

УДК 53.082.8; 53.082.77; 53.083.91

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ГИБРИДНОГО ДЕТЕКТОРА ИЗ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И ЭМУЛЬСИОННОЙ КАМЕРЫ

М. М. Чернявский, А. А. Гиппиус, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева,  
Н. Г. Полухина, Т. В. Щедрина, Н. И. Старков, Е. Н. Старкова

*Представлены результаты моделирования совместной работы детекторов двух типов – сцинтилляционных оптических волокон SciFi и эмульсионной камеры. Для оценки результатов работы гибридного детектора была создана модель, реализованная в программном пакете GEANT4. Разработанные методы моделирования могут быть использованы при подготовке других экспериментов с гибридными детекторами аналогичного типа.*

**Ключевые слова:** фотографическая ядерная эмульсия, сцинтилляционные оптические волокна SciFi, гибридный детектор, моделирование отклика детектора

*Введение.* Каждый тип детектора имеет как свои преимущества, так и недостатки. Эмульсионная камера (ЭК) обладает беспрецедентным пространственным разрешением ( $\sim 1$  мкм), но при этом является интегральным по времени прибором, накапливающим информацию за достаточно большой промежуток времени. Оптоволоконные сцинтилляционные детекторы SciFi (scintillating fibre), в сочетании с кремниевыми фотоумножителями SiPM (silicon photomultiplier), позволяют считывать сигнал в реальном времени, однако их пространственное разрешение ( $\sim 50$  мкм) значительно уступает разрешению эмульсионной камеры. Гибридный прибор на основе этих двух устройств позволяет объединить их положительные свойства и ослабить недостатки. Эксперимент по тестированию такого гибридного прибора, поставленный сотрудниками ФИАН и Курчатовского института, продемонстрировал возможность совмещения с большой точностью координатных систем SciFi и ЭК на основе специально разработанного алгоритма [1].

Эмульсионной камерой называется сборка из нескольких ядерно-эмульсионных плёнок, каждая из которых представляет собой пластиковую пластину, покрытую с двух

---

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ninakonovalova@yandex.ru.

сторон слоем особо чувствительной фотографической ядерной эмульсии. Ядерная эмульсия – это гель на основе желатина, включающий светочувствительные кристаллы галогенида серебра AgBr в высокой концентрации. Повышенная концентрация кристаллов AgBr позволяет регистрировать прохождение заряженных частиц высоких энергий, создающих в ядерной эмульсии скрытое изображение в виде цепочки активированных кристаллов AgBr вдоль траектории частицы. В результате химической обработки (проявки) в этих кристаллах восстанавливаются зёрна металлического серебра, видимые под оптическим микроскопом. Цепочка проявленных зерен серебра с большой точностью совпадает с положением траектории частицы в пространстве детектора. Наиболее удобным для экспериментов считается размер плёнок  $10 \times 12 \text{ см}^2$  на пластиковой основе толщиной 175 мкм со слоями ядерной эмульсии по 50 мкм с каждой стороны [2].

В детекторах SciFi вещество сцинтиллятора распределено внутри оптоволокна, что позволяет им объединять свойства активного элемента и световода. Прохождение заряженной частицы через волокно SciFi инициирует появление фотонов, энергетический спектр которых характерен для данного сцинтиллятора. Количество фотонов и их распределение по энергии зависят от количества энергии, выделенной частицей в волокне. Согласно [3], световой выход для использованного при моделировании сцинтиллятора составляет 8000 фотонов на 1 МэВ энерговыделения, которое зависит от энергии частицы и длины её пути в волокне SciFi.

Эмульсионная камера является интегральным детектором и фиксирует треки проходящих заряженных частиц в течение всего времени экспозиции. Это затрудняет идентификацию треков, исходящих из одной вершины, например, в событиях множественного рождения. Временная привязка событий с помощью SciFi даёт возможность вести поиск треков внутри узкого временного интервала, т.е. намного уменьшить число посторонних следов.

