения.

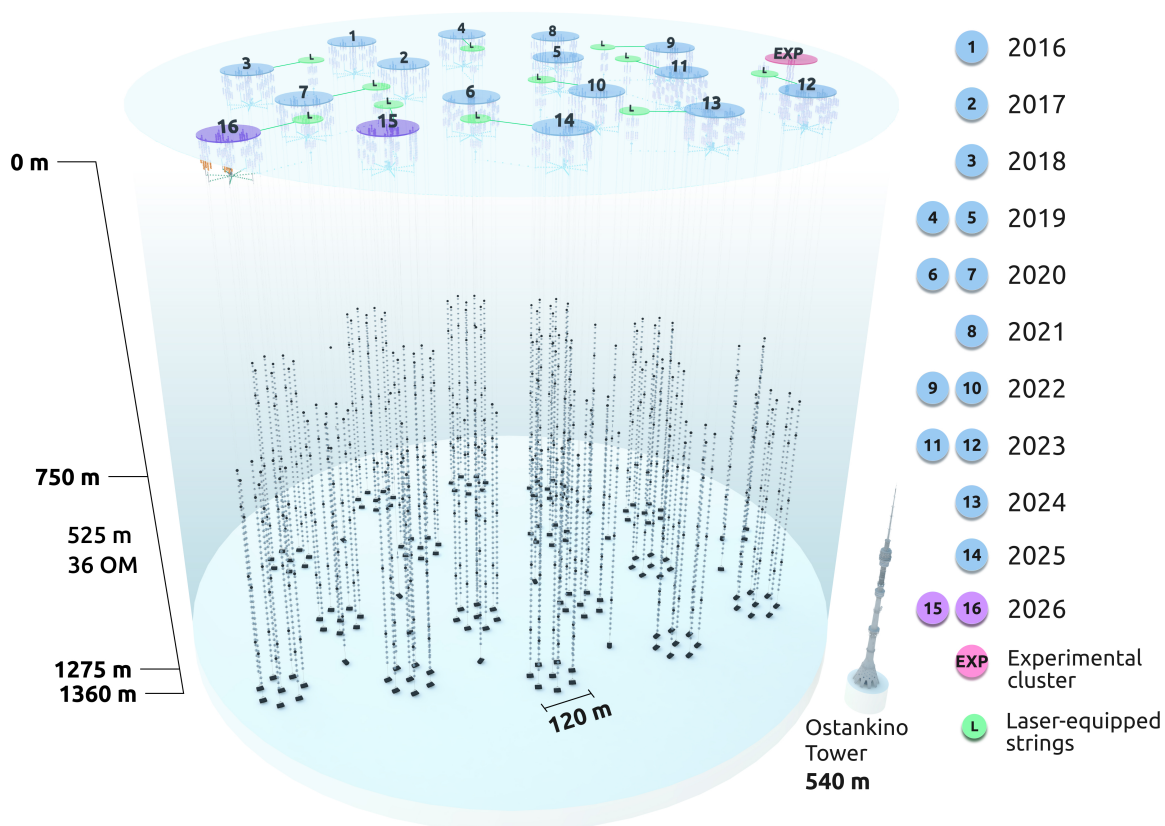


Рисунок 1.1 — Нейтринный телескоп Baikal-GVD в конфигурации, развернутой в феврале-марте 2026 года

## 1.2 Конструкция оптического модуля Baikal-GVD

Оптический модуль состоит из следующих компонентов (см. рисунок 1.2):

- глубоководный корпус и разъем (SubConn Low Profile 5-контактный), узел крепления к тросу, магнитный экран и иммерсионный материал;
- фотодетектор: фотоэлектронный умножитель;
- блок электроники.



Рисунок 1.2 — Фотография оптического модуля Baikal-GVD

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) с полусферическим фотокатодом размещается в сферическом, глубоководном корпусе диаметром 42 см из боросиликатного стекла. Данному стеклу свойственна стойкость к коррозии, легкость, электрическая и магнитная инертность, а его оптические свойства делают этот материал идеальным для использования в глубоководной среде. Корпус способен выдерживать высокое внешнее гидростатическое давление водной массы, обеспечивая гидрозащиту электроники, при этом будучи прозрачным для черенковских фотонов. Коэффициенты преломления стекла и воды близки, что обеспечивает оптический контакт [3].

На корпус ОМ устанавливается глубоководный разъем и вакуумный порт, через который производится откачка воздуха из ОМ до давления 0.7 атм,

достаточного для надежной фиксации двух полусфер глубоководного корпуса между собой. Блочный пятиштырьковый низкопрофильный глубоководный разъем-розетка из нержавеющей стали в неопреновом корпусе предназначен для передачи аналогового сигнала от фотоэлектронного фотоумножителя, управления работой и снабжением электропитанием ОМ. Блок электроники оптического модуля монтируется непосредственно на цоколь ФЭУ. Крепление ОМ на гирлянде осуществляется при помощи специальной рамы [4].

Во избежание потерь вследствие отражений света от границ раздела корпуса ОМ, колбы ФЭУ и воздушной прослойки между ними – пространство между ФЭУ и стеклянным корпусом заполняется иммерсионным материалом, в качестве которого используется силиконовый гель (показатели преломления боросиликатного стекла 1.47, силиконового геля 1.404, воды 1.33) [3].

ФЭУ защищен экраном из отожженного пермаллоя для уменьшения влияния магнитного поля Земли на его работу. Экран уменьшает влияние магнитного поля Земли на величину сигнала ФЭУ при его повороте с  $\sim 30\%$  до  $5-8\%$  (в зависимости от места засветки фотокатода: центр или периферийная часть). Экран представляет собой проволочную сетку (диаметр проволоки 1 мм) с ячейкой приблизительно  $2\text{ см} \times 2\text{ см}$ , изготовленную из сплава с магнитно-мягкими свойствами – пермаллой. Сетка отжигается после сварки в атмосфере аргона, что позволяет сохранить уникальные магнитные свойства сплава, при этом защитив металл от окисления [3].

