

УДК 539.1.074

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОТКЛИКА НА МЮОНЫ ДЛЯ ПЛАСТИН ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА В СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ОБЁРТКЕ

В. Ю. Русинов¹, А. А. Стифуткин¹, М. В. Чадеева²

Для планируемых экспериментов на БАК с повышенной светимостью необходимы детекторные подсистемы с увеличенной сегментацией, чтобы решать проблемы, связанные с чрезвычайно высоким уровнем наложения событий. Для новых детекторов частиц разрабатывают и тестируют как кремниевые, так и сцинтилляционные элементы. В данной работе изучена температурная зависимость отклика на космические мюоны для небольших сцинтилляционных пластин, обёрнутых в светоотражающую плёнку, с прямым считыванием света кремниевыми фотоумножителями. Было обнаружено, что отклик таких элементов падает примерно на 10% при понижении температуры от $+30^{\circ}\text{C}$ до -30°C .

Ключевые слова: органический сцинтиллятор, кремниевый фотоумножитель, космические мюоны.

Введение. В экспериментах по физике частиц широко применяются органические сцинтилляторы разных форм и размеров, от больших пластин и полос со смещёнными волокнами до небольших пластинок с прямым считыванием света миниатюрными фотодетекторами. Для улучшения светосбора используют диффузный отражатель или светоотражающую плёнку, а работа при низких температурах позволяет снизить шумы фотоприёмника и повысить эффективность и разрешение. Изобретение кремниевых фотоумножителей (КФУ) позволило в современных детекторах частиц реализовать системы с высокой сегментацией на основе компактных сборок (ячеек) сцинтиллятор – КФУ. Примером действующего детектора является аналоговый адронный

¹ НИЯУ «МИФИ», 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: chadeevamv@lebedev.ru.

калориметр CALICE AHCAL объёмом порядка 1 м^3 , где активные элементы – это около 22 тысяч обёрнутых в плёнку пластин размером $30 \times 30 \times 3 \text{ мм}^3$ с прямым считыванием света с помощью КФУ [1]. Высокая сегментация даёт возможность эффективно применять современные методы реконструкции с учётом структуры адронных струй и даже адронных ливней [2]. Калориметры, собранные из небольших сцинтилляционных ячеек, включены в техническое описание предлагаемых детекторов для будущих экспериментов на планируемых коллайдерах CEPC [3] и FCC [4]. Подобная технология была выбрана и для модернизации торцевых калориметров детектора CMS для работы на Большом адронном коллайдере с повышенной светимостью. Сцинтилляционная часть нового высокогранулярного калориметра CMS (HGCal) будет собрана из примерно 400 тысяч обёрнутых в плёнку сцинтилляционных пластин трапецевидной формы с прямым считыванием при помощи КФУ [5].

Калориметр HGCal будет работать при -30°C , в то время как входной контроль, сборка, тесты и предварительная калибровка ячеек с помощью минимально ионизирующих частиц проходят в нормальных условиях. Для надёжного прогнозирования параметров детектора в рабочем режиме важно учитывать температурные зависимости его характеристик. Для кремниевых фотоумножителей эти зависимости достаточно хорошо известны и, как правило, предоставляются производителями КФУ. Опубликованные результаты по пластику и плёнкам имеются лишь для некоторых материалов и ограниченного диапазона температур [6, 7]. В данной работе изучены температурные зависимости отклика на космические мюоны для ячеек, состоящих из сцинтилляционной пластины, светоотражающей плёнки и КФУ, в диапазоне от -30°C до $+30^\circ\text{C}$.

Экспериментальная установка. Объекты данного исследования – пластины из пластикового сцинтиллятора (полистирен с добавками 1.5% РТР и 0.1% РОРОР), предназначенные для прототипа нового торцевого калориметра детектора CMS HGCal и изготовленные на предприятии “Унипласт” (г. Владимир, Россия) методом литья под давлением. Пластины толщиной 3 мм имеют форму трапеций с минимальными (максимальными) основаниями от 32.9 мм (33.7 мм) до 37.6 мм (38.5 мм), высота трапеций равна большему основанию. В центре одной из плоскостей сделана лунка диаметром 6 мм и глубиной 1.6 мм для улучшения однородности светосбора на кремниевый фотоумножитель [8]. В данном эксперименте пластины были вручную обёрнуты в многослойную полимерную плёнку 3М ESR толщиной 82 микрона с коэффициентом отражения света выше 98% (согласно данным производителя). Со стороны лунки в плёнке было сделано отверстие для пропуска света к КФУ, как показано на фотографии рис. 1.

