

УДК 520.2

## ОЖИДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕРЕНКОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА TAIGA-IACT ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЕТЕКТОРОВ SiPM

© 2024 г. Е. Е. Холупенко<sup>1, \*</sup>, А. М. Красильщиков<sup>1</sup>, Д. В. Бадмаев<sup>1</sup>, А. А. Богданов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук,

Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: eugene@astro.ioffe.ru

Поступила в редакцию 24.05.2023

После доработки 15.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Представлены результаты расчетов методом Монте-Карло эффективных площадей и скоростей счета черенковского телескопа TAIGA-IACT с модернизированной камерой на SiPM OnSemi MicroFJ-60035, оснащенной фильтрами SL 290-590 и SL 280-390. Показано, что пороговая энергия (по триггированию космических гамма-квантов) телескопа TAIGA-IACT с камерой на SiPM и фильтром SL 290-590 составит  $\approx 0.4$  ТэВ, что несколько ниже, чем у текущей конфигурации TAIGA-IACT с камерой на ФЭУ (0.5 ТэВ). Пороговая энергия телескопа TAIGA-IACT с камерой на SiPM и фильтром SL 280-390 составит  $\approx 0.7$  ТэВ, что вполне приемлемо для черенковских телескопов с площадью зеркала  $\sim 10$  м<sup>2</sup>. Эти результаты вместе с ожидаемой стабильностью конструкции SiPM при наличии чрезмерной засветки и возможностью использования УФ-фильтров (которые позволяют вести наблюдения в лунные ночи и в сумерках без значительного увеличения порогового сигнала триггера) показывают, что телескоп TAIGA-IACT с камерой на SiPM будет перспективным инструментом для наблюдений космического гамма-излучения в ТэВ-диапазоне.

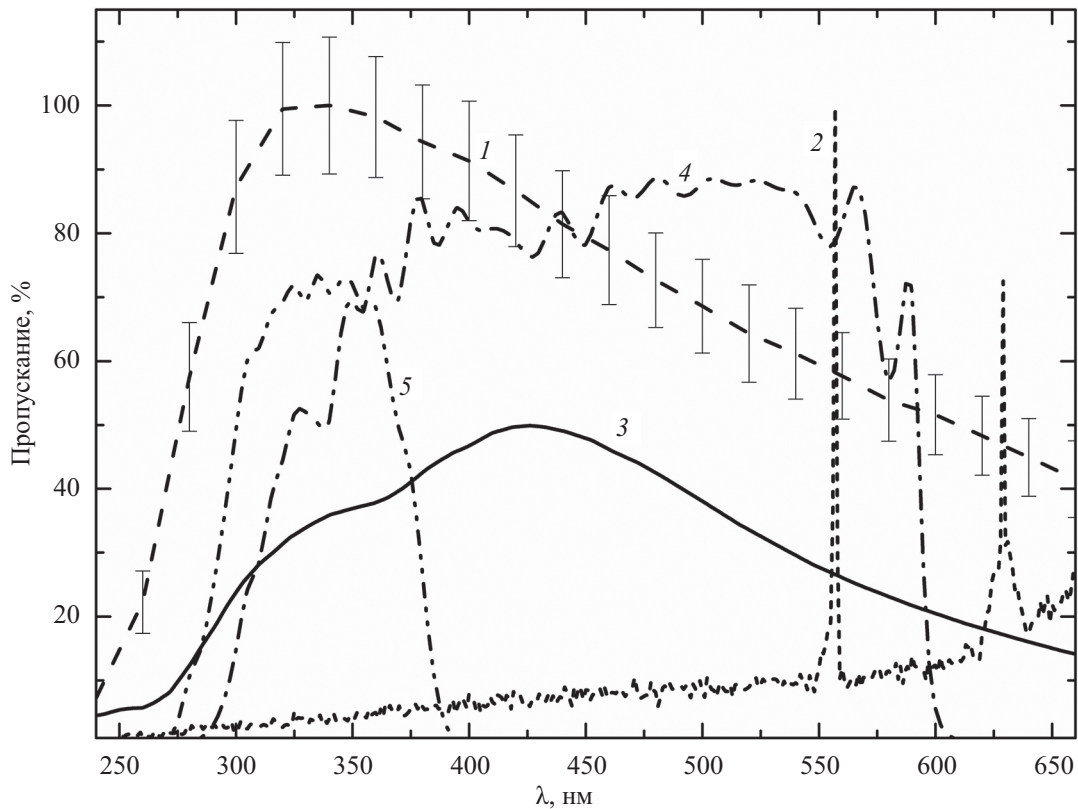
DOI: 10.31857/S0367676524030232, EDN: QKPDKE