*Моделирование гибридного детектора.* Целью моделирования гибридного детектора являлся анализ основных характеристик его отклика на прохождение заряженной частицы для выработки оптимальных условий проведения эксперимента. Конструкция гибридного детектора ЭК+SciFi, экспонировавшегося в тестовом эксперименте потоком атмосферных мюонов [1], состояла из нескольких рядов плотно уложенных SciFi-волокон длиной  $\sim 1 \text{ м}$  и диаметром 250 мкм с расположенной над ними эмульсионной камерой в несколько слоёв ядерно-эмульсионных плёнок. Ширина детектора составляла 135 мм, а суммарное число волокон превышало 2000. Конструкция SciFi была полностью воспроизведена при моделировании.

Распространение фотонов в волокне происходит вследствие полного внутреннего отражения от стенок волокна. Свет, генерируемый частицей внутри оптического волокна, направляется на примыкающий к его торцам пиксельный детектор SiPM, состоящий из кремниевых фотоумножителей (пикселей) квадратной формы с внешней стороной 50 мкм и внутренней 35 мкм, собранных в каналы по схеме  $4 \times 24$ . Фотоны, переданные по оптоволокну на элемент фотоумножителя, вызывают появление в нём электрического сигнала.

Для моделирования формирования электрического сигнала в гибридном детекторе на основе инструментария GEANT4 был разработан программный продукт, детально воспроизводящий работу детектора. Проект детектора включал четыре двусторонние эмульсионные пластины и расположенные под ними шесть слоёв сцинтилляционных волокон (рис. 1).

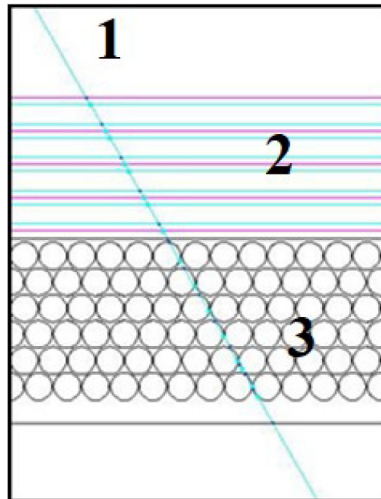


Рис. 1: Схема гибридного детектора ЭК+SciFi, использованная при моделировании: 1 – трек мюона, 2 – эмульсионные слои, 3 – слои SciFi.

Моделирование на основе GEANT4 позволяет подробно проследить прохождение частицы через детектор и получить её кинематические характеристики на всех этапах. В частности, фиксируются потери энергии частицей на каждом шаге её прохождения через детектор, а также суммарная энергия, выделенная в каждом отдельном волокне.

При моделировании гибридного детектора ЭК+SciFi рассматривались этапы прохождения фотонов в волокне и их регистрация с помощью SiPM. Модель детектора SciFi была построена таким образом, что каждое волокно имело индивидуальный номер, связанный с её положением в сборке. По величине выделенной в волокне энергии

рассчитывалось количество сгенерированных фотонов, а величины их энергии определялись методом Монте–Карло в соответствии со спектром, представленным на рис. 2 [4].

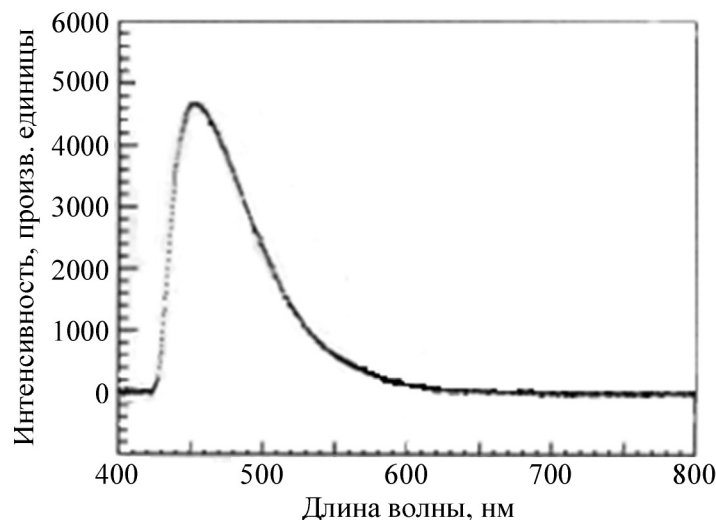


Рис. 2: Спектр фотонов, генерируемых заряженными частицами в волокнах SciFi [4].