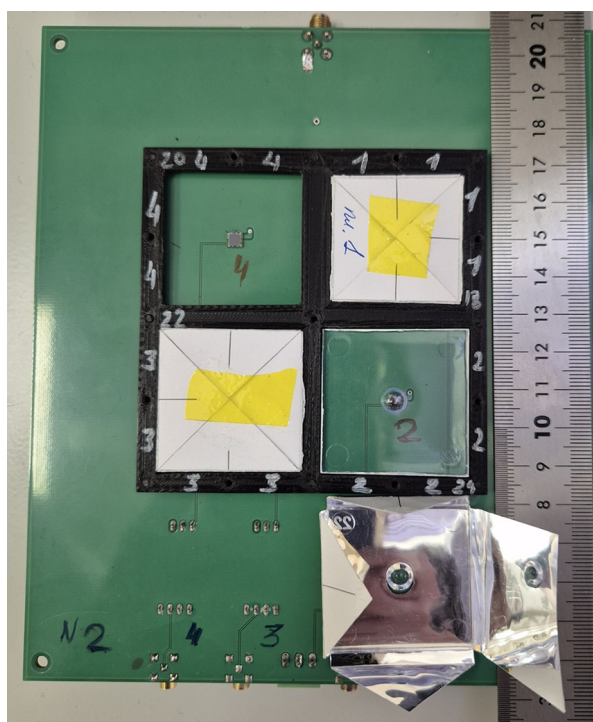


Рис. 1: Кассета на плате: пустая ячейка с КФУ (слева сверху), пластины в обёртке (справа сверху и слева внизу), пластина без обёртки (справа внизу); под кассетой показана пластина в раскрытой обёртке, вынутая из левой верхней ячейки.

Измерительная установка представляет собой этажерку размером $180 \times 160 \times 210$ мм³ с шестью горизонтальными направляющими для плат, расположенных одна над другой: плата разводки питания, нижний триггерный счётчик, три платы с исследуемыми пластинами и верхний триггерный счётчик. Триггерные счётчики – это сцинтилляционные пластины размером $140 \times 140 \times 4$ мм³ со спектросмещающим волокном, оптически сопряжённым с кремниевым фотоумножителем Hamamatsu S13360-1350PE. Вертикальное расстояние между платами триггерных счётчиков составляет примерно 130 мм.

На каждой из трёх плат для исследуемых пластин припаяны четыре кремниевых фотоумножителя SensL MicroFC-30035-SMT-WP (чувствительная область 3×3 мм²), разъёмы для усилителей, питания и считывания выходного сигнала, а также закреплены чёрные непрозрачные кассеты, вмещающие по четыре пластины. Пластины расположены в кассетах так, что каждый КФУ смотрит в центр лунки на одной из пластин через отверстие в светоотражающей обёртке, соответствующее размеру лунки (см. рис. 1). При использовании такой технологии, впервые опробованной в калориметре CALICE AHCAL [1], оптический контакт между сцинтиллятором и КФУ отсутствует.

На крышках кассет смонтированы дополнительные платы для светодиодной подсветки. Подсветка необходима при низких температурах для получения одноэлектронных спектров КФУ и определения коэффициента усиления в каждом канале.

При измерениях этажерку помещают в светоизолированную климатическую камеру, позволяющую контролировать температуру с точностью 0.1 °С. Остальные приборы измерительного стенда находятся вне климатической камеры: двухканальный источник-измеритель Keithley-2636B для питания КФУ (с одного выхода подаётся одинаковое напряжение смещения на 12 КФУ каналов с измеряемыми пластинами, а с другого выхода – одинаковое напряжение смещения на два КФУ триггерных счётчиков), источник АКИП-1142/3G для питания усилителей и светодиодов, а также 32-канальный флэш-АЦП CAEN VX1748 для оцифровки и считывания данных. Установка имеет 14 каналов – 12 для изучаемых пластин и 2 для триггеров. Верхний триггерный счётчик подключён к триггерному входу флэш-АЦП, а остальные 13 каналов, включая нижний триггерный счётчик, – к обычным входам флэш-АЦП.

