

УДК 539.1.03

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ЭКСПЕРИМЕНТА TAIGA

© 2019 г. Е. Б. Постников^{1,*}, И. И. Астапов², П. А. Безъязыков³, В. Ф. Борейко⁴, А. Н. Бородин⁴, М. Брюкнер⁵, Н. М. Буднев³, Р. Вишневский⁵, А. Ю. Гармаш^{6,7}, А. Р. Гафаров³, Н. В. Горбунов⁴, В. М. Гребенюк^{4,8}, О. А. Гресс³, Т. И. Гресс³, А. А. Гринюк⁴, О. Г. Гришин³, А. Н. Дячок³, Д. П. Журов³, А. В. Загородников³, В. Л. Зурбанов³, А. Л. Иванова³, Ю. А. Казарина³, Н. Н. Калмыков¹, В. В. Киндин², П. С. Кириленко⁶, С. Н. Кирюхин³, В. А. Кожин¹, Р. П. Кокоулин², К. Г. Компаниец², Е. Е. Коростелева¹, Е. А. Кравченко^{6,7}, Л. А. Кузьмичев¹, М. Куннас⁹, А. Кьявасса¹⁰, А. А. Лагутин¹¹, Ю. Лемешев³, В. В. Ленок³, Б. К. Лубсандоржиев¹², Н. Б. Лубсандоржиев¹, Р. Р. Миргазов³, Р. Мирзоян^{3,13}, Р. Д. Монхоев³, Э. А. Осипова¹, М. И. Панасюк¹, Л. В. Паньков³, А. Л. Пахоруков³, А. А. Петрухин², В. А. Полещук³, М. Попеску¹⁴, Е. Г. Попова¹, А. Порелли⁵, В. В. Просин¹, В. С. Птускин¹⁵, А. А. Пушнин³, Р. И. Райкин¹¹, Г. И. Рубцов¹², Е. В. Рябов³, Б. М. Сабиров⁴, Я. И. Сагань^{4,8}, В. С. Самолига³, Л. Г. Свешникова¹, Ю. А. Семеней³, А. Ю. Сидоренков¹², А. А. Силаев¹, А. А. Силаев (мл.)¹, А. В. Скурихин¹, М. Слунечка⁴, А. В. Соколов^{6,7}, В. А. Таболенко³, Б. А. Таращанский³, Л. Г. Ткачев^{4,8}, А. В. Ткаченко⁴, М. Тлужиконт⁹, О. Л. Федоров³, Д. Хорнс⁹, К. Шпиринг⁵, И. И. Яшин

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова",

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
"Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"Иркутский государственный университет", Научно-исследовательский институт прикладной физики",
Иркутск, Россия

⁴Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

⁵Немецкий электронный синхротрон (DESY), Гамбург, Германия

⁶Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
"Новосибирский национальный исследовательский государственный университет", Новосибирск, Россия

⁷Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук", Нижний Новгород, Россия

⁸Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области
"Университет "Дубна", Дубна, Россия

⁹Университет Гамбурга, Институт экспериментальной физики, Гамбург, Германия

¹⁰Университет Турина, физический факультет и Национальный институт ядерной физики, Турин, Италия

¹¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"Алтайский государственный университет", Барнаул, Россия

¹²Федеральное государственное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук,
Москва, Россия

¹³Институт Макса Планка, Мюнхен, Германия

¹⁴Институт космических наук, Бухарест, Румыния

¹⁵Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: evgeny.post@gmail.com

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Гамма-обсерватория TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy) ориентирована на исследования гамма-квантов с энергией от единиц до сотен ТэВ. В основе работы обсерватории – комбинированный метод выделения широких атмосферных ливней (ШАЛ) от гамма-квантов, объединяющий черенковские телескопы с анализом изображения ШАЛ

(TAIGA-IACT) и широкоугольные черенковские детекторы с измерением времени прихода светового фронта ШАЛ (TAIGA-HiSCORE). Для оценки чувствительности экспериментальной установки и сравнения получаемых на ней данных с теоретическими предсказаниями было проведено моделирование установки методом Монте-Карло. В статье приводится описание программного обеспечения, параметров модели и алгоритмов моделирования и текущий статус работ по моделированию эксперимента TAIGA.