Условием полного внутреннего отражения фотона от стенок волокна является его падение под углом не более 27 градусов к поверхности волокна [3]. В процессе моделирования фотоны излучались изотропно с последующим исключением из рассмотрения событий, не удовлетворяющих условию полного внутреннего отражения. При распространении фотонов учитывалась возможность их поглощения материалом волокна, определяемая величиной коэффициента затухания в результате поглощения. Вероятность поглощения для каждого фотона определялась по экспоненциальному закону в соответствии с распределением длины затухания, приведённом на рис. 3 [3, 4].

Фотоны, достигшие торца волокна, попадали на матрицу пикселей SiPM. Пиксельная матрица представляла собой пластиковую подложку с закреплёнными на ней кремниевыми элементами (пикселями), собранными в каналы по 96 элементов в каждом (4 элемента по горизонтали и 24 по вертикали, см. рис. 4). Полезная площадь матрицы составляла менее 50%. На рис. 4 представлены результаты срабатывания SciFi при прохождении частицы под углами 0, 10 и 30 градусов к поверхности детектора перпендикулярно к осям его волокон.

Розыгрыш точки фиксации фотона пикселем на поверхности матрицы осуществлялся следующим образом. Внутри круга диаметром 250 мкм (проекция сечения волокна на матрицу) разыгрывались расстояние от его центра и азимутальный угол. В случае попадания фотона на пиксель учитывалась вероятность его срабатывания (см. рис. 5).

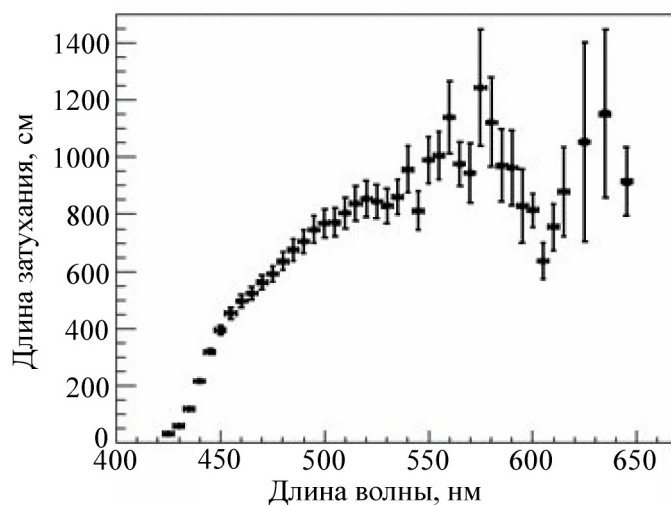


Рис. 3: Коэффициент затухания в результате поглощения фотона в оптоволокне в зависимости от длины волны [3, 4].

Эффективность регистрации фотона PDE (photon detection efficiency) зависит от перенапряжения  $\Delta V$  (превышения напряжения пробоя), приложенного к SiPM [4]. Для розыгрыша была выбрана зависимость PDE при перенапряжении 3.5 В.

Полная вероятность срабатывания кремниевого элемента зависела от количества попавших на него фотонов. Вклад от фотонов, попавших на каждый кремниевый элемент, суммировался, и результатом работы SciFi был суммарный по пикселям сигнал от каждого канала, величина которого соответствовала количеству сработавших элементов PDE в канале (см. рис. 6).

Для моделирования отклика гибридного детектора и оценки его работы для каждого угла было разыграно по 500 событий прохождения через детектор электронов и протонов с энергиями 1 и 2 ГэВ. Как оказалось, эти случаи незначительно отличаются друг от друга, поэтому далее обсуждается только результат для электронов с энергией 1 ГэВ.

Количество выделенной энергии, и следовательно, число сработавших каналов SiPM определяется длиной пути частицы в материале волокна, который зависит как от угла её падения к поверхности волокна, так и от положения трека частицы относительно оси волокна. Чтобы усреднить эту зависимость, точка испускания частицы в данных расчётах генерировалась в квадрате размером  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup> в плоскости, параллельной эмульсионным слоям и рядам волокон SciFi.