Методика набора и обработки данных. Для считывания данных с флэш-АЦП, предварительного анализа и отбора событий была использована специализированная программа на основе пакета WaveDump (CAEN). Считывание амплитудных форм с флэш-АЦП для конкретного события начинается в момент, когда амплитуда верхнего триггерного счётчика превышает предварительно установленный порог. Событие проходит отбор, если амплитуда в нижнем триггерном счётчике превышает свой порог в пределах 10 нс от временной отметки, заданной верхним триггерным счётчиком. Для каждого отобранного события происходит запись 14 амплитудных форм длиной 1 мкс (частота оцифровки 1 ГГц) для дальнейшего анализа. Поскольку поперечная площадь триггерных счётчиков больше суммарной площади исследуемых пластин на одной плате, космический мюон может пересечь одну, две или три пластины на рабочих плоскостях или пройти мимо них. Таким образом, на каждое совпадение триггерных счётчиков можно получить от 0 до 3 сигнальных событий в измеряемых пластинах, при этом в остальных каналах будут записаны шумы. Типичное среднее число отобранных на данной установке триггерных срабатываний составляет порядка 12000 за 5 часов, что соответствует примерно 1500 мюонных сигналов на каждый рабочий канал.

Величина сигнала определяется как интеграл по амплитудной форме в фиксированном интервале 235 нс от момента срабатывания верхнего триггера. Окно интегрирования было подобрано на основе анализа формы импульса в нижней точке температурного диапазона –30 °С, чтобы исключить влияние изменения длительности импульса с

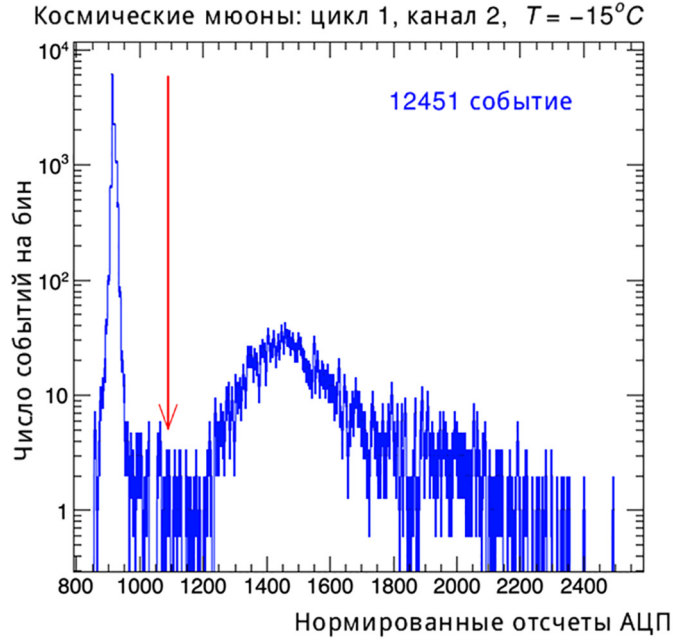


Рис. 2: Пример спектра зарегистрированных сигналов в одном из каналов установки. Красной стрелкой показано пороговое значение для отделения мюонного сигнала от шума.

температурой. На рис. 2 показан спектр сигналов для одного из каналов в единицах, интегрированных и нормированных на длину импульса отсчетов АЦП (нАЦП). Как видно из рис. 2, пьедестал в левой части спектра легко можно отделить от сигнала минимально ионизирующей частицы с помощью порогового значения. Сигнал от мюона в правой части спектра хорошо аппроксимируется свёрткой функций Ландау и Гаусса. Отклик детектора на мюоны LY_{ij} в фотоэлектронах (ф.э.) можно вычислить для i -го канала при температуре T_j по формуле

$$LY_{ij}(T_j) = \frac{M_{ij} - P_{ij}}{G_{ij} \cdot (1 + c_{ij})} \cdot \frac{PDE(OV_{iref})}{PDE(OV_{ij})}, \quad (1)$$