Для преобразования черенковского излучения в электрические сигналы необходим детектор света с высоким временным разрешением (на уровне единиц нс), высокой квантовой эффективностью в области длин волн  $\sim 300 - 400\text{ нм}$  и большой площадью. При этом собственный уровень шумов такого прибора должен быть ниже светимости воды оз. Байкал. После тестирования различных вариантов был выбран Hamamatsu R7081-100. Этот фотоумножитель имеет полусферический фотокатод из супербищелочного сплава (SBA) диаметром 10 дюймов и квантовую эффективность в пике до  $35\%$  [5].

## 2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

**Целью** данной научно-исследовательской работы является реализация полноценной компьютерной модели кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD в пакете Geant4 [6] с последующей проверкой ее работоспособности и дальнейшего использования для оценки влияния рассеяния света на точность реконструкции событий.

### **Задачи:**

- Проверка работоспособности и оптимизация модели оптического модуля, используемого на телескопе Baikal-GVD.
- Проектирование и разработка модели полноценного кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD.
- Исследование срабатывания триггера кластера в зависимости от параметров запуска мюонов.
- Перевод модели на многопоточные вычисления.
- Развитие модели для оценки влияния рассеяния света на точность реконструкции событий.

## 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

### 3.1 Geant4

Geant4 [6] — пакет библиотек на C++ для компьютерного моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество, на основе совокупности подходов, вместе называемых «метод Монте-Карло». Под методом Монте-Карло понимается численный метод решения математических задач при помощи моделирования случайных величин.

Программный пакет Geant4 предоставляет широкий набор инструментов для описания геометрии эксперимента, моделирования физических взаимодействий частиц с веществом, отслеживания их траекторий, а также регистрации отклика детекторов. Основные функциональные компоненты Geant4 включают:

- Геометрия — это анализ физической схемы эксперимента, включая детекторы, поглотители и т. д., и рассмотрение того, как эта схема повлияет на путь частиц в эксперименте.
- Трекинг — это имитация прохождения частицы через материю. Он предполагает рассмотрение возможных взаимодействий и процессов распада.
- Моделирование отклика детектора при прохождении частиц через чувствительные объемы.

## 3.2 Модель оптического модуля

В рамках данной работы была получена модель оптического модуля (см. рисунок 3.1). В начале была проверена ее работоспособность путем исследования зависимости отклика ОМ от угла падения фотонов. Результаты моделирования далее сравнивались с результатами, полученными в ходе реального эксперимента.

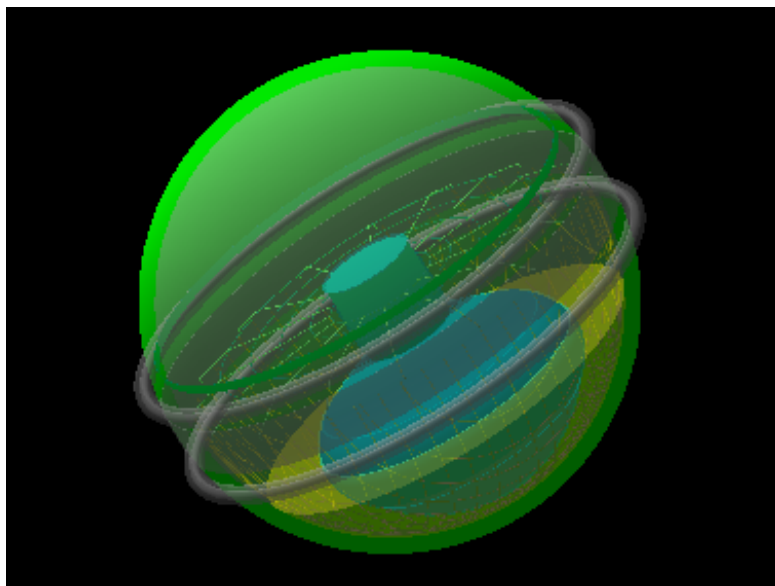


Рисунок 3.1 — Визуализация модели ОМ в Geant4

В проведенном эксперименте в светоизолированном помещении помещался бак с водой, в котором в свою очередь располагался ОМ. Фотокатод ФЭУ засвечивался плоскопараллельным потоком света от синего светодиода, размещаемого на расстоянии 3 метра от исследуемого модуля и работающего в импульсном режиме [3]. В моделировании энергия фотонов составляет 2.67 эВ, что соответствует голубому цвету светодиода, всего на одно событие их генерировалось 200000 и вылетали они также из точки на расстоянии 3 м. Направление их вылета разыгрывалось так, чтобы имитировать работу реального светодиода с раствором вспышки  $15^\circ$ . При попадании фотона на фотокатод считывалась его кинетическая энергия, по этому значению сначала определялось попал ли фотон в спектральный диапазон ФЭУ, если попал - определялось соответствующее значение квантовой эффективности. С помощью равномерного распределения разыгрывалось случайное число от 0 до 1,

если полученное случайное число оказывалось меньше квантовой эффективности – фотоэлектрон выбит, в противном случае нет. Угол  $0^\circ$  соответствует нормальному падению фотонов на фотокатод. При данном угле регистрируется максимальное количество фотоэлектронов, по этому значению выполнена нормировка графика, что позволяет сравнить результаты эксперимента и результаты моделирования (см. рисунок 3.2).

Следующим этапом была оптимизация ОМ, в частности пермаллоевый экран был задан в виде ассамблеи [6]. Такой подход значительно упрощает размещение геометрии, поскольку позволяет объединить связанные элементы в единый модуль, который затем можно многократно позиционировать и ориентировать в пространстве.