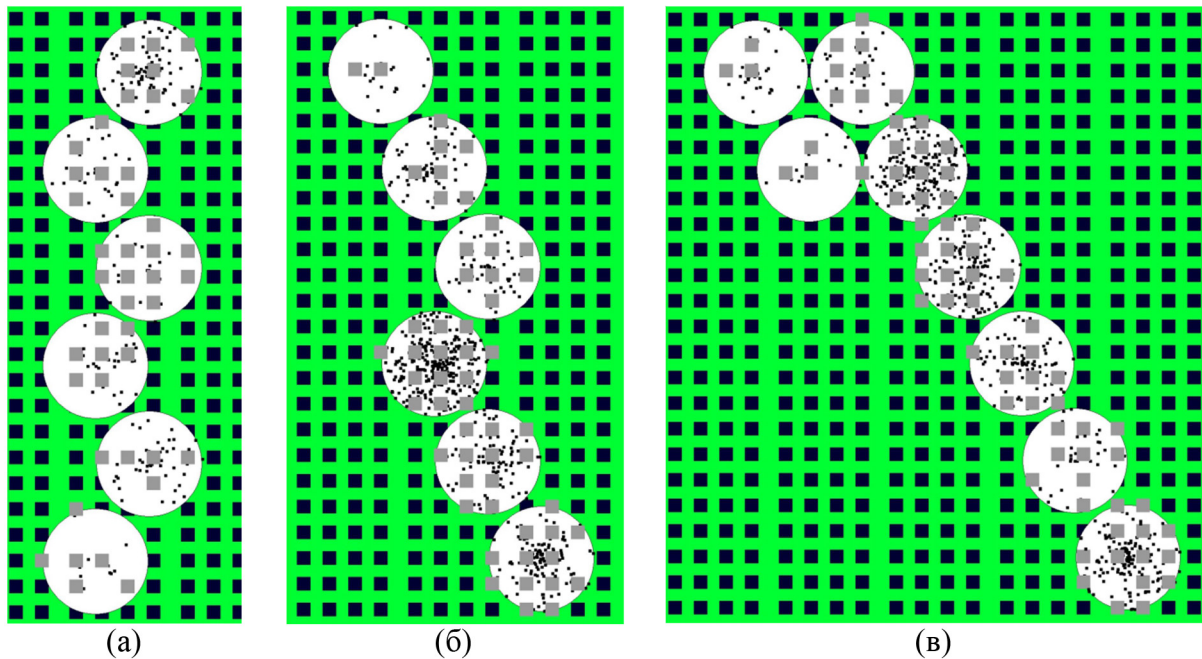


Рис. 4: Результат работы детектора SciFi+SiPM при прохождении частицы под углом 0 (а), 10 (б) и 30 (в) градусов. Квадратами обозначены кремниевые элементы (серым цветом отмечены сработавшие); зелёный цвет между чёрными квадратами соответствует нечувствительной зоне SiPM; белые круги – проекции волокон, засветивших пиксельную матрицу; чёрные точки – фотоны, достигшие пиксельной матрицы.

Рис. 7 демонстрирует зависимость количества выделенной энергии в волокнах SciFi от угла падения частицы, а рис. 8 – от числа сработавших каналов.

Рис. 7 и 8 демонстрируют сильную зависимость амплитуды сигналов SciFi от угла падения частицы, однако распределения при разных углах существенно перекрываются, а сами распределения довольно широкие. Это означает, что точность определения угла с помощью одного только детектора SciFi невелика. Тем не менее, положение места прохождения частицы может быть определено по центру масс активированных каналов с точностью порядка 250 мкм.

В процессе моделирования была проанализирована возможность определения величины угла падения частицы на детектор путём аппроксимации сработавших пикселей прямой линией. Результаты показали большую неопределённость в определении величины угла ( $\pm 10$  градусов).