где M_{ij} – сигнал от мюона в единицах нАЦП, соответствующий максимуму функции свёртки, P_{ij} – пьедестал в единицах нАЦП, т. е. среднее значение сигнала в отсутствие мюона, G_{ij} – коэффициент усиления канала в единицах нАЦП/ф.э., c_{ij} – вероятность оптической связи между ячейками КФУ [9], $PDE(OV_{ij})$ – эффективность фотодетектирования в зависимости от перенапряжения OV_{ij} (перенапряжение – это разность между напряжением смещения и напряжением пробоя КФУ), OV_{iref} – перенапряжение при референсной температуре $T_{ref} = -30$ °C. В использованной схеме измерений набор шу-

мовых спектров для определения коэффициента усиления (при заданной температуре и заданном напряжении смещения) происходит одновременно с набором сигнальных спектров от космических мюонов, что позволяет минимизировать влияние температурных зависимостей КФУ и измерительного тракта в целом.

Для вычисления коэффициента усиления G_{ij} в i -ом канале при j -ой температуре был разработан алгоритм поиска одноэлектронных сигналов в исходных амплитудных формах, если сигнал от мюона в канале отсутствует. Пример шумового спектра, обогащённого одноэлектронными сигналами, показан на рис. 3. После независимой аппроксимации функциями Гаусса пьедестального и одноэлектронного пиков коэффициент усиления вычисляют по формуле $G_{ij} = m1_{ij} - m0_{ij}$, где $m0_{ij}$ и $m1_{ij}$ – средние аппроксимирующих функций для пьедестального и первого пиков, соответственно. Спектры, обогащённые одноэлектронными сигналами, были также использованы для оценки вероятности оптической связи c_{ij} путём вычисления соотношения между числом одинарных и многократных срабатываний в шумовом спектре. Разброс коэффициентов усиления в каналах составил порядка 5%, а измеренная вероятность оптической связи варьировалась от 7% до 14%.

При каждой температуре на всех КФУ рабочих каналов устанавливали одинаковое напряжение смещения. В то же время, по данным производителя, КФУ одного типа и серии могут иметь разброс характеристик, в том числе напряжений пробоя (на уровне порядка 400 мВ) и наклонов температурных зависимостей. Чтобы учесть возможные различия в перенапряжениях при разных температурах, в каждой температурной точке перед измерениями на космических мюонах проводили калибровку. Калибровочные измерения шумовых спектров со случайным триггером от генератора при пяти напряжениях смещения вокруг рабочей точки позволяют оценить напряжения пробоя в каждом канале и, соответственно, рабочее перенапряжение при каждой температуре и заданном напряжении смещения. Для параметризации зависимости эффективности от перенапряжения $PDE(OV)$ были использованы таблицы производителя и данные из работы [10].

Результаты. Для восьми пластин разного размера, вручную обёрнутых в светоотражающую плёнку, был измерен отклик на космические мюоны в пяти точках температурной шкалы от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ с шагом $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ в нескольких циклах нагрева и охлаждения. Для нескольких пластин была исследована эффективность светосбора при использовании диффузного отражателя, не показавшего хороших результатов. Рабочее напряжение смещения при каждой температуре выбирали так, чтобы оно соответство-