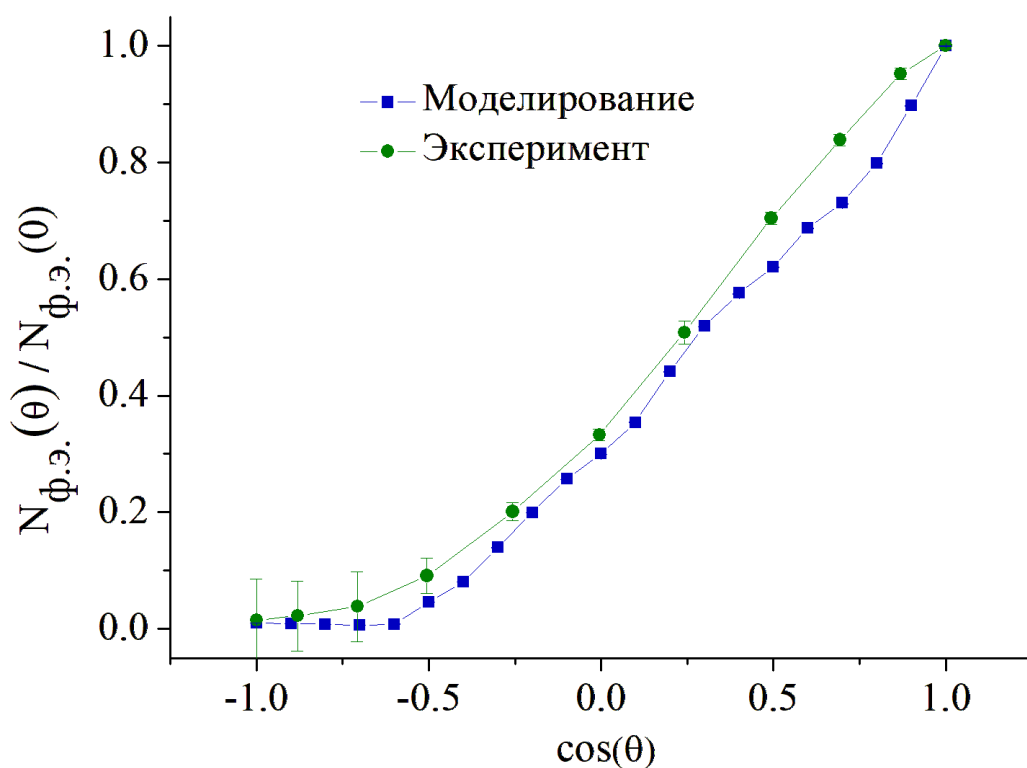


Рисунок 3.2 — Угловая зависимость отклика ОМ:

$N_{\text{ф.э.}}(\theta)$  — число зарегистрированных фотоэлектронов при угле  $\theta$ ,  
 $N_{\text{ф.э.}}(0)$  — число зарегистрированных фотоэлектронов при угле в 0.

### 3.3 Реализация модели кластера

В нейтринном телескопе Baikal-GVD кластер представляет объединение из 8 вертикальных гирлянд, 7 из которых расположены в углах правильного семиугольника радиусом 60 метров, а 1 расположена в центре. В одной гирлянде содержится 36 ОМ, расстояние между которыми составляет 15 метров. Концептуальная схема кластера представлена на рисунке 3.3, в частности на ней изображено как нумеруются гирлянды и модули расположенные в ней. Нумерация в моделировании совпадает с нумерацией в эксперименте. Визуализация готовой модели кластера в Geant4 представлена на рисунке 3.4, характерные расстояния в кластере уменьшены в 10 раз.