### ВВЕДЕНИЕ

Гамма-телескоп TAIGA-IACT представляет собой массив малоразмерных черенковских телескопов, который функционирует как часть многоцелевой обсерватории TAIGA, расположенной в Тункинской долине респ. Бурятия [1–6]. В 2018–2022 гг. в ФТИ имени А. Ф. Иоффе был разработан новый детекторный кластер (28 пикселов) для телескопа TAIGA-IACT [7–11], основанный на кремниевых фотоумножителях (SiPM) OnSemi MicroFJ-60035. Важной частью разработки нового оборудования является численное моделирование, направленное на определение характеристик телескопа с модернизированной камерой. Такое моделирование выполняется как для отдельных узлов нового кластера [12, 13], так и для телескопа в целом [14, 15] одновременно с конструированием и тестированием детекторного оборудования. В настоящей работе представлены оценки величин эффективной площади TAIGA-IACT, скорости счета и пороговой энергии наблюдений для различных первичных частиц (космических гамма-квантов и протонов космических лучей), полученные в результате численного моделирования.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Формирование и распространение черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ) было промоделировано с помощью широко используемого пакета CORSIKA 7.7400 [16], результаты которого часто рассматриваются как эталонные. Было выполнено моделирование ШАЛ от вертикально падающих гамма-квантов и протонов с энергиями 0.3162, 0.5, 0.7, 1.0, 3.162, 10.0, 31.62 ТэВ. Прочие параметры моделирования детально изложены в [15]. Типичный модельный спектр черенковского излучения ШАЛ представлен на рис. 1. Моделирование оптического фона ночного неба было выполнено методом Монте-Карло с помощью оригинального кода TAIGA Soft [15]. Исходные данные для моделирования фона ночного неба (в частности, интегральное значение интенсивности  $3 \times 10^{12}$  фот/м<sup>2</sup>/с/стер в диапазоне 300–600 нм) были взяты из [17–20]. Детальное описание алгоритма моделирования этого фона дано в [15]. Типичный модельный спектр фона ночного неба также представлен на рис. 1. Моделирование транспорта излучения в оптическом тракте телескопа и работы камеры было выполнено с помощью пакета TAIGA Soft. Подробное описание



**Рис. 1.** Зависимости профилей от длины волны: 1 — средний спектр черенковского излучения от ШАЛ, вызванного гамма-квантом с энергией 1 ТэВ, нормированный на 100% в максимуме на длине волны  $\approx 330$  нм (кривая из длинных штрихов); 2 — пример конкретной реализации спектра фона ночного неба (нормированного на 100% в максимуме на длине волны  $\approx 557$  нм), смоделированного методом Монте-Карло (кривая из коротких штрихов); 3 — эффективность детектирования фотонов SiPM OnSemi MicroFJ-60035 (сплошная кривая); 4 — коэффициент пропускания фильтра SL 290-590 (штрихпунктирная кривая); 5 — коэффициент пропускания фильтра SL 280-390 (кривая штрих с двумя точками).

