

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОРОГА ОПТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ TUNKA-HISCORE

⁹И.И. Астапов, ⁹Н.С. Барбашина, ¹С.Ф. Бережнев, ²Н.М. Буднев, ⁹А.Г. Богданов, ¹⁰В. Борейко, ⁶М. Букер, ¹¹М. Брюкнер, ⁸Р. Вишневский, ²А.Д. Веслополов, ²Д.М. Воронов, ²А.Р. Гафаров, ¹⁰Н. Горбунов, ¹⁰В. Гребенюк, ¹⁰А. Гринюк, ²О.А. Гресс, ²Т.И. Гресс, ²О.Г. Гришин, ²А.Н. Дячок, ⁶С.Н. Епимахов, ¹Т.В. Еремин, ²А.В. Загородников, ²В.Л. Зурбанов, ²А.Л. Иванова, ¹Н.И. Карпов, ¹Н.Н. Калмыков, ²Ю.А. Казарина, ⁹В.В. Киндин, ²Н.В. Киричков, ²С.Н. Кириухин, ⁹Р.П. Кокоулин, ⁹К.Г. Компаниец, ²Е.Н. Константинов, ²А.В. Коробченко, ¹Е.Е. Коростелева, ¹В.А. Кожин, ⁶М. Куннас, ¹Л.А. Кузьмичев, ⁴А. Кьявасса, ²В.В. Ленок, ³Б.К. Лубсандоржиев, ¹Н.Б. Лубсандоржиев, ²Р.Р. Миргазов, ⁵Р. Мирзоян, ²Р.Д. Монхоев, ⁶Р. Нахтигалл, ²А.Л. Пахоруков, ¹М.И. Панасюк, ²Л.В. Паньков, ²А.А. Перевалов, ²В.А. Платонов, ²В.А. Полещук, ¹²М. Попеску, ¹Е.Г. Попова, ⁸А. Порелли, ¹В.В. Просин, ⁷В.С. Птускин, ⁹А.А. Петрухин, ³Г.И. Рубцов, ^{11,8}М. Рюгер, ²Е.В. Рябов, ²В.С. Самолига, ⁷П.С. Сатунин, ²А.В. Саункин, ²В.Ю. Савинов, ²Ю.А. Семеней, ³Б.А. Шайбонов (мл), ¹Л.Г. Сवेशникова, ¹А.А. Силаев, ¹А.А. Силаев (мл), ¹А.В. Скурихин, ¹⁰М. Слунка, ²В.А. Таболенко, ¹⁰А. Ткаченко, ¹⁰Л.Г. Ткачев, ⁶М. Тлужиконт, ⁶Д. Хорнс, ²О.Б. Чвалаев, ⁸К. Шпиринг, ⁹К.О. Юрин, ⁹И.И. Яшин

ESTIMATION OF THE OPTICAL STATION ENERGY THRESHOLD OF THE TUNKA-HISCORE ARRAY

⁹I. I. Astarov, ⁹N. S. Barbashina, ¹S. F. Berejnev, ²N. M. Budnev, ⁹A. G. Bogdanov, ¹⁰V. Boreyko, ⁶M. Bükler, ¹¹M. Brückner, ⁴A. Chiavassa, ²A. R. Gafarov, ²O. B. Chvalaev, ¹⁰N. Gorbunov, ¹⁰V. Grebenyuk, ¹⁰A. Grinyuk, ²O. A. Gress, ²T. I. Gress, ²O. G. Grishin, ²A. N. Dyachok, ⁶S. N. Epimakhov, ¹T. V. Eremin, ⁶D. Horns, ²A. L. Ivanova, ¹N. I. Karпов, ¹N. N. Kalmykov, ²Y. A. Kazarina, ⁹V. Kindin, ²N. V. Kirichkov, ²S. N. Kiryuhin, ⁹R. P. Kokoulin, ⁹K. G. Kompaniets, ²E. N. Konstantinov, ²A. V. Korobchenko, ¹E. E. Korosteleva, ¹V. A. Kozhin, ⁶M. Kunnas, ¹L. A. Kuzmichev, ²V. V. Lenok, ³B. K. Lubsandorzhiev, ¹N. B. Lubsandorzhiev, ²R. R. Mirgazov, ⁵R. Mirzoyan, ²R. D. Monkhoev, ⁶R. Nachtigall, ²A. L. Pakhorukov, ¹M. I. Panasyuk, ²L. V. Pankov, ²A. A. Perevalov, ²V. A. Platonov, ²V. A. Poleschuk, ¹²M. Popescu, ¹E. G. Popova, ⁸A. Porelli, ¹V. V. Prosin, ⁷V. S. Ptuskin, ⁹A. A. Petrukhin, ³G. I. Rubtsov, ^{11,8}M. Rueger, ²V. S. Samoliga, ⁷P. S. Satunin, ²A. V. Saunkin, ²V. Yu. Savinov, ²Yu. A. Semenev, ³B. A. Shaibonov (junior), ¹A. A. Silaev, ¹A. A. Silaev (junior), ¹A. V. Skurikhin, ¹⁰M. Slunicka, ⁸C. Spiering, ¹L. G. Sveshnikova, ²V. A. Tabolenko, ¹⁰A. Tkachenko, ¹⁰L. Tkachev, ⁶M. Tluczykont, ²A. D. Veslopolov, ²D. M. Voronov, ⁸R. Wischnewski, ⁹I. I. Yashin, ⁹K. O. Yurin, ²A. V. Zagorodnikov, ²V. L. Zurbanov

В Тункинской долине (республика Бурятия), в 50 км к западу от озера Байкал создается широкоугольная атмосферная черенковская установка Tunka-HiSCORE, являющаяся частью планируемой комплексной гамма-обсерватории TAIGA и предназначенная для проведения исследований в области гамма-астрономии высоких энергий (>30 ТэВ) и физики космических лучей, а так же поиска частиц темной материи.

В статье приводится краткое описание установки и оценка энергетического порога по темпу счета одной станции.

The Tunka-HISCORE wide-angle atmospheric Cherenkov array, one part of the planned TAIGA integrated gamma observatory intended for investigations in the field of high-energy (>30 TeV) gamma-ray astronomy and cosmic-ray physics as well as the search for dark matter, is deployed in the Tunka Valley (Buryat Republic, 50 km west of Lake Baikal).

The brief array description and estimation of the optical station energy threshold of the Tunka-HiSCORE array are presented.

Краткое описание установки

Широкоугольная атмосферная черенковская установка Tunka-HiSCORE будет представлять собой сеть фотодетекторов – оптических станций (ОС), расположенных на поверхности Земли в узлах квадратной решетки. Развертывание установки начато в 2012 г. и осуществляется поэтапно. На текущем этапе (2014 г.) установка состоит из 28 ОС, расстояние между которыми составляет $75\sqrt{2}$ м ≈ 106 м, площадь установки равна примерно 0.25 км². Установка расположена на высоте 669 м над уровнем моря.

Оптическая станция является отдельным, логически завершённым элементом установки Tunka-HiSCORE. ОС представляет собой металлический контейнер с дистанционно-управляемыми крышками для защиты от солнечного света, атмосферных осадков и пыли. В ОС размещаются 4 оптических

модуля (ФЭУ с диаметром фотокатода 20 см, укомплектованные конусами Винстона, увеличивающими площадь светосбора в 4 раза). Телесный угол обзора конусов Винстона и, соответственно, ОС составляет 0.6 ср. Основная электроника оптической станции, ответственная за сбор и оцифровку данных вынесена в расположенный рядом отдельный подогреваемый контейнер, что позволяет уменьшить наводки на ФЭУ и предусилителях. Для понижения энергетического порога станции сигналы с анодов четырех ФЭУ суммируются, и суммарный сигнал поступает на вход компаратора системы выработки локального триггера. Сигналы с анодов и промежуточных динодов оцифровываются с шагом 0.5 нс. Порог компаратора системы локального триггера выбирается в области пересечения интегрального амплитудного спектра сигналов от ШАЛ (спектра плотностей) со спектром флуктуаций фона ночного неба [Berezhnev, 2015].

Оценка энергетического порога

Для того, чтобы оценить энергетический порог по темпу счета одной ОС, мы строим интегральный амплитудный спектр сигналов от ШАЛ (спектр плотностей) и спектр флуктуаций фона ночного неба. Порог будет определяться на их пересечении.

Для этого с помощью программы «ТАМ» [Budnev, 2013] моделируем ШАЛ: разыгрываем координаты пересечения осью ливня поверхности $z=0$, $x_i, y_i \in [-400 \text{ м}; 400 \text{ м}]$; азимутальный угол $\varphi_i \in [0; 2\pi]$; зенитный угол $\theta_i \in [0^\circ; \theta_{\max}=40^\circ]$. Энергию разыгрываем по дифференциальному энергетическому спектру с показателем наклона 2.7, в диапазоне энергии от 30 ТэВ до 1 ПэВ. Сорт первичной частицы разыгрываем разбивая массовый состав космических лучей на 4 группы: протоны (35 %), гелий (35 %), СНО (20 %) и Fe (10 %). Для частицы из каждой группы разыгрываем также глубину максимума ШАЛ, X_{\max_i} . Всего разыгрываем $N=10^6$ событий. Основные зависимости, заложенные в программе «ТАМ» получены при помощи программы CORSIKA.

Задаем параметры ОС: координаты, $x_{\text{OC}}=y_{\text{OC}}=0$; площадь, $S_{\text{OC}}=5026.6 \text{ см}^2$; максимальный угол обзора конуса, $\theta_{\text{cone}}=25^\circ$; временной интервал регистрации импульса $dt=10 \text{ нс}$, фактор вылета электрона с первого динода ФЭУ, $P_{\text{id}}=0.95$.

Рассчитываем среднюю эффективную квантовую чувствительность оптического модуля к характерному спектру черенковского излучения от ШАЛ на уровне установки, $Ch(\lambda)$ и к спектру свечения ночного неба, $NSB(\lambda) - \langle Q_{\text{ef_Ch}} \rangle$ и $\langle Q_{\text{ef_NSB}} \rangle$ соответственно:

$$\langle Q_{\text{ef_Spectr}} \rangle = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{Q_{\text{ef}}(\lambda)}{k\eta(\lambda)T_{\text{plex}}(\lambda)R_{\text{cone}}^*(\lambda)P_{\text{id}}} \frac{\text{Spectr}(\lambda)}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \text{Spectr}(\lambda) d\lambda} d\lambda,$$

где k – поправочный коэффициент; $\eta(\lambda)$ – квантовая эффективность фотокатода ФЭУ; $T_{\text{plex}}(\lambda)$ – спектр пропускания защитного окна конуса, сделанного из плексигласа; $R_{\text{cone}}^*(\lambda) = 0.75R_{\text{cone}}(\lambda) + 0.25$ – эффективный коэффициент отражения конуса, учитывающий то, что часть фотонов, попадает на фотокатод напрямую без отражения от конуса; $\text{Spectr}(\lambda)$ – спектр падающего излучения, для ночного неба $\text{Spectr}(\lambda)=NSB(\lambda)$, а для черенковского излучения $\text{Spectr}(\lambda)=Ch(\lambda)$; $Ch(\lambda) = \frac{1}{\lambda^2} T_{\text{atm}}(\lambda)$; $T_{\text{atm}}(\lambda)$ – спектр пропускания атмосферы; λ_1, λ_2 – длины волн, ограничивающие диапазон, в котором лежит эффективная квантовая чувствительность $Q_{\text{ef}}(\lambda)$. При расчетах спектры $NSB(\lambda)$ и $T_{\text{atm}}(\lambda)$ взяты из диссертации Albrecht Karle [Karle, 1994].

Далее вычисляем число фотонов $Q_1(R_i(x_i, y_i, \varphi_i, \theta_i), E_i, X_{\max_i})$, упавших на ОС за i -тое событие и переходим от него к амплитуде в фотоэлектронах:

$$A_{\text{phe}_i} = Q_i S_{\text{OC}} \cos(\theta_i) \langle Q_{\text{ef_Ch}} \rangle E_{\text{f_cone}}(\theta_i) \frac{dt}{\tau(R_i)},$$

где $E_{\text{f_cone}}(\theta_i)$ – эффективность светосбора конусом, а $\tau(R_i)$ – зависимость ширины импульса от расстояния до оси ливня.

Теперь строим интегральный амплитудный спектр сигналов от ШАЛ – число событий $n_{(>A_{\text{phe}})}$, давших отклик с амплитудой, большей A_{phe} , в зависимости от A_{phe} , отнесенное ко времени:

$$\text{Rate}_{(>A_{\text{phe}})} = \frac{n_{(>A_{\text{phe}})}}{t} n_{(>A_{\text{phe}})} \frac{\pi S_{\text{area}} I_{\text{КЛ}} (1 - \cos(2\theta_{\max}))}{2N},$$

где $S_{\text{area}}=6.4 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ – площадь области, в которой разыгрываются события; $I_{\text{КЛ}} \approx 30 \text{ [м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}]$ – поток космических лучей с энергией $E > 30 \text{ ТэВ}$, и спектр флуктуаций фона ночного неба, $\text{Rate}_{N_{\text{phe_sky}}}$, имеющего нормальное распределение.

$$\begin{aligned} \text{Rate}_{N_{\text{phe_sky}}} &= \frac{1}{dt} P_{(\Delta N_{\text{phe_sky}} > A_{\text{phe}})} = \\ &= \frac{1}{dt} \text{erfc} \frac{A_{\text{phe}}}{\sigma_{(N_{\text{phe_sky}})} \sqrt{2}} = \frac{1}{dt} \text{erfc} \frac{A_{\text{phe}}}{\sqrt{2} \langle N_{\text{phe_sky}} \rangle}, \end{aligned}$$

где

$\langle N_{\text{phe_sky}} \rangle = 2\pi I_{\text{sky}} S_{\text{cone}} \langle Q_{\text{ef_NSB}} \rangle dt (1 - \cos(2\theta_{\text{cone}}))$ – среднее число фотоэлектронов, родившихся в ОС от фотонов фонового свечения ночного неба за временной интервал регистрации импульса dt и выбивших хотя бы по одному электрону с первого динода; $P_{(\Delta N_{\text{phe_sky}} > A_{\text{phe}})}$ – вероятность того, что число

$N_{\text{phe_sky}}$ отклонится от среднего $\langle N_{\text{phe_sky}} \rangle$ более чем на A_{phe} ; $I_{\text{sky}}=3.5 \cdot 10^{12} \text{ [м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}]$ – поток фотонов фонового свечения ночного неба.

В результате для нескольких значений $\eta_{\max}=\eta(400 \text{ нм})$ (табл.) мы получаем амплитудные спектры и спектры флуктуаций фона ночного неба (рис. 1). Точки их пересечения дают пороговую амплитуду A_{phe} [фотоэл.] и темп счета Rate [Гц] для разных значений η_{\max} и пороговое число фотонов на станцию: $Q = A_{\text{phe}} / (S_{\text{OC}} \langle Q_{\text{ef_Ch}} \rangle)$ (табл.). Построив ФПР для разных энергий (рис. 2), мы можем получить зависимость пороговой энергии от расстояния (рис. 3). На рис. 4 приведен экспериментальный амплитудный спектр для 4-х ФЭУ одной ОС. Темп счета станции составляет примерно 12 Гц, что согласуется с расчетами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-02-00372 и 13-02-00214), гранта Правительства Российской Федерации (договор 14.B25.31.0010), Программы стратегического развития ИГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Berezhnev S.F., Budnev N.M., Bükер M., et al. First results from the operation of the prototype tunka-HiSCORE experimental array // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics (Известия РАН. Сер. физ.). 2015. V. 79, N 3. P. 348–351, doi: 10.3103/S1062873815030107.

$\eta_{\max}=\eta(400)$	k	$\langle Q_{ef_Ch} \rangle$	$\langle Q_{ef_NSB} \rangle$	Rate, Гц	Порог, A_{phe} , phe	Порог, Q , ph
0.14	0.599	0.07	0.056	11.5	129	0.37
0.20	0.855	0.1	0.089	13	140	0.28
0.234	1	0.117	0.094	12	165	0.28
0.30	1.282	0.15	0.12	17	167	0.22

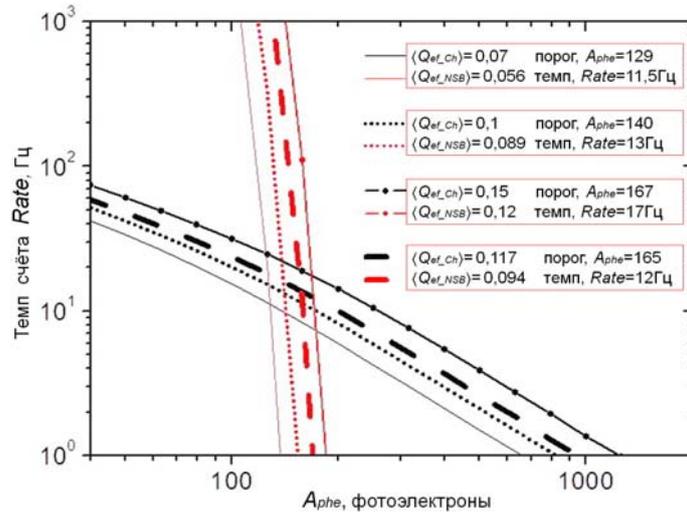


Рис. 1. Амплитудные спектры и спектры флуктуаций фона ночного неба для нескольких значений квантовой эффективности ФЭУ.