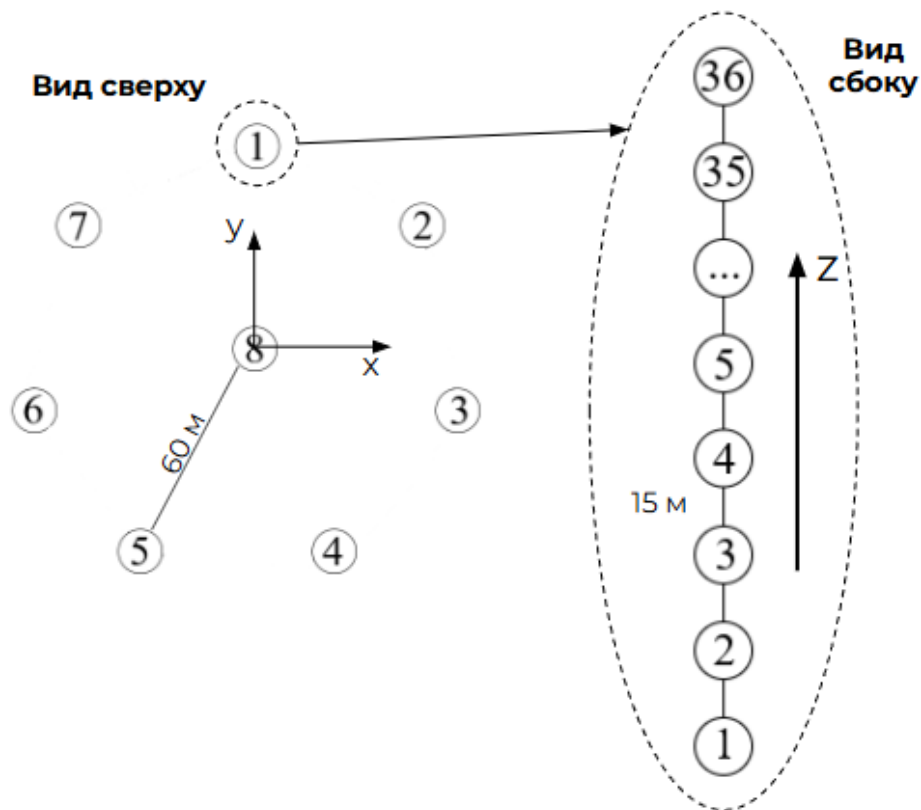


Рисунок 3.3 — Схема конфигурации кластера

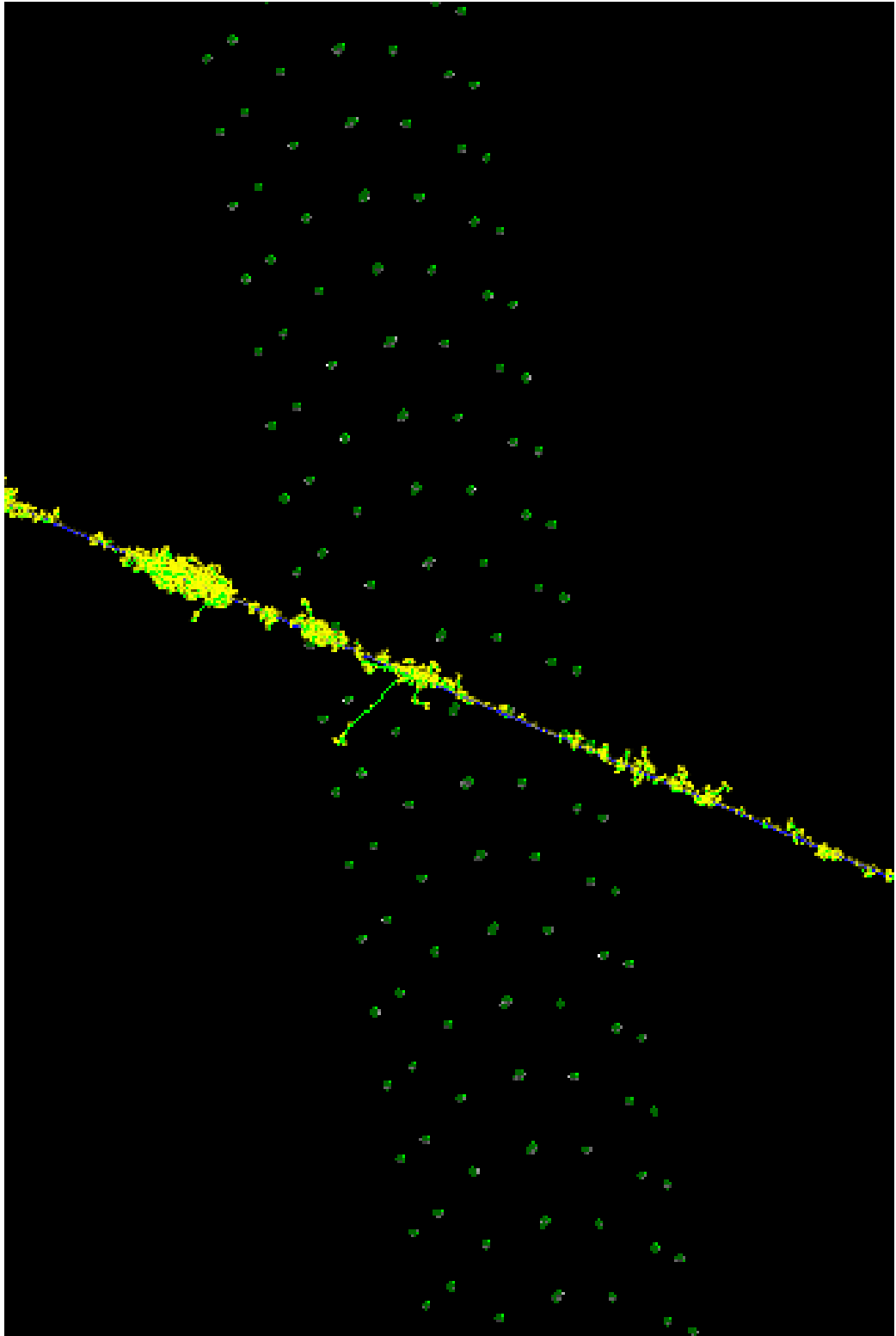


Рисунок 3.4 — Визуализация кластера с запуском мюона в Geant4

### 3.4 Моделирование срабатывания триггера кластера

После сборки модели кластера выполнено моделирование срабатывания триггера в зависимости от направления движения и точки запуска мюона. Триггер гирлянды считается сработавшим, если в одной секции (каждая гирлянда делится на 3 объединения из 12 ОМ – секции) сигнал был зарегистрирован двумя соседними оптическими модулями. В свою очередь триггер кластера считается сработавшим при срабатывании любой гирлянды. Само моделирование происходило следующим образом: на расстоянии  $-150$  м по оси  $x$ , с координатой  $z = 0$  м и  $y = 1$  м запускался мюон с энергией  $150$  ГэВ вдоль оси  $x$  (см. рисунок 3.5). На каждом следующем шаге расстояние по оси  $y$  увеличивалось на  $2$  метра и на каждый шаг генерировалось  $1000$  событий. Расчеты проводились до значения  $y = 79$  м, после которого вероятность срабатывания триггера становилась пренебрежимо малой.

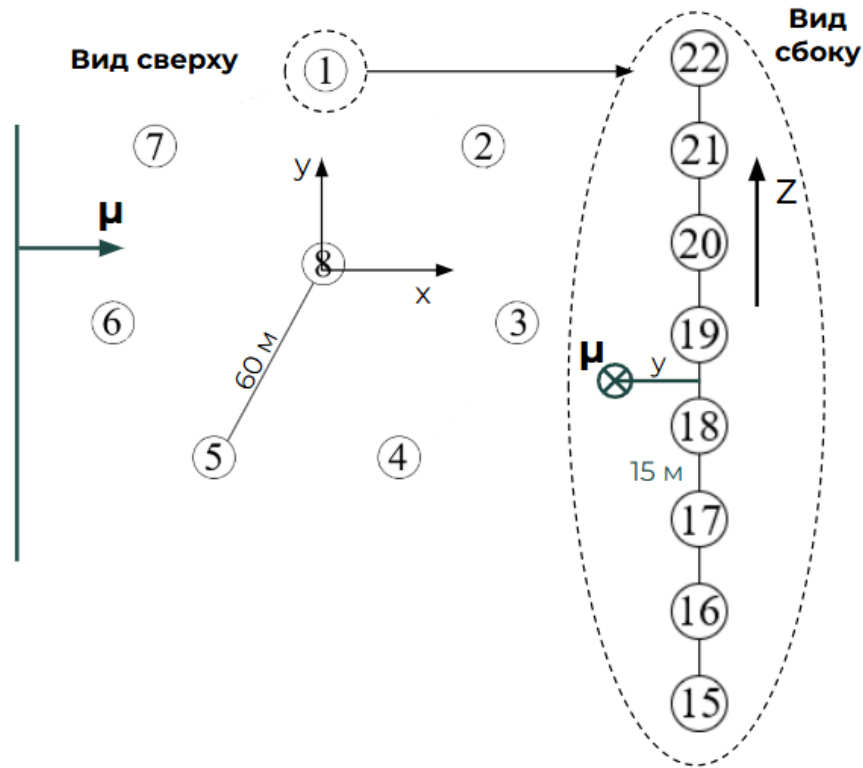


Рисунок 3.5 — Схема моделирования срабатывания триггера

В ходе моделирования записывались значения количества фотонов попавших на фотокатод каждого ОМ, а также соответствующее число выбитых фотоэлектронов. По полученным данным был построен график зависимости срабатывания триггера от расстояния запуска по оси  $y$ , он представлен на рисунке 3.6. На графике отчетливо видно: чем ближе к гирлянде пролетает мюон, тем чаще срабатывает триггер.