алгоритма, реализованного в пакете TAIGA Soft, дано в [15]. Единственным качественным отличием проведенного моделирования от алгоритма, описанного в [15], была процедура, позволяющая приближенно учесть сегментную структуру зеркала. Эта процедура включает в себя замену эффективного радиуса зеркала  $R_T^{eff} = (S_m / \pi)^{1/2} = 1.75$  м (где  $S_m$  — площадь отражающей поверхности) реальным радиусом механической конструкции зеркала  $R_T = 2.15$  м и розыгрыш попадания фотона в сегмент зеркала в соответствии с условием  $\zeta \leq S_m / (\pi R_T^2)$ , где  $\zeta$  — случайная величина, однородно распределенная в интервале  $[0; 1]$ . Параметры зеркала и механической конструкции телескопа, использованные при моделировании, были взяты из [21]. Были использованы следующие параметры узлов камеры: зависимости коэффициентов пропускания фильтров [22] и эффективности детектирования SiPM [23] от длины волны (см. рис. 1), коэффициент пропускания конусов Уинстона 0.7 (консервативная оценка, основанная на расчетах [13]). В качестве триггера были выбраны следующие условия: превышение порогового сигнала в трех соседних пикселях; значение порогового сигнала было выбрано на уровне

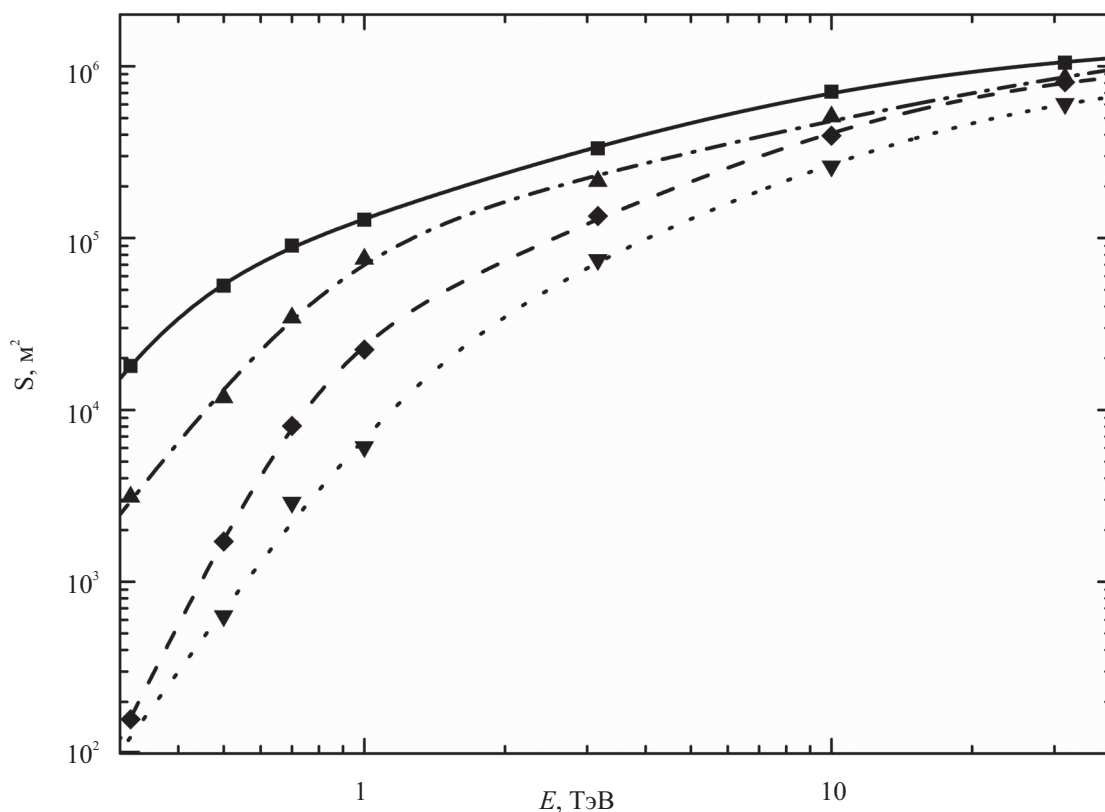
10 фотоэлектронов (ф.э.) при использовании фильтра SL 290-590 и 4 ф.э. при использовании фильтра SL 280-390. Такой выбор обусловлен прежде всего тем, что уровень скорости ложного счета, вызванного фоном ночного неба, должен быть достаточно низким ( $\leq 10^3$  Гц), чтобы электроника камеры не была перегружена, но значительная доля ( $\sim 10\%$ ) срабатываний триггера была бы вызвана именно событиями от ШАЛ.