DOI: 10.1134/S0367676519080337

ВВЕДЕНИЕ

Гамма-обсерватория TAIGA является частью Тункинского астрофизического центра (Бурятия), включающего также компоненты для изучения физики заряженных космических лучей высокой энергии [1, 2]. Для гамма-астрономии предназначена сеть атмосферных черенковских гамма-телескопов (IACT) [3] в сочетании с сетью широкоугольных оптических станций с измерением времени прихода светового фронта ШАЛ TAIGA-HiSCORE [4]. Площадь установки планируется довести до 10 км² без применения традиционных стереоскопических систем близкорасположенных телескопов IACT [5], т. к. подавлению фона космических лучей способствует очень хорошее угловое разрешение (~0.1° при энергии 100 ТэВ).

Установка будет регистрировать гамма-кванты с энергией от 30 ТэВ (IACT совместно с TAIGA-HiSCORE) и с более низким порогом ~1 ТэВ в режиме изолированной работы IACT без TAIGA-HiSCORE. Решение стоящих перед ней задач [1, 2, 6] требует тщательного моделирования всех ее компонентов: телескопов IACT и широкоугольных оптических станций.

1. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Моделирование ШАЛ осуществлено программой CORSIKA 7.3500 [7]. Отклик детекторов широкоугольной установки TAIGA-HiSCORE имитирован с помощью специального программного обеспечения `sim_score` [8], основанного на программном пакете IACT/ATMO [9]. Моделирование отклика телескопа IACT было проведено двумя независимыми способами: стандартной программой `sim_telarray` [9] и созданным в ОИЯИ, Дубна (ОПТИКА-TAIGA), и НИИЯФ МГУ программным обеспечением для симуляции телескопа TAIGA [10].

2. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРУЕМОЙ УСТАНОВКИ

Телескоп состоит из 29 зеркал диаметром 60 см, расположенных по схеме Дэвиса–Коттона [11] с фокусным расстоянием 4.75 м. В камере телескопа 560 пикселей гексагональной формы с угло-

вым размером ~0.36°, составленных из фотомножителя (ФЭУ) и конуса Винстона [12], увеличивающего площадь фотокатода ФЭУ в 3 раза. Камера разделена на модули по 28 ФЭУ (4 × 7). Диаметр угла обзора всей камеры телескопа составляет 9.6°.

Широкоугольная установка TAIGA-HiSCORE включает 43 станции (~100 в 2019 г.) в узлах регулярной сетки с шагом 106 м. Станции состоят из 4 ФЭУ, площадь каждого из которых увеличена в 4 раза с помощью конуса Винстона [12], а угол обзора составляет ~0.6 ср.

3. АЛГОРИТМЫ И МЕТОДЫ

Отклик IACT смоделирован в 3 шага. Сначала методом трассировки лучей [13] прослежены все черенковские фотоны ШАЛ из CORSIKA с учетом таких факторов, как поглощение в атмосфере в зависимости от длины волны без учета многократного рассеивания; затенение зеркал камерой; отражение от зеркал в соответствии с законами классической оптики с коэффициентом отражения полированного алюминия 0.9; случайные повороты зеркал из-за неидеальности их юстировки (размытие в фокусе 10 мм); случайное отклонение направления отраженного луча из-за неидеальности поверхности зеркала (размытие в фокусе 1 мм); прохождение через защитный экран камеры из плексигласа, включая преломление и зависящие от угла падения коэффициенты отражения на входе и выходе и зависящий от длины волны коэффициент поглощения в толще материала; прохождение через конусы Винстона в соответствии с их чертежами и с учетом только отражения от идеальной поверхности с коэффициентом отражения 0.90.

Затем имитирован отклик ФЭУ, учитывающий зависимость квантовой эффективности и эффективности собирания электронов от длины волны фотона, в результате чего определено время образования и число фотоэлектронов в каждом ФЭУ камеры. На этом этапе также смоделированы фотоэлектроны, образованные фоновой засветкой ночного неба (разыграно их число и время их образования в каждом ФЭУ).

Далее смоделирован блок оцифровки импульсов на основе микросхемы MAROC3 [14], триггерные условия сбора данных и процедура их ана-

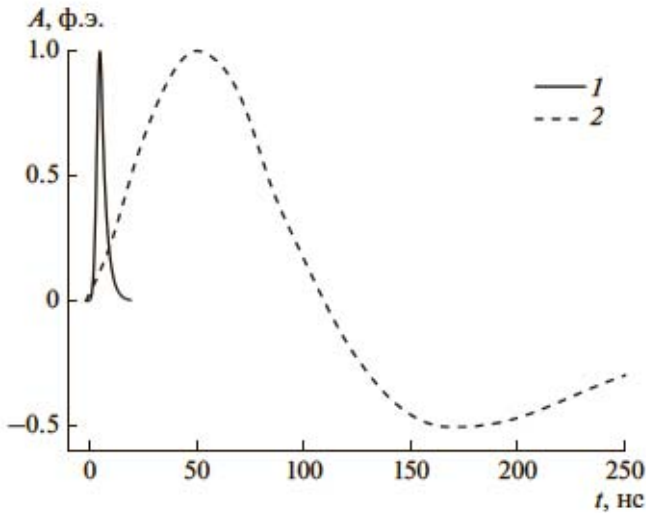


Рис. 1. Симулированная форма однофотоэлектронного импульса на выходе формирователя импульсов: 1 – формирователя коротких импульсов, амплитуда суммы которых участвует в выработке триггера сбора данных; 2 – формирователя длинных импульсов: амплитуда их суммы фиксируется через 35 нс после срабатывания триггера.

логового считывания. Фотоэлектроны на выходе ФЭУ размывались по времени в соответствии с формой на выходе формирователя импульсов (рис. 1), амплитуда импульсов разыгрывалась из экспериментального распределения, в том числе с учетом послеимпульса [15], после чего импульсы в каждый момент времени складывались в суммарный импульс одного ФЭУ. Триггер в одном модуле из 28 ФЭУ срабатывал при превышении амплитуды импульса как минимум в двух ФЭУ порогового значения, если интервал между превышениями в одном и втором ФЭУ менее 15 нс. Во всех ФЭУ модуля, в котором сработал триггер, фиксируются значения амплитуд импульсов на выходах формирователя через 35 нс после срабатывания триггера, в соответствии с результатами лабораторных измерений.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Описанные алгоритмы и программное обеспечение позволили собрать банк модельных данных для отработки методов анализа данных и последующего сравнения с экспериментом. Банк данных состоит из наигранных методом Монте-Карло ШАЛ, порожденных первичными гамма-квантами с различными энергетическими распределениями и с зенитными углами прихода в диапазоне 10° – 40° , а также из ШАЛ от первичных протонов и ядер, углы прихода которых отклоняются от направления оси телескопа на величину вплоть до $\pm 10^\circ$.

Первые результаты сравнения моделирования с экспериментом опубликованы в [1] для тесто-

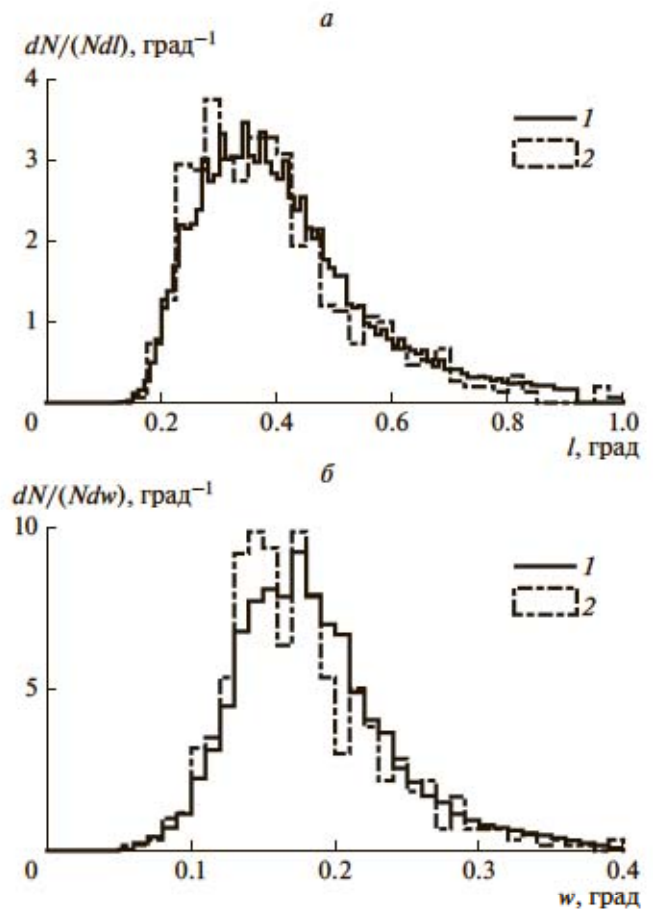


Рис. 2. Распределение длины (l , рис. 2а) и ширины (w , рис. 2б) изображения в камере телескопа: 1 – эксперимент, 2 – моделирование первичных протонов энергий 3–100 ТэВ в условиях, идентичных условиям наблюдения в эксперименте.

вой работы прототипа телескопа с 6 зеркалами. Для телескопа с 29 зеркалами наблюдается согласие между модельными и экспериментальными значениями параметров Хиллса [16]: длина и ширина (рис. 2) и полное число фотоэлектронов изображения [6]. Оценена ожидаемая чувствительность установки для поиска локальных источников гамма-квантов: $(0.5-1) \cdot 10^{-13}$ ТэВ \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$ в диапазоне 30–200 ТэВ при 300 ч наблюдения источника [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществлено полное моделирование установок TAIGA-IACT (двумя независимыми способами) и TAIGA-HiSCORE эксперимента TAIGA. Проведено сравнение значений основных анализируемых в эксперименте физических параметров с их модельными предсказаниями. Продолжается усовершенствование модели путем учета дополнительных факторов, сравнение с экспериментом и дальнейший набор статистики.

Работа поддержана Минобрнауки России (госзадания 3.9678.2017/БЧ, 3.904.2017/ПЧ, 3.6787.2017/ИТР, 1.6790.2017/ИТР), грантом РФФИ 16-29-13035, выполнена с использованием оборудования ТАЦКП в рамках соглашения с Минобрнауки России (уникальный идентификатор RFMEFI59317X0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмичев Л.А., Астапов И.И., Безьязыков П.А. и др. // ЯФ. 2018. Т. 81. № 4. С. 469; Kuzmichev L.A., Astapov I.I., Bezyazyekov P.A. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2018. V. 81. № 4. P. 497.
2. Буднев Н.М., Астапов И.И., Безьязыков П.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1049.
3. Weekes T.C., Cawley M.F., Fegan D.J. et al. // Astrophys. J. 1989. V. 342. P. 379.
4. Астапов И.И., Барбашина Н.С., Богданов А.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 495; Astapov I.I., Barbashina N.S., Bogdanov A.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. V. 81. № 4. P. 460.
5. Kohnle A., Aharonian F., Akhperdzhanian A. et al. // Astropart. Phys. 1996. V. 5. P. 119.
6. Свешникова Л.Г., Астапов И.И., Безьязыков П.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1061.
7. Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. // Report FZKA 6019. Karlsruhe: Forschungszentrum, 1998.
8. Tluczykont M., Hampf D., Horns D. et al. // Astropart. Phys. 2014. V. 56. P. 42.
9. Bernlöhr K. // Astropart. Phys. 2008. V. 30. № 3. P. 149.
10. Postnikov E.B., Grinyuk A.A., Kuzmichev L.A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. Art. № 012030.
11. Davies J.M., Cotton E. S. // J. Sol. Energy Sci. Eng. 1957. V. 1. P. 16.
12. Winston R. // J. Opt. Soc. Am. 1970. V. 60. P. 245.
13. Spencer G.H., Murty M.V.R.K. // J. Opt. Soc. Am. 1962. V. 52. № 6. P. 672.
14. Franz S., Barrillon P. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2009. V. 610. № 1. P. 35.
15. Mirzoyan R., Lorenz E., Petry D. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1997. V. 387. P. 74.
16. Hillas A.M. // Proc. 19nd ICRC. (La Jolla, 1985). V. 3. P. 445.