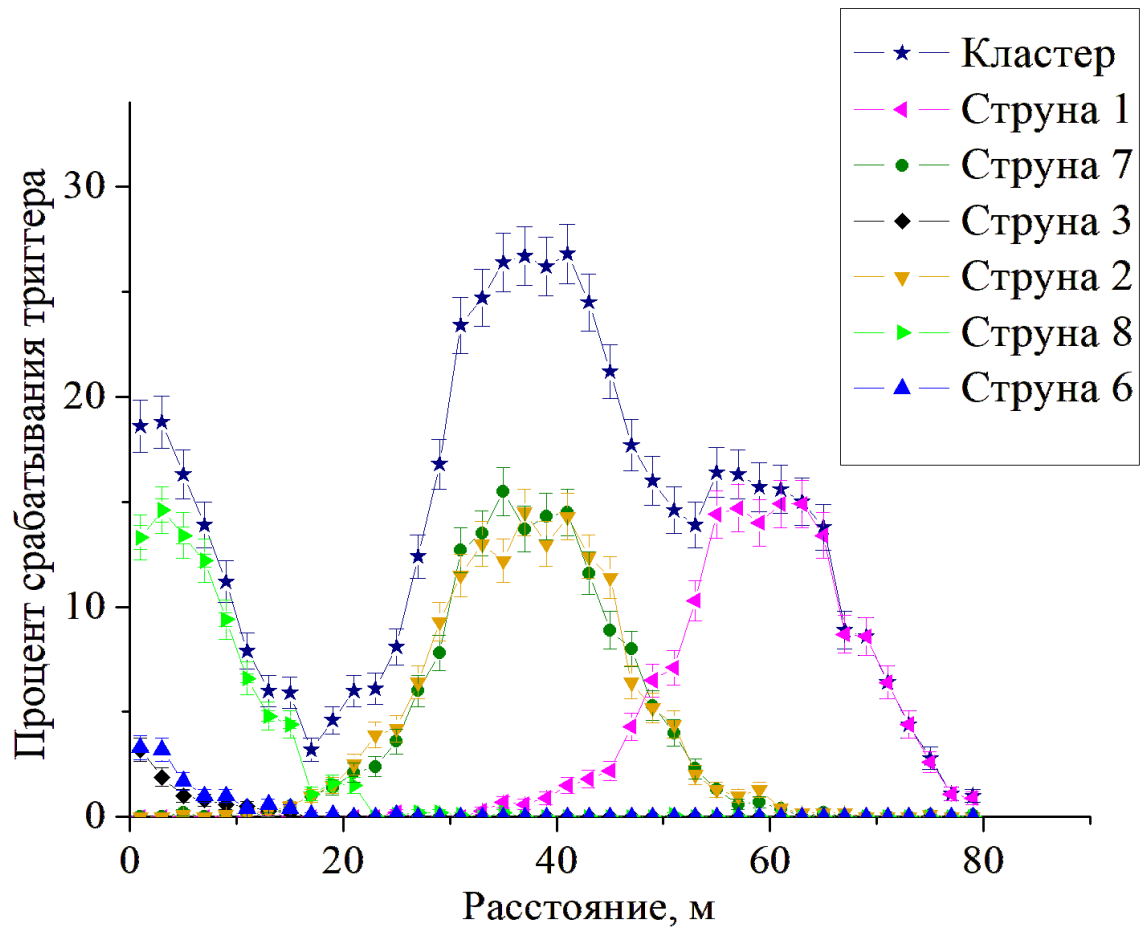


Рисунок 3.6 — Результаты моделирования триггера кластера

### 3.5 Переход на многопоточный расчет

Для ускорения вычислений модель была переведена в многопоточный режим выполнения. В данном подходе обработка независимых событий распределяется между несколькими вычислительными потоками, что позволяет эффективно задействовать ресурсы многоядерного процессора. За счет этого значительно ускоряется процесс моделирования.

Поскольку потоки работают с общей областью памяти, особое внимание уделялось корректной организации доступа к данным. Для предотвращения конфликтов при одновременной записи использовались механизмы синхронизации и разделение данных на потоковые и общие. После перевода программы было проведено повторное моделирование срабатывания триггера кластера. Получение идентичных результатов подтвердило корректность работы такого подхода.

При использовании 6 вычислительных ядер было достигнуто ускорение примерно в 2.5–3 раза по сравнению с последовательной версией программы.

## 3.6 Рассеяние света

На данном этапе в модели кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD учтено рассеяние света, что позволит исследовать влияние параметров среды на временные задержки оптических фотонов и точность реконструкции треков мюонов.

Поскольку байкальская вода не является идеально чистой средой, для нее необходимо применять рассеяние Ми, которое представляет теоретически строгое решение задачи рассеяния электромагнитной волны на сферической частице конечного размера, сопоставимого с длиной волны света. Оно обобщает и включает в себя как предельный случай рассеяние Рэлея (для очень малых частиц), так и геометрическую оптику (для частиц значительно больше длины волны).