Эффективная площадь черенковского телескопа была определена по следующей формуле:

$$S^{MC}(E) = 2\pi \int_0^{\infty} P(E, r) r dr,$$

где  $P(E, r)$  — вероятность детектирования первичной частицы с энергией  $E$  на расстоянии  $r$  от оси ШАЛ, оцененная методом Монте-Карло [15].

Результаты расчетов эффективной площади и аппроксимации этих результатов представлены на рис. 2. Эти результаты показывают, что эффективные площади триггирования для гамма-квантов ожидаемо больше, чем для протонов (для обоих



**Рис. 2.** Зависимости эффективных площадей от энергии первичной частицы, полученные методом Монте-Карло, показаны символами, соответствующие аппроксимации — кривыми. Квадраты и сплошная кривая соответствуют результатам для гамма-квантов при использовании фильтра SL 290-590. Ромбы и штриховая кривая соответствуют результатам для протонов КЛ при использовании фильтра SL 290-590. Треугольники, направленные вверх, и штрихпунктирная кривая соответствуют результатам для гамма-квантов при использовании фильтра SL 280-390. Треугольники, направленные вниз, и пунктирная кривая соответствуют результатам для протонов КЛ при использовании фильтра SL 280-390.

фильтров), причем значение энергии, при котором начинается резкое падение эффективной площади (при уменьшении энергии), для протонов примерно в 2 раза больше, чем для гамма-квантов. Предельное значение эффективной площади на высоких энергиях ( $\geq 100$  ТэВ) составляет  $(0.9-1) \times 10^6$  м<sup>2</sup> для протонов и  $(1.3-1.4) \times 10^6$  м<sup>2</sup> для гамма-квантов. Эффективные площади для камеры с фильтром SL 280-390 ожидаемо меньше, чем с фильтром SL 290-590, что обусловлено значительно более узкой полосой пропускания фильтра SL 280-390.

Знание эффективной площади, спектра КЛ [24] и типичных спектров гамма-излучения [25, 26] от космических источников позволяет оценить полные скорости счета как интегралы по энергии от произведения спектрального потока [ $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ТэВ}^{-1}$ ] и эффективной площади, а также пороговые энергии как максимумы этих произведений. Значения скоростей счета (триггирования) черенковского телескопа с камерой на SiPM при использовании фильтра SL 290-590 составляют:  $\approx 212$  Гц для ШАЛ от протонов КЛ и  $\approx 0.13$  Гц для ШАЛ от гамма-квантов от расположенного в зените источника с потоком 1 Crab Unit [25, 26]. При этом пороговая