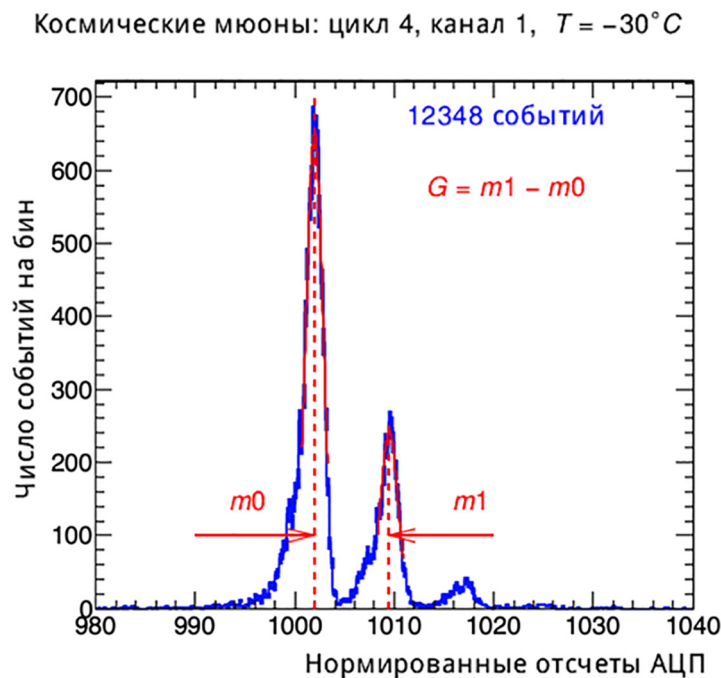


Рис. 3: Пример спектра шумов (синяя гистограмма), обогащённого одноэлектронными импульсами для расчёта коэффициента усиления G . Красные сплошные кривые – результат подгонки функциями Гаусса; красные пунктирные линии – средние функций подгонки ($m0$ – пьедестал, $m1$ соответствует 1 ф.э.).

вало перенапряжению примерно 3 В. Точные значения перенапряжения для каждого канала были определены с помощью калибровочных измерений (см. раздел 3). Изменения перенапряжения с температурой составили от 0.1% до 3% в отдельных каналах (в среднем 1.5%). Коррекция на зависимость эффективности фотодетектирования от перенапряжения была сделана индивидуально для каждого канала относительно референсной температуры -30°C (см. формулу (1)). Сравнение каналов между собой не проводилось из-за разных размеров пластин и отсутствия данных об абсолютной эффективности фотодетектирования КФУ. При температурах ниже $+30^\circ\text{C}$ для увеличения статистики в шумовых спектрах была использована светодиодная подсветка, вклад которой в мюонный сигнал составлял менее 0.2 ф.э. на канал.

Величина отклика на мюоны была вычислена в каждой точке по температуре с помощью формулы (1), что позволяет исключить влияние температурной зависимости характеристик измерительного тракта, включая КФУ. Были исследованы следующие источники систематических погрешностей: (а) погрешность измерения коэффициен-

та усиления по результатам аппроксимации функциями Гаусса, включая варьирование диапазонов подгонки ($<0.3\%$); (б) погрешность определения максимума функции свёртки, включая варьирование диапазона подгонки при аппроксимации ($<0.3\%$); (в) погрешность измерения напряжения пробоя с учётом приборной ошибки источника-измерителя ($<0.5\%$); (г) погрешность определения вероятности оптической связи КФУ ($\sim 10\%$). С учётом всех статистических и систематических вкладов итоговая относительная погрешность одиночного измерения в одном канале варьировалась от 1% до 3%. На рис. 4 показана зависимость взвешенных средних значений отклика по нескольким сериям измерений от температуры для 8 обёрнутых в плёнку пластин (6 серий для каналов 1–4 и 3 серии для каналов 5–8). Нарисованные на графике усы ошибок – взвешенные среднеквадратичные отклонения, которые характеризуют в значительной мере воспроизводимость результатов в циклах нагрева-охлаждения. Разброс абсолютных значений отклика в основном связан с различием в размерах пластин и с качеством ручного оборачивания.