Полная теория Ми решает уравнения Максвелла для рассеяния электромагнитной волны на сферической частице конечного размера. В результате для каждого взаимодействия требуется вычислять амплитуды рассеяния через бесконечные ряды функций Бесселя и Лежандра. Для задач, где моделируются миллионы оптических фотонов методом Монте-Карло, такой подход абсолютно не подходит. Поэтому в Geant4 рассеяние Ми основывается на феноменологическом приближении — фазовой функции Хеньи–Гринштейна (см. формулу 3.1) [6]:

$$p(\cos\theta) = \frac{1}{2} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g\cos\theta)^{3/2}}, \quad (3.1)$$

где  $g$  — эффективный параметр, характеризующий среднее направление рассеяния и называющийся индикатрисой рассеяния.

Однако классическая функция Хеньи–Гринштейна плохо описывает обратное рассеяние, поэтому в Geant4 используется модифицированная двухкомпонентная модель из двух таких функций: первая часть отвечает за рассеяние вперед, а вторая отвечает за рассеяние назад [7]. При таком подходе необходимо задать два дополнительных параметра: индикатрису рассеяния для компоненты, отвечающую за рассеяния назад, и  $\alpha$ , которая определяет

доли частиц, рассеивающихся в прямом и обратном направлении (см. формулу 3.2):

$$p(\theta) = \alpha p_{forward} + (1 - \alpha) p_{backward}. \quad (3.2)$$

Для модели кластера были выбраны  $g_{forward} = 0.88$  (см. рисунок 3.7),  $g_{backward} = 0.0$ ,  $\alpha = 1.0$  [8]. Помимо перечисленных параметров необходимо также задать характерную длину рассеяния, в зависимости от энергий фотонов она составляет от 20 м до 70 м (см. рисунок 3.8) [8].

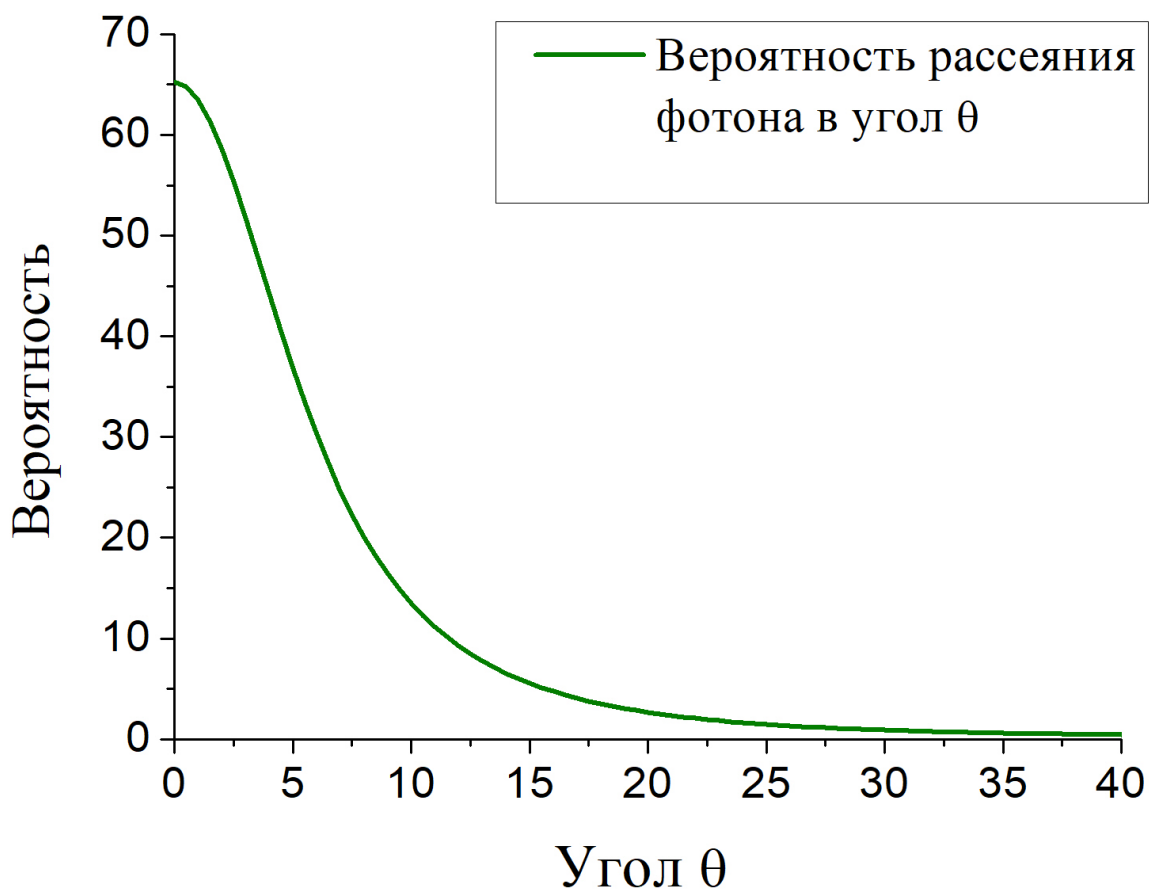


Рисунок 3.7 — График вероятности рассеяния фотона  $P(\theta)$  по углу  $\theta$