энергия составляет  $\approx 0.94$  ТэВ по триггированию протонов КЛ и  $\approx 0.4$  ТэВ по триггированию гамма-квантов. Значения скоростей счета при использовании фильтра SL 280-390 составляют:  $\approx 106$  Гц для ШАЛ от протонов КЛ и  $\approx 0.06$  Гц для ШАЛ от гамма-квантов. При этом пороговая энергия составляет  $\approx 1.2$  ТэВ по триггированию протонов КЛ и  $\approx 0.7$  ТэВ по триггированию гамма-квантов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное моделирование показало, что при выбранных условиях триггирования скорости счета будут достаточно низкими, чтобы электроника камеры TAIGA-IACST не была перегружена. Пороговая энергия регистрации (триггирования) гамма-квантов черенковским телескопом с камерой на SiPM при использовании фильтра SL 290-590 составляет  $\approx 0.4$  ТэВ. Это значение несколько меньше, чем пороговая энергия текущей конфигурации TAIGA-IACST с камерой на ФЭУ, которая составляет 0.5 ТэВ [27]. Соответствующая пороговая энергия при использовании фильтра SL 280-390 составляет  $\approx 0.7$  ТэВ. Следует отметить, что такое

значение вполне приемлемо для малоразмерных черенковских телескопов ( $\sim 10 \text{ м}^2$ ) и ухудшение данной характеристики по сравнению с текущей конфигурацией TAIGA-IACT не будет значительным. При этом, в отличие от ФЭУ, которые выходят из строя при избыточной засветке, SiPM устойчивы к избыточной засветке и камера на SiPM может быть использована для проведения наблюдений в лунные ночи и в сумерках. Совместное же применение SiPM и фильтров ближнего УФ-диапазона может значительно (до 30%) увеличить длительность рабочего цикла телескопа с камерой на SiPM по сравнению с рабочим циклом телескопа на ФЭУ (например, [28–30]) без существенного увеличения величины порога (как это приходится делать, в частности, на телескопе FАСТ в лунные ночи [28]).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-20045). Проведенные исследования могут быть использованы для модернизации УНУ “Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ”, осуществляемой в рамках соглашения 13.УНУ.21.0007 между Министерством образования и науки России и Иркутским государственным университетом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буднев Н.М., Иванова А.Л., Калмыков Н.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 430; Budnev N.M., Ivanova A.L., Kalmykov N.N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 3. P. 395.
2. 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. 2017. V. 81. No. 4. P. 460.
3. Бородин А.Н., Гребенюк В.М., Гринюк А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1042; Borodin A.N., Grebenyuk V.M., Grinyuk A.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 8. P. 945.
4. Просин В.В., Астапов И.И., Безъязыков П.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 525; Prosin V.V., Astapov I.I., Bezъязыkov P.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 395.
5. Безъязыков П.А., Буднев Н.М., Гресс О.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1099; Bezъязыkov P.A., Budnev N.M., Chernykh D.O. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 8. P. 998.
6. Кузьмичев Л.А., Астапов И.И., Безъязыков П.А. и др. // Ядерн. физика. 2018. Т. 81. № 4. С. 469; Kuzmichev L.A., Astapov I.I., Bezъязыkov P.A. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2018. V. 81. No. 4. P. 497.
7. Bogdanov A.A., Tuboltsev Y.V., Chichagov Y.V. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1697. No. 1. Art. No. 012015.
8. Богданов А.А., Тубольцев Ю.В., Чичагов Ю.В. и др. // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 5. С. 821; Bogdanov A.A., Tuboltsev Y.V., Chichagov Y.V. et al. // J. Tech. Phys. 2021. V. 66. No. 5. P. 699.
9. Bogdanov A.A., Tuboltsev Y.V., Chichagov Y.V. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2103. No. 1. Art. No. 012026.
10. Kuleshov D.O., Simonyan V.A., Bogdanov A.A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2103. No. 1. Art. No. 012036.
11. Bogdanov A.A., Repman G.A., Tuboltsev Y.V. et al. // St. Petersburg State Polytechn. Univ. J. Phys. Math. 2023. V. 16. No. 1.2. P. 410.
12. Bogdanov A.A., Kholupenko E.E., Tuboltsev Y.V., Chichagov Y.V. // Latv. J. Phys. Tech. Sci. 2020. V. 57. No. 1-2. P. 13.
13. Антонов А.С., Богданов А.А., Красильщиков А.М., Холупенко Е.Е. // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 11. С. 1601.
14. Холупенко Е.Е., Красильщиков А.М., Бадмаев Д.В. и др. // ЖТФ. 2020. Т. 90. № 6. С. 925; Kholupenko E.E., Krassilchtchikov A.M., Badmaev D.V. et al. // Tech. Phys. 2020. V. 65. No. 6. P. 886.
15. Холупенко Е.Е., Бадмаев Д.В., Антонов А.С. и др. // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 12. С. 1930; Kholupenko E.E., Badmaev D.V., Antonov A.S. et al. // Tech. Phys. 2022. V. 67. No. 2. P. 80.
16. Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. CORSIKA: a Monte Carlo code to simulate extensive air showers. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1998.
17. Leinert C., Bowyer S., Haikala L.K. et al. // Astron. Astrophys. Suppl. 1998. V. 127. P. 1.
18. Benn C.R., Ellison S.L. // New Astron Rev. 1998. V. 42. No. 6–8. P. 503.
19. Mikhalev A.V., Medvedeva I.V., Beletsky A.B., Kazimirovsky E.S. // J. Atmos. Sol-Terr. Phys. 2001. V. 63. No. 9. P. 865.
20. Mirzoyan R., Lorenz E. // Int. Rep. HEGRA collaboration. MPI-PhE/94-35, 1994.
21. Budnev N., Astapov I., Bezъязыkov P. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 718. No. 5. Art. No. 052006.
22. Забудько М.А. Спецификации фильтров SL 280-390 и SL 290-590. ФОТООПТИК, 2021.
23. <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MICROJ-SERIES-D.PDF>.
24. Alfaro R., Alvarez C., Alvarez J.D. et al. // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. No. 12. P. 122001.
25. Nigro C., Deil C., Zanin R. et al. // Astron. Astrophys. 2019. V. 625. Art. No. A10.
26. Abeyssekara A.U., Albert A., Alfaro R. et al. // Astrophys. J. 2019. V. 881. No. 2. P. 134.
27. Tluczykont M., Budnev N., Astapov I. et al. // Proc. Magellan Workshop: Connecting Neutrino Physics