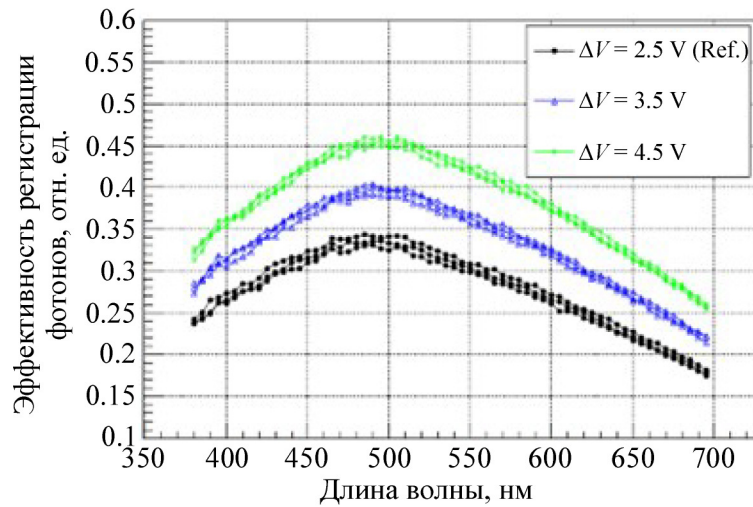


Рис. 5: Эффективность регистрации фотонов PDE в зависимости от длины волны и приложенного перенапряжения  $\Delta V$  [4].

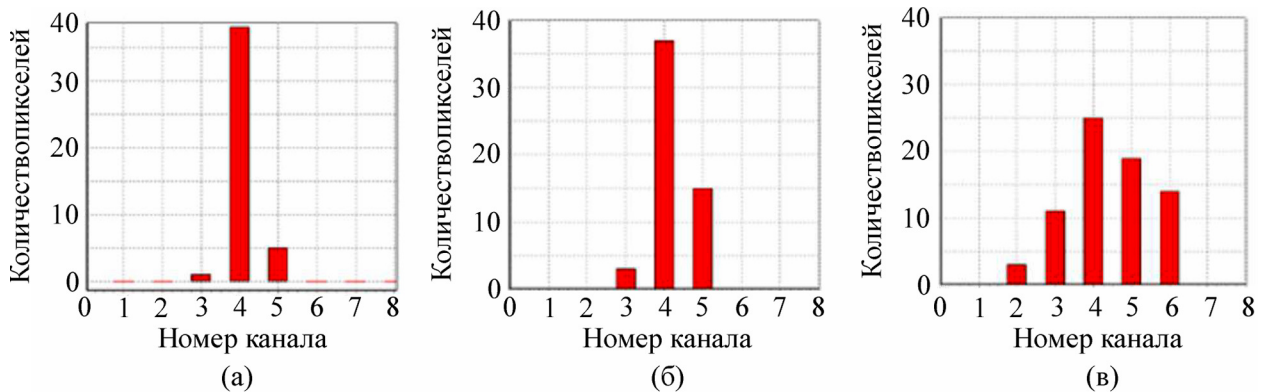


Рис. 6: Сигналы в пиксельном детекторе SiPM от событий, соответствующих рис. 4: 0 (а), 10 (б) и 30 (в) градусов.

Эмульсионная камера способна определить положение частицы и её угол с гораздо большей точностью, чем детектор SciFi, однако она набирает треки от многих событий в течение всей экспозиции, что затрудняет их идентификацию. Это имеет принципиальное значение для экспериментов, в которых происходит множественное рождение частиц и существует проблема отбора треков частиц, вылетающих из одной вершины. Разделение событий во времени с помощью SciFi позволяет решить эту задачу.

Данное моделирование было проведено с набором SciFi вдоль только одной оси координат. Наличие второго набора SciFi с расположением волокон перпендикуляр-