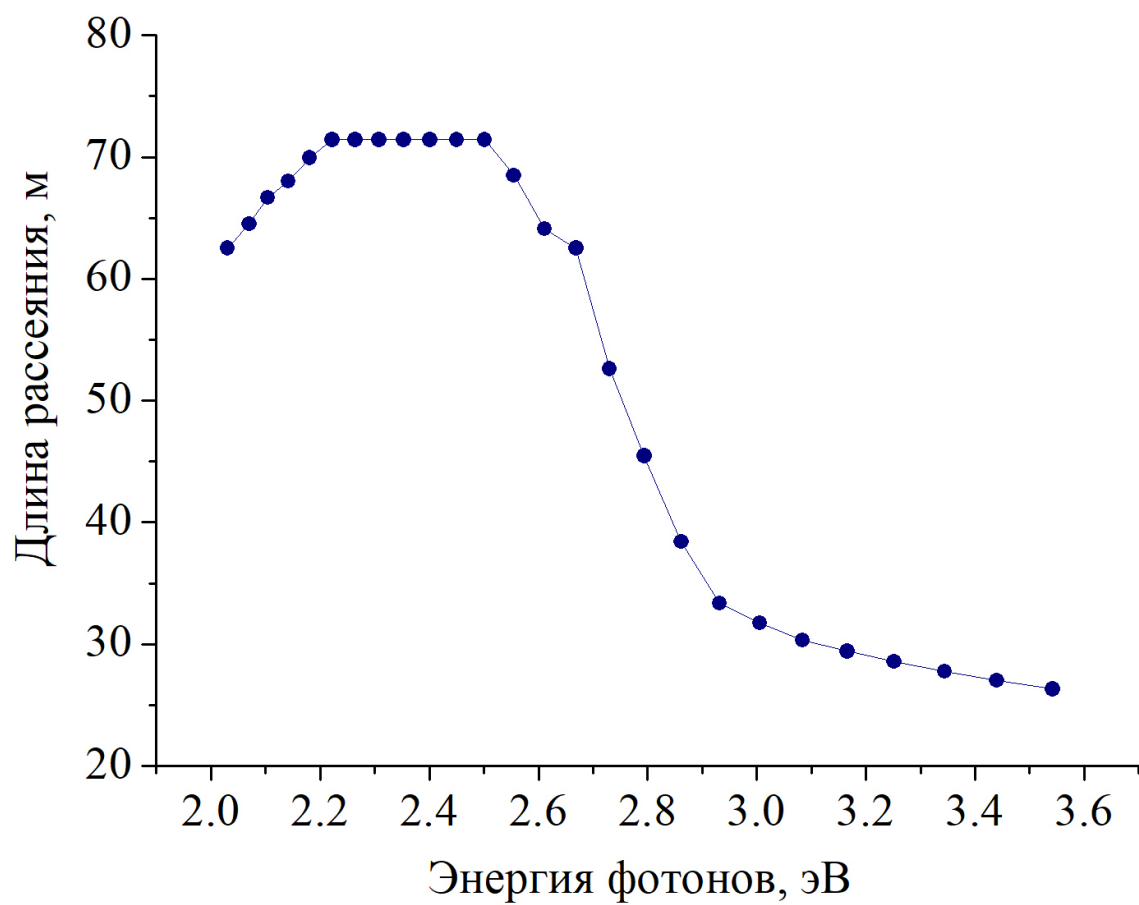


Рисунок 3.8 — График длины рассеяния

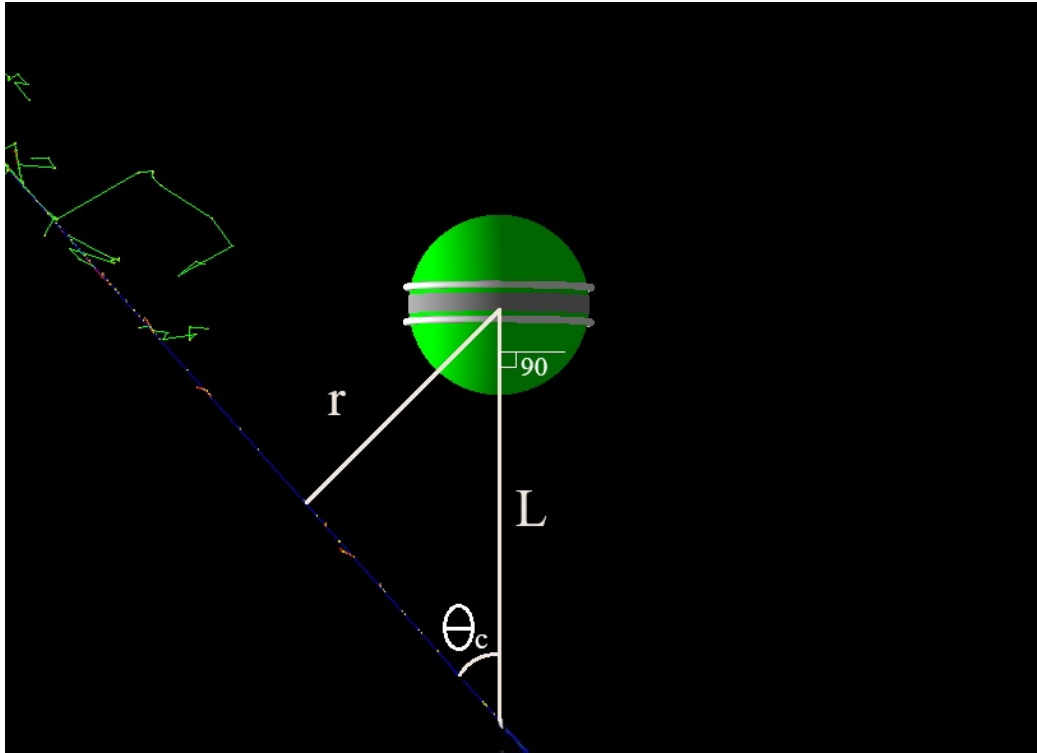


Рисунок 3.9 — Схема моделирования зависимости отклика ОМ от минимального расстояния от трека мюона до центра ОМ

Для анализа влияния рассеяния света было проведено моделирование амплитуды отклика ОМ в зависимости от минимального расстояния от трека мюона до центра ОМ, на рисунке 3.9 оно обозначено как  $r$ . Мюон с энергией 100 ГэВ запускался таким образом, чтобы направление распространения черенковских фотонов вблизи ОМ соответствовало нормальному падению на фотокатод ФЭУ. Для текущего значения  $L$  мюон запускался 1500 раз. Затем расстояние  $L$  увеличивалось на 1 м. Моделирование проводилось дважды: с включенной и выключенной физикой рассеяния. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.10. По предварительным результатам видно, что кривые с рассеянием и без рассеяния практически совпадают. Полученный результат можно объяснить тем, что моделирование проводилось для расстояний меньших, чем длины рассеяния фотонов, при этом из-за индикатрисы рассеяния  $g_{forward} = 0.88$  рассеянные фотоны двигаются практически в том же направлении и в большей степени все равно достигают поверхности фотокатода. Полученные результаты являются предварительными, необходимо получить более достоверные параметры рассеяния. Так же необходимо прове-

речь самую реализацию рассеяния в Geant4: провести ряд экспериментов для того, чтобы понять как именно параметры рассеяния влияют на распространение оптических фотонов в воде.