- and Astronomy, Deutsches Elektronen-Synchrotron, DESY: Magellan Workshop (Hamburg, 2016). P. 1.
28. *Knoetig M.L., Biland A., Bretz T. et al.* // Proc. 33th ICRC. 2013. V. 33. P. 1132.
29. *Griffin S., VERITAS Collaboration* // Proc. 34th ICRC. 2015. V. 34. P. 989.
30. *Guberman D., Cortina J., Garcia R. et al.* // Proc. 34th ICRC. 2015. V. 34. P. 1237.

## The expected characteristics of the Cherenkov telescope TAIGA-IACT equipped with SiPM detectors

E. E. Kholupenko<sup>1, \*</sup>, A. M. Krassilchtchikov<sup>1</sup>, D. V. Badmaev<sup>1</sup>, A. A. Bogdanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021 Russia*

*\*e-mail: eugene@astro.ioffe.ru*

Monte-Carlo modeling of effective area and count rate of the TAIGA-IACT Cherenkov gamma-ray telescope unit with an upgraded camera based on SiPM OnSemi MicroFJ-60035 detectors and optical filters SL 290-590 and SL 290-590 has been carried out. It has been shown that with the SL 290-590 filter the threshold detection energy of the telescope would be improved compared with its current PMT-based configuration and would reach about 0.4 TeV. With the narrow band UV filter SL 290-590 the estimated threshold would reach about 0.7 TeV, which is a reasonable value for a 10 m<sup>2</sup> class IACT, especially because with a SiPM-based telescope it will be possible to carry out observations during moonlit nights and at twilight without a substantial increase of the threshold. One may conclude that an upgraded TAIGA-IACT unit will be an efficient instrument for studies of TeV-band gamma-ray emission of various cosmic objects.