

УДК 524.1

МОДЕЛЬ ЧЕРЕНКОВСКОГО ВОДНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ОБСЕРВАТОРИИ TAIGA-100

© 2026 г. М. П. Гуделев^а, *, А. Н. Дмитриева^а, А. Г. Богданов^а, И. И. Яшин^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: MPGudelev@mephi.ru

Поступила в редакцию 18.07.2025 г.

После доработки 18.07.2025 г.

Принята к публикации 29.07.2025 г.

Черенковский водный детектор (ЧВД), разрабатываемого в настоящее время проекта TAIGA-100 представляет собой цилиндрический бетонный бак, заглубленный в грунт и заполненный сверхчистой водой. Внутренняя поверхность водного объема представляет собой светоизолированный “мешок” с высоким коэффициентом диффузного отражения. Водный бак находится под толстым слоем грунта для поглощения электрон-фотонной и адронной компонент ШАЛ. В верхней части детектора расположен фотоумножитель с полусферическим фотокатодом. Для изучения характеристик ЧВД была разработана его модель в программном пакете Geant4, проведено моделирование регистрации частиц в ЧВД.

Ключевые слова: гамма-астрономия, черенковский водный детектор, моделирование, широкие атмосферные ливни, космические лучи

DOI: 10.56304/S207956292601015X

1. ВВЕДЕНИЕ

TAIGA (Tunka Advanced Instrument for Cosmic Rays and Gamma Astronomy) – крупнейшая в России астрофизическая обсерватория, в задачи которой входят изучение известных галактических и внегалактических источников гамма-квантов с энергиями больше 20 ТэВ, поиск астрофизических объектов, ускоряющих галактические космические лучи (КЛ) до энергий больше 1 ПэВ и многие другие, связанные с современной гамма-астрономией и физикой космических лучей [1, 2]. TAIGA-1 включает расположенные на площади около 1 кв. км детекторы черенковского излучения ШАЛ (TAIGA-HiSCORE, TAIGA-IACT и Tunka-133), массивы сцинтилляционных детекторов Tunka-Grande и TAIGA-Muon для регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент, а также установку для регистрации радиоизлучения ШАЛ. В настоящее время аппаратура обсерватории позволяет регистрировать ШАЛ от космических лучей в области энергий от 100 ТэВ до тысяч петаэлектронвольт и от гамма-квантов до нескольких тераэлектронвольт.

В ближайшие несколько лет планируется расширение обсерватории за счет развертывания установки TAIGA-100. Она будет представлять собой установку из примерно 3000 черенковских водных детекторов, расположенных на площади в 100 км² и предназначенных для регистрации мю-

онной компоненты ШАЛ. Массив мюонных детекторов будет дополнен широкоапертурными детекторами черенковского излучения, сцинтилляционными детекторами и радиоантеннами. TAIGA-100 позволит работать в более широком энергетическом диапазоне КЛ, что, в свою очередь, расширит спектр научных задач, которые можно решить с помощью данной установки.

Целью данной работы является разработка модели черенковского водного детектора (ЧВД) для эксперимента TAIGA-100, изучение и оптимизация его характеристик.

Для моделирования ЧВД использовался программный пакет Geant4 [3]. Инструментарий Geant4 применяет методы математического моделирования и используется для моделирования взаимодействия элементарных частиц с веществом. В работе использовалась версия Geant4 11.0.0 и физическая модель взаимодействий FTFP_BERT.

2. КОНСТРУКЦИЯ ЧВД TAIGA-100

Черенковский водный детектор представляет собой бетонный бак цилиндрической формы, заполненный сверхчистой водой, с толщиной стенки 10 см и внутренними размерами $R = 350$ см и $H = 120$ см. Бак заглублен в грунт и имеет сверху грунтовую насыпь, используемую в качестве плотителя, толщиной ≥ 200 см. Внутренняя по-

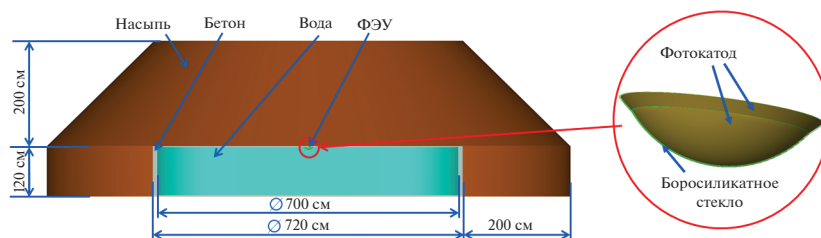


Рис. 1. Визуализация модель ЧВД TAIGA-100 в программном пакете Geant4.

верхность бака представляет собой светоизолированное диффузно-отражающее покрытие Tyvek. В центре верхней грани бака установлен один ФЭУ Hamamatsu R7081 [4]. Визуализация модели детектора в программном пакете Geant4 приведена на рис. 1. ФЭУ частично погружен в воду, и в модели используется только его часть, содержащая фотокатод.

За счет высокого коэффициента диффузного отражения и большой длины поглощения света в воде черенковские фотоны, образующиеся при прохождении высокоэнергичной частицы через ЧВД, равномерно распределяются по объему детектора и могут попасть на фотокатод ФЭУ или поглотиться в воде или в покрытии. Зависимость длины поглощения света в воде от энергии фотонов представлена на рис. 2. Значения основных параметров, используемых в модели ЧВД, приведены в табл. 1.

3. ОТКЛИК НА ВЕРТИКАЛЬНЫЕ МЮОНЫ

Важными параметрами ЧВД являются время жизни фотонов в детекторе и зависимость отклика детектора на вертикальные мюоны от расстояния до центра ЧВД.

Для определения времени жизни фотонов τ в ЧВД была промоделирована регистрация одной тысячи мюонов с энергией $E = 20$ ГэВ, попадающих в детектор под зенитным углом $\theta = 0^\circ$ на расстоянии 175 см от центра бака. Параметр τ является удобным для контроля прозрачности воды и коэффициента диффузного отражения. Данные по временам прихода фотонов во всех событиях были объединены, в результате чего было построено распределение среднего количества фотонов по времени их прихода на фотокатод ФЭУ. Распределение, представленное на рис. 3а, было аппроксимировано экспоненциальной функцией, время жизни фотонов в ЧВД составило $\tau = 102 \pm 15$ нс.

Аналогичным образом была промоделирована регистрация мюонов с $E = 20$ ГэВ и $\theta = 0^\circ$, попадающих в детектор на расстояниях от 0 до 350 см от центра бака с шагом 1 см. На каждом шаге моделировалась одна тысяча мюонов, т.е. суммарно 351 тысяча событий для всех расстояний. Зависимость эффективного времени жизни от расстояния до центра бака представлена на рис. 3б. Значения для всех расстояний практически равномерно распределяются в диапазоне от 92 до 105 нс. Вертикальный разброс можно объяснить флуктуациями и вкладом δ -электронов.

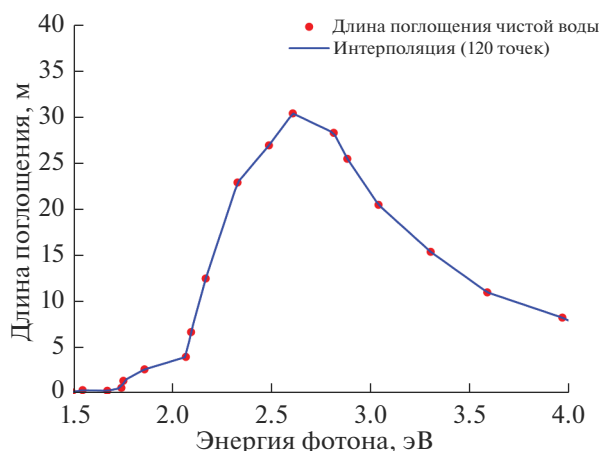


Рис. 2. Зависимость длины поглощения фотонов от их энергии для очищенной воды, используемой в модели.

Таблица 1. Значения основных физических параметров, используемых в модели ЧВД

Параметр	Значение
Коэффициент диффузного отражения покрытия	0.95
Коэффициент преломления воды	1.35
Плотность грунта	2.1 г/см ³
Пиковое значение квантовой эффективности ФЭУ	27% при 380 нм

Для определения зависимости отклика ЧВД также моделировались вертикальные мюоны с $E = 20$ ГэВ и $\theta = 0^\circ$ на расстояниях от 0 до 350 см от центра бака с шагом 1 см. На каждом шаге забрасывалась 1000 мюонов для расчета среднего значения отклика ФЭУ, который выражается в количестве фотоэлектронов (ф.э.). Полученная зависимость представлена на рис. 4. Отклик достигает пикового значения в 57 ф.э. на расстоянии 11 см, что примерно равно радиусу фотокатода ФЭУ, а затем резко спадает с увеличением расстояния от центра бака и становится равным примерно 15 ф.э. на расстояниях от 250 до 350 см.

На рис. 5 представлены распределения по количеству выбитых ф.э. для четырех разных значений расстояния от центра бака: 50, 100, 200 и 300 см. Каждое из распределений было аппроксимировано функцией Гаусса, полученные значения математического ожидания и стандартного отклонения также представлены на рисунке. Виден значительный спад амплитуды, а также рост относительной ширины распределений с увеличением расстояния от центра бака.

4. ЗАВИСИМОСТЬ ОТКЛИКА В ЧВД ОТ ЗЕНИТНОГО УГЛА И ДЛИНЫ ТРЕКА МЮОНА В ВОДЕ

Для исследования зависимости отклика ЧВД на мюоны от их зенитного угла и длины трека в воде было промоделировано прохождение мюонов через детектор с различных направлений.

На рис. 6 приведена схема модельного эксперимента. Координаты X и Y точки попадания частицы в бак разыгрываются равномерно внутри круга радиусом 20 м на высоте 60 см. Центр этого круга расположен в центре детектора. Координата Z точки попадания частицы в бак всегда равна 0 (центр ЧВД). Для получения потока вторичных частиц на уровне наблюдения (173 м над уровнем моря) использовалась программа CORSIKA [5]. Смоделированный с помощью CORSIKA поток далее использовался для генерации частиц, проходящих через ЧВД. Тип частицы ($\mu^\pm$, $e^\pm$, γ , $p^\pm$, $\pi^\pm$) разыгрывался с вероятностью, равной отношению количества частиц определенного типа к числу всех вторичных частиц на уровне наблюдения. Зенитный угол разыгрывался с помощью распределения количества частиц определенного

типа по их зенитному углу, азимутальный угол разыгрывался равномерно от 0° до 360° . Для розыгрыша кинетической энергии частицы определенного типа использовался ее дифференциальный энергетический спектр при фиксированном зенитном угле частицы [6]. Данные параметры сохранялись в отдельном файле, который использовался для розыгрыша событий в модели ЧВД в Geant4. По этим данным определялась длина трека и его положение в детекторе.

По результатам моделирования была построена матрица распределения средних откликов по зенитному углу и длине трека мюона в воде, представленная на рис. 7. Сверху и справа показаны гистограммы распределений откликов по разрезам вдоль линий, показанных на основном рисунке.

Видно, что отклик достаточно близок к равномерному за исключением небольшого диапазона зенитных углов и длин трека. Верхняя часть матрицы осталась незаполненной, что связано с непопаданием частиц, при некоторых значениях координат трека и зенитных углов, в объем водного детектора.

5. ОТКЛИК НА ГАММА-КВАНТЫ И АДРОНЫ

Важной задачей исследования являлось изучение влияния толщины грунта на подавление электрон-фотонной и адронной компонент ШАЛ по отношению к мюонной. Было проведено моделирование регистрации детектором мюонов, гамма-квантов и адронов ШАЛ, разыгранных по ранее смоделированным спектрам, при трех значениях толщины поглотителя из грунта (150, 200 и 250 см), а также для пяти различных диапазонов зенитных углов (0° – 5° , 10° – 20° , 25° – 35° , 40° – 50° , 55° – 65°). Полученные зависимости амплитуды сигнала от толщины поглотителя при различных зенитных углах для мюонов, гамма-квантов и адронов представлены на рис. 8–11 соответственно.

Видно, что отклик ЧВД на мюоны практически не зависит от толщины поглотителя, но для гамма-квантов и адронов он немного уменьшается с ее увеличением, что может свидетельствовать о том, что объема воды достигают, в основном, вторичные заряженные частицы.

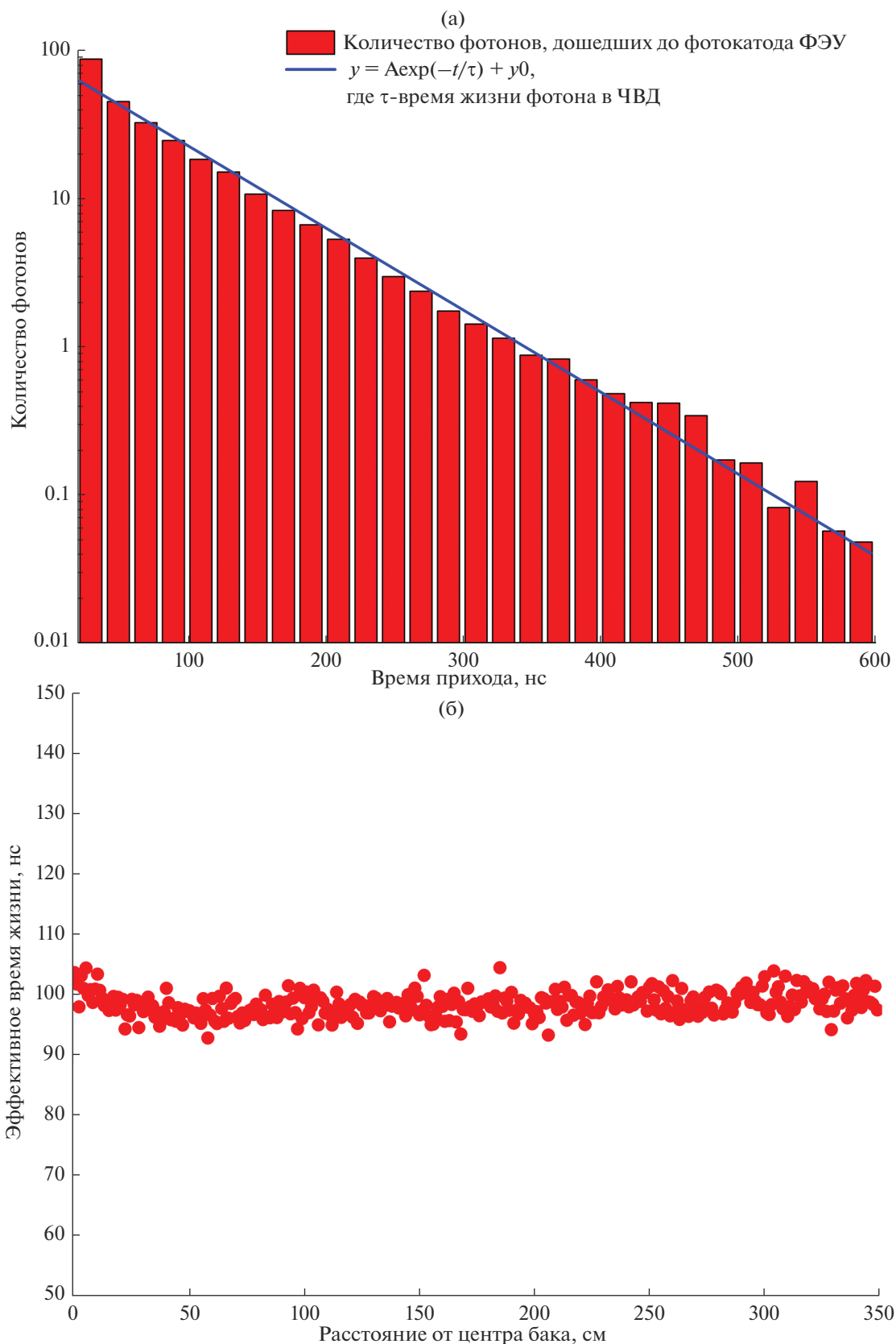


Рис. 3. Распределение количества фотонов, проходящих на расстоянии 175 см от центра бака, по их времени прихода на фотокатод ФЭУ (а) и зависимость времени жизни фотонов от расстояния от центра детектора до трека мюона (б).

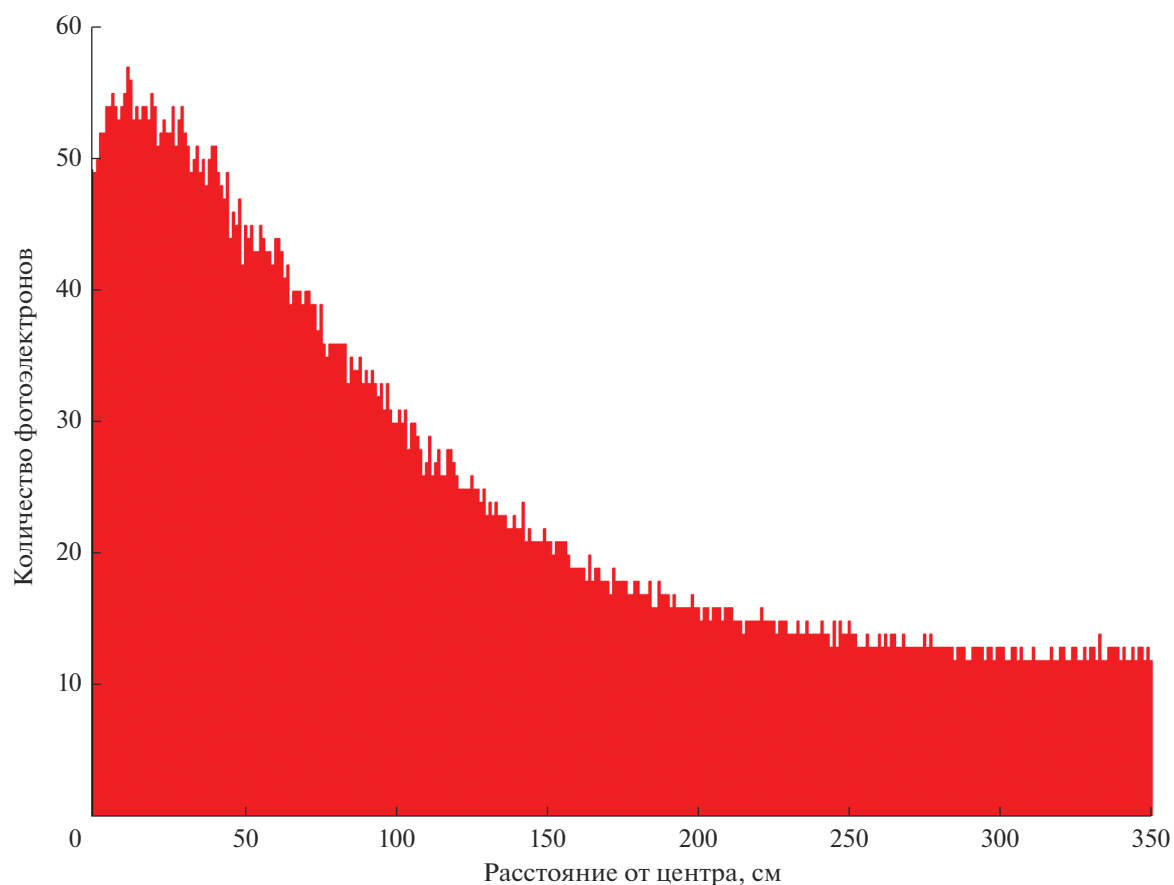


Рис. 4. Зависимость отклика ЧВД на вертикальные мюоны от расстояния от центра бака до трека.

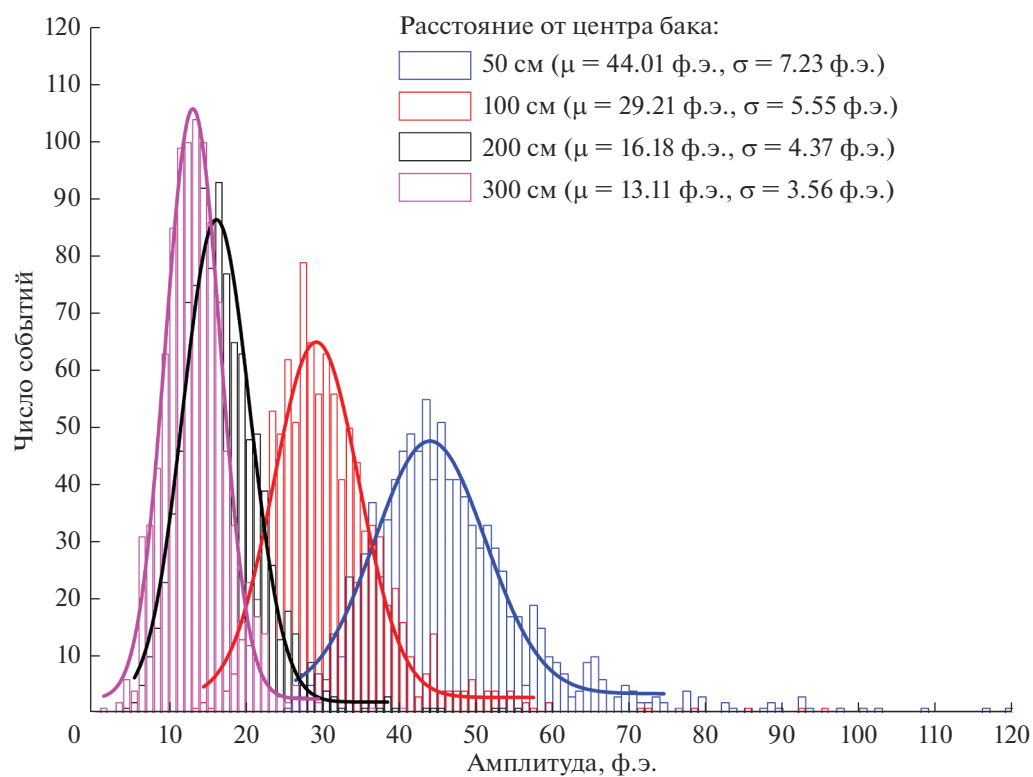


Рис. 5. Распределения отклика ЧВД на мюоны для различных расстояний от центра бака до трека.

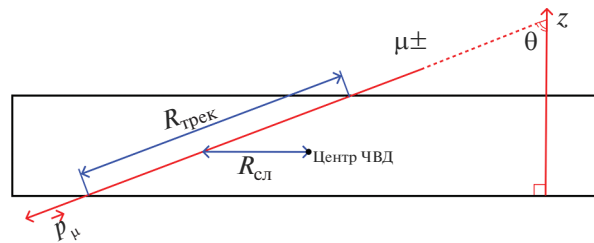


Рис. 6. Схематическое изображение ЧВД TAIGA-100.

Для того, чтобы определить оптимальную высоту насыпи из грунта, необходимо понять, сколько гамма-квантов и адронов могут дать отклик в ЧВД, сравнимый с откликом детектора на мюоны. Для этого можно оценить вероятность для гамма-кванта или адрона симитировать сигнал от мюона по следующей формуле:

$$P_{\text{imit}} = \frac{N_{\text{imit}}}{N_{\text{total}}}, \quad (1)$$

где N_{imit} — количество частиц с $A \geq \overline{A_{\mu}}$, A — отклик в ф.э., N_{total} — количество частиц, попавших в детектор.

Дополнительно было проведено моделирование регистрации мюонов, гамма-квантов и адро-

нов при высоте насыпи из грунта равной 175 и 225 см. Полученная зависимость вероятности того, что гамма-квант и адрон симитируют сигнал от мюона, от толщины поглотителя представлена на рис. 10.

Видно, что вероятность уменьшается с ростом толщины поглотителя и достигает значения 10^{-5} при толщине 250 см. Также была получена зависимость доли мюонов, не прошедших через поглотитель, от его толщины (рис. 11). Учитывая полученные результаты, толщина поглотителя 250 см представляется оптимальной для использования на последующих этапах работы.

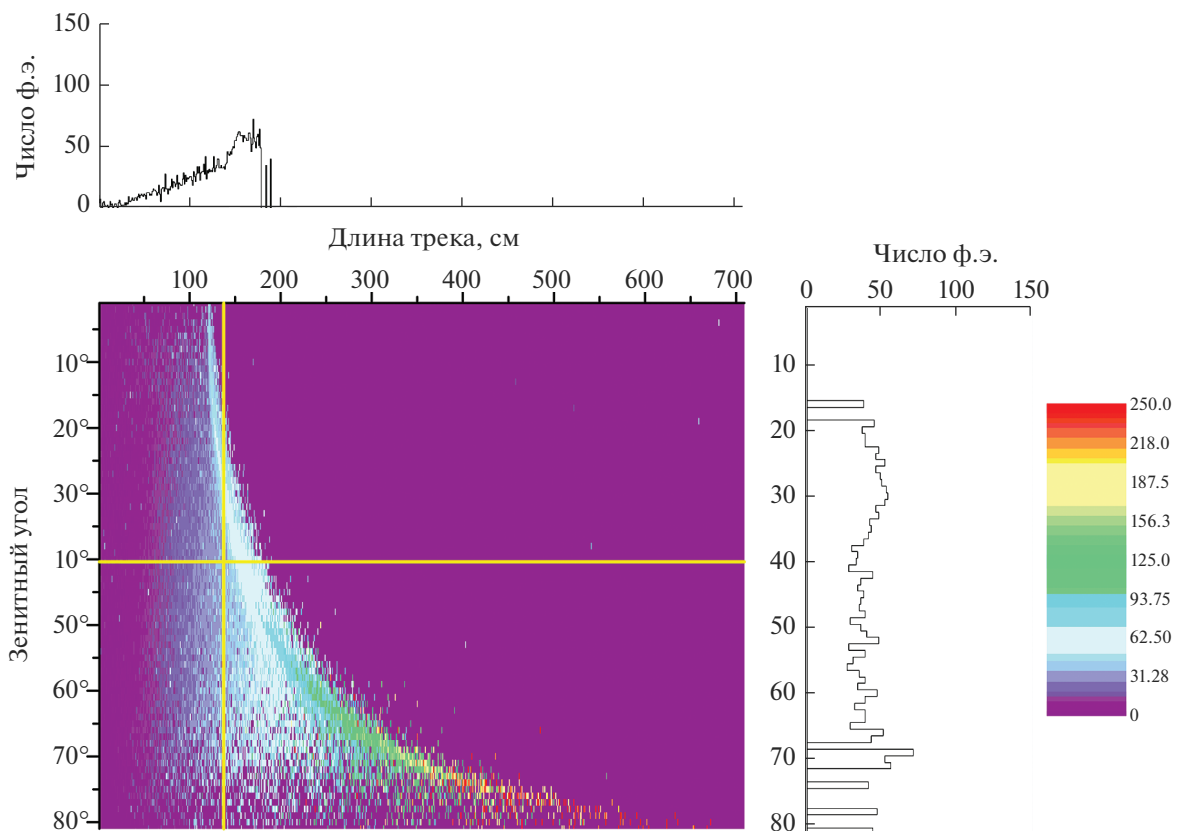


Рис. 7. Матрица распределения отклика ЧВД на мюоны по зенитным углам и длинам треков мюонов в воде.

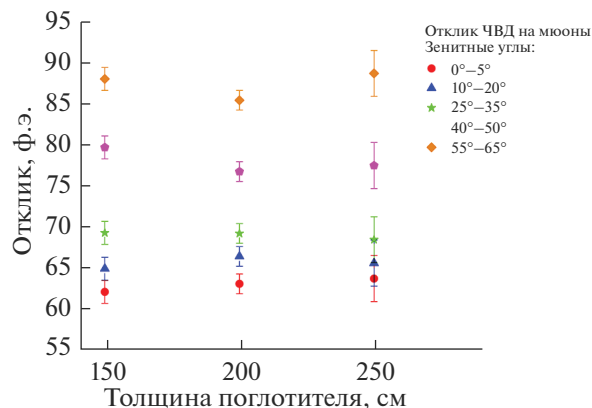


Рис. 8. Зависимость среднего отклика ЧВД от толщины поглотителя для различных диапазонов зенитных углов треков от мюонов.

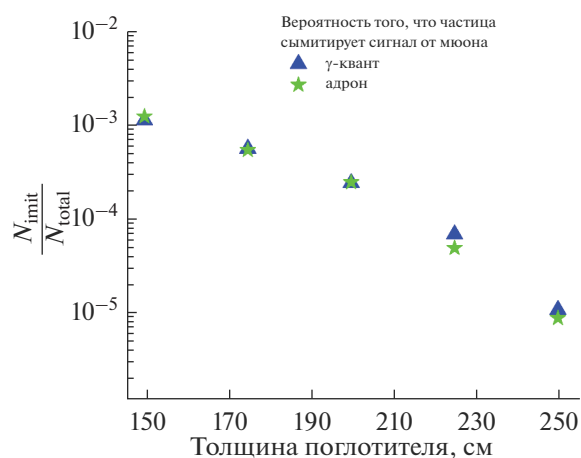


Рис. 10. Вероятность гамма-квантам и адронам симитировать сигнал от мюона в зависимости от толщины поглотителя.

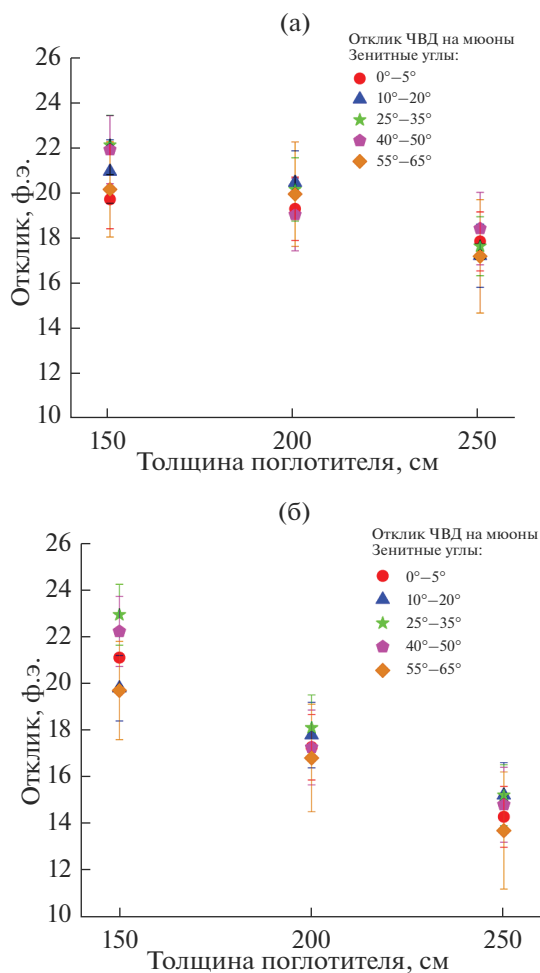


Рис. 9. Зависимость среднего отклика ЧВД от толщины поглотителя для различных диапазонов зенитных углов треков от гамма-квантов (а) и адронов (б).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы разработана и отлажена модель ЧВД установки TAIGA-100 в программном пакете Geant4. Проведено моделирование прохождения вертикальных мюонов через детектор, определено время жизни фотонов в нем при заданных параметрах воды и диффузно-отражающего покрытия внутренней поверхности бака. Для вертикальных мюонов получена зависимость отклика ЧВД от расстояния от центра бака до трека. Получено распределение откликов

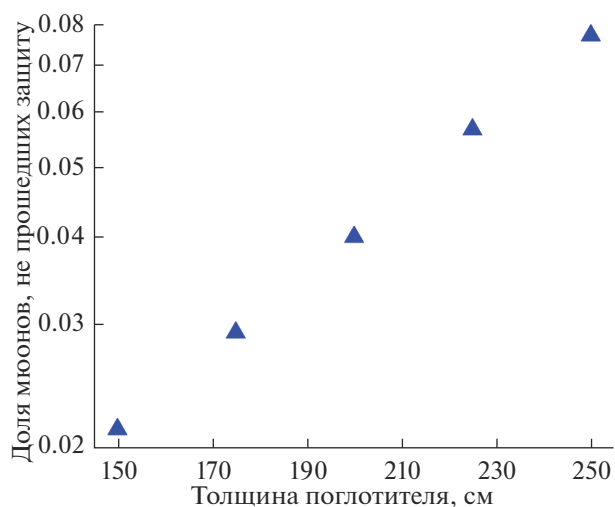


Рис. 11. Доля мюонов, не прошедших через поглотитель, в зависимости от его толщины.

детектора в зависимости от зенитного угла и длины трека мюона в воде. Показано, что при толщине насыпи грунта 250 см сверху водного бака параметр подавления электрон-фотонной и адронной компонент ШАЛ достигает величины $\sim 10^5$. Также были получены зависимости отклика детектора на мюоны, гамма-кванты и адроны ШАЛ, проходящие через детектор в различных направлениях, от толщины грунтового поглотителя.

Разработанная модель ЧВД в дальнейшем будет использована для оптимизации структуры установки TAIGA-100 и определения фактора режекции адронных ШАЛ по отношению к ШАЛ, инициированным гамма-квантами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на Уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕ-ВОД”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Budnev N., Astapov I., Bezyazeev P., et al. The TAIGA experiment: from cosmic ray to gamma-ray astronomy in the Tunka valley // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 718. P. 052006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/718/5/052006>
2. Budnev N., Astapov I., Bezyazeev P., et al. TAIGA—A hybrid array for high-energy gamma astronomy and cosmic-ray physics // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2022. V. 1039. P. 167047. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167047>
3. Geant4 Collab. Book For Application Developers. https://geant4.web.cern.ch/documentation/dev/bfad_html/ForApplicationDevelopers.
4. Hamamatsu Photonics. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_handbook_v4E.pdf.
5. Heck D., Huege T., Pierog T. Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide. https://www.iap.kit.edu/corsika/downloads/CORSIKA_GUIDE7.8010.pdf.
6. Kuzmenkova P., Dmitrieva A., Lagoida I., et al. Yield, response and coupling functions of the URAGAN muon hodoscope // Adv. Space Res. 2025. V. 76 (6). P. 3743. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.07.015>

Model of the Cherenkov Water Detector for the TAIGA-100 Observatory

M. P. Gudelev¹, *, A. N. Dmitrieva¹, A. G. Bogdanov¹, and I. I. Yashin¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: MPGudelev@mephi.ru

Received July 18, 2025; revised July 18, 2025; accepted July 29, 2025

Abstract—The Cherenkov water detector (CWD) of the TAIGA-100 experiment, which is now being developed, is a cylindrical concrete tank buried in the soil and filled with purified water. The inner surface of the water volume is a light-insulated “bag” with high coefficient of diffuse reflection. The water tank is located under a thick layer of soil to absorb the EAS electron-photon and hadron components. At the top of the detector, the photomultiplier with a hemispherical photocathode is installed. To study the characteristics of the CWD, its model was developed using the Geant4 software package, and the particle detection by the CWD was simulated. To successfully put the detector into operation, it is necessary to determine the lifetime of photons in the CWD, the detector's response to muons, gammas and hadrons, and to determine the rejection coefficient of gamma and hadron events in the CWD. For this purpose, a detector model was developed in the Geant4 software package and particle registration by the detector was simulated.

Keywords: gamma-ray astronomy, Cherenkov water detector, simulation, extensive air showers, cosmic rays