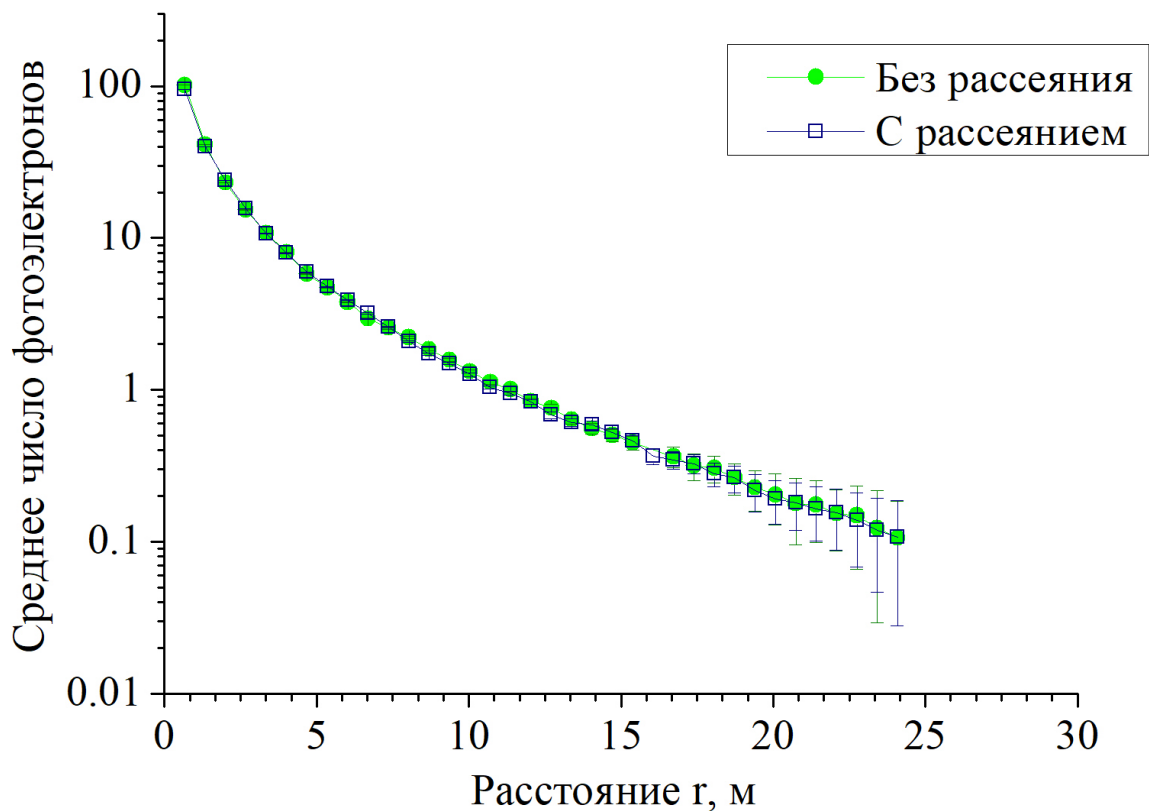


Рисунок 3.10 — Предварительные результаты моделирования амплитуды рассеяния в зависимости от минимального расстояния от трека мюона до центра ОМ

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам научно-исследовательской работы были изучены структура и задачи нейтринного телескопа Baikal-GVD. Был изучен принцип работы оптических модулей, использующихся в эксперименте в качестве детекторов, регистрирующих черенковское излучение.

Была получена модель оптического модуля в Geant4. Работоспособность модели подтверждена путем получения зависимости отклика ОМ от угла потоков фотонов. Проведена оптимизация модели.

В ходе работы реализована модель полноценного кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD. Проведено моделирование срабатывания триггера кластера в зависимости от параметров запуска мюона.

Для ускорения расчетов осуществлен перевод программы на многопоточное вычисление.

Получены первые результаты анализа влияния рассеяния света на регистрацию событий. Модель будет развиваться в этом направлении и будет использована для более детального анализа данных установки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Avrorin A.D., Avrorin A.V. et al. High-energy neutrino astronomy and the Baikal-GVD neutrino telescope // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2021. — Vol. 84, No. 4. — Pp. 513-518.
- [2] Safronov G. The status and astrophysics results of the Baikal-GVD neutrino telescope // *Proceedings of Science*. — 2025. — Vol. 501. Art. num. 1161.
- [3] Шейфлер А.А. Оптический модуль Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD: дис. канд. физ.-мат. наук / Шейфлер А.А. — Москва: Институт ядерных исследований Российской академии наук, 2016.
- [4] Аврорин А.В. Оптический модуль Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD // *Письма в ЭЧАЯ*. — 2016. — Т. 13, № 6. С. 1143-1157.
- [5] Avrorin A.D. et al. The optical module of Baikal-GVD // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2016. — Vol. 13, No. 6. — Pp. 737–746.
- [6] Программный пакет Geant4: <https://geant4.web.cern.ch/docs/> (дата обращения: 27.05.2026).
- [7] Kattawar G.W. A three-parameter analytic phase function for multiple scattering calculations // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 1975. — Vol. 15. — Pp. 839–849.
- [8] Джилкибаев Ж.-А.М., Шайбонов Б.А. Влияние оптических параметров среды на эффективность регистрации ливней высоких энергий в глубоководных экспериментах. Препринт ИЯИ РАН № 1073/2002 — Москва: Институт ядерных исследований Российской академии наук.
- [9] Geant4 Collaboration. Physics Reference Manual: Optical Photons — [https://geant4.web.cern.ch/documentation/pipelines/master/prm\\_html/Physics](https://geant4.web.cern.ch/documentation/pipelines/master/prm_html/Physics)

ReferenceManual/electromagnetic/optical\_photons/optical.html (дата обращения: 27.05.2026).