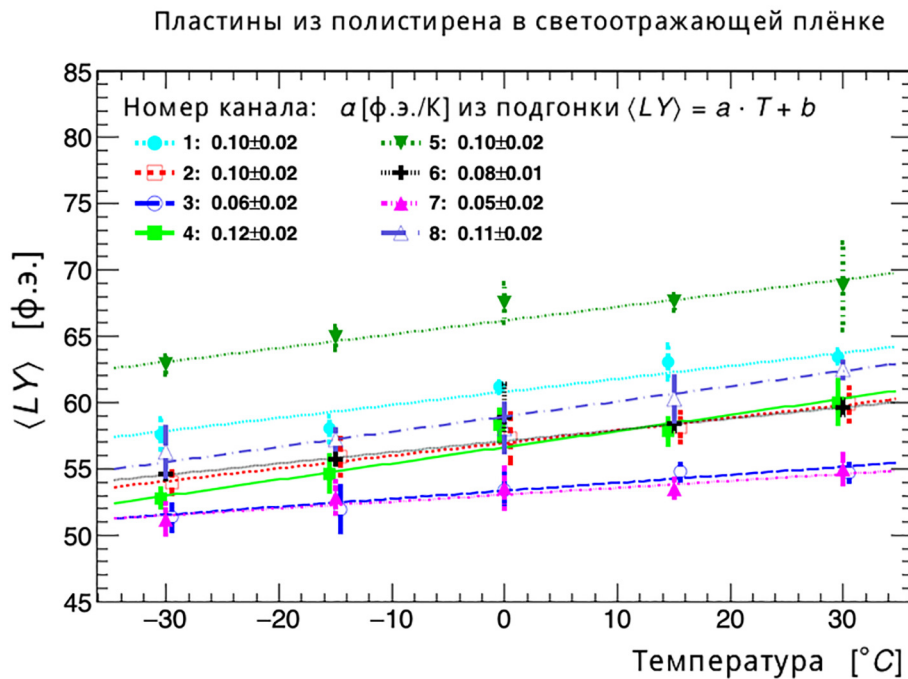


Рис. 4: Средневзвешенный отклик на мюоны в зависимости от температуры для 8 пластин, обёрнутых в светоотражающую плёнку; усы ошибок – взвешенные среднеквадратичные отклонения между сериями нагрева-охлаждения; прямые – линейная подгонка. Точки немного смещены вдоль оси x для лучшего отображения.

Измеренный отклик сцинтилляционных пластин в обёртке на минимально ионизирующие частицы снижается при понижении температуры со скоростью порядка 0.1 ф.э./К, что приводит к изменениям на уровне 10% в исследованном температурном диапазоне от +30 °С до –30 °С. Так как подобные сборки сцинтиллятор-КФУ предполагается использовать в нескольких проектируемых детекторах частиц, в том числе при низких температурах, учёт поправки на температурную зависимость даст возможность точнее спрогнозировать характеристики детектора. Поскольку методика измерений и обработки данных позволяет практически исключить влияние характеристик измерительного тракта, можно сделать вывод, что обнаруженный эффект обусловлен свойствами сцинтилляционного пластика и/или светоотражающей плёнки. Пробные измерения пластин толщиной 3 мм без обёртки или с диффузным отражателем показали, что в этих случаях не удаётся выделить сигнал от мюона из-за низкой эффективности светосбора. Поэтому для ответа на вопрос, какой именно материал обуславливает обнаруженную зависимость от температуры – пластик или плёнка, планируется провести измерения с пластинами большей толщины.

Разработка и тестирование электроники для данного эксперимента выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSWU-2023-0073.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. White et al., JINST **18**(11), P11018 (2023). DOI: 10.1088/1748-0221/18/11/P11018.
- [2] M. A. Thomson, Nucl. Instrum. Meth. A **611**(1), 25 (2009). DOI: 10.1016/j.nima.2009.09.009.
- [3] J. Gao, Int. J. Mod. Phys. A **36**(22), 2142005 (2021). DOI: 10.1142/S0217751X21420057.
- [4] A. Abada, Eur. Phys. J. C **79**(6), 474 (2019). DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-6904-3.
- [5] A. Steen, The CMS HGCal detector for HL-LHC upgrade. PoS EPS-HEP2017 521 (2017). DOI: 10.22323/1.314.0521.
- [6] L. Peralta, Nucl. Instrum. Meth. A **883**, 20 (2018). DOI: 10.1016/j.nima.2017.11.041.
- [7] S. M. Carturan et al., Eur. Phys. J. C **80**, 1057 (2020). DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-08640-1.
- [8] F. Simon, C. Soldner, Nucl. Instrum. Meth. A **620**, 196 (2010). DOI: 10.1016/j.nima.2010.03.142.
- [9] R. Klanner, Nucl. Instrum. Meth. A **926**, 36 (2019). DOI: 10.1016/j.nima.2018.11.083.

- [10] S. Gundacker et al., Phys. Med. Biol. **65**, P025001 (2020). DOI: 10.1088/1361-6560/ab63b4.

Поступила в редакцию 3 февраля 2025 г.

После доработки 21 апреля 2025 г.

Принята к публикации 21 апреля 2025 г.