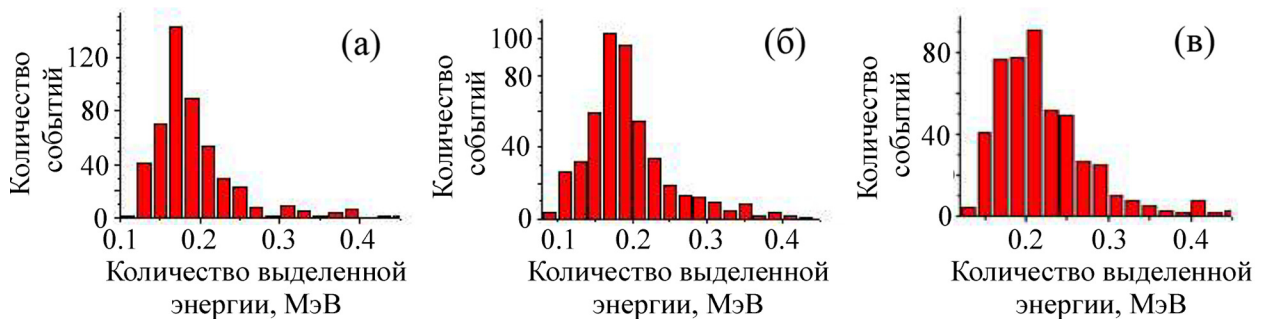


Рис. 7: Распределение количества выделенной энергии (МэВ) в отдельном волокне для разных углов падения частицы: 0 (а), 10 (б) и 30 (в) градусов.

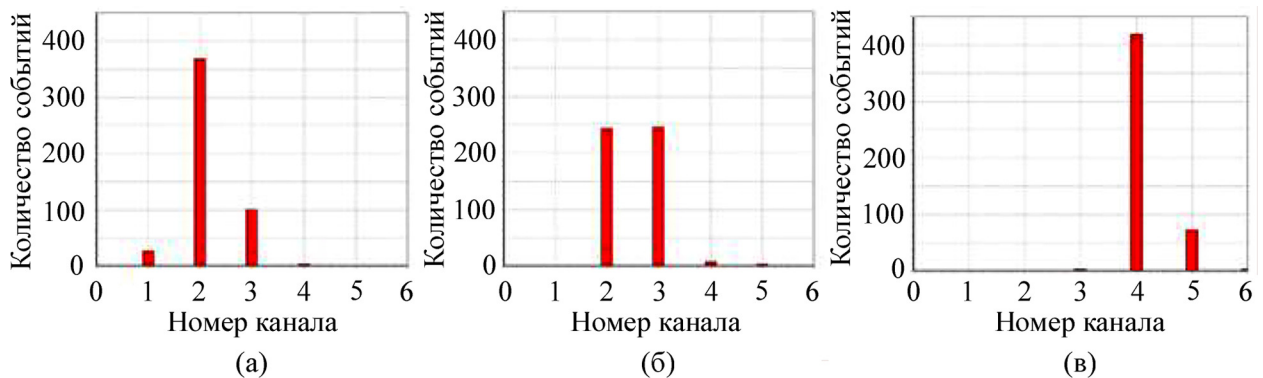


Рис. 8: Распределение количества сработавших каналов для разных углов падения частицы: 0 (а), 10 (б) и 30 (в) градусов.

но первому позволит определить вторую координату положения трека в детекторе. В процессе моделирования были детально учтены свойства основных элементов системы сцинтилляционных волокон SciFi. Это позволило провести оценку режимов работы гибридной установки при проведении эксперимента по регистрации атмосферных мюонов [1], в котором была показана возможность идентификации частиц обоими детекторами и продления треков из одного детектора в другой с большой точностью.

*Заключение.* Представлены результаты моделирования отклика гибридного детектора, собранного из детекторов двух типов – сцинтилляционных оптических волокон SciFi и эмульсионной камеры. Моделирование на основе программного инструментария GEANT4 продемонстрировало, что их совместное использование позволяет совместить трек частицы в обоих детекторах и осуществить временную привязку прохождения частиц. Это даёт возможность более эффективно идентифицировать треки частиц из одной вершины, в том числе от событий множественного рождения.



Работа поддержана Российским научным фондом по программе “Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами” (проект № 23-12-00054).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. M. Chernyavskii, A. A. Gippius, L. A. Goncharova, et al., *JINST* **17**, P02002 (2022). DOI: 10.1088/1748-0221/17/02/P02002.
- [2] С. Г. Васина, Н. И. Старков, Н. Г. Полухина, et al., *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **49**(12), 429 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622120107.
- [3] The LHCb collaboration, LHCb Tracker Upgrade Technical Design Report, CERN/LHCC 2014-001, LHCb-TDR-015 (2014). <http://cds.cern.ch/record/1647400>.
- [4] T. Kirn, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **845**, 481 (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.057>.

Поступила в редакцию 18 мая 2023 г.

После доработки 3 июля 2023 г.

Принята к публикации 4 июля 2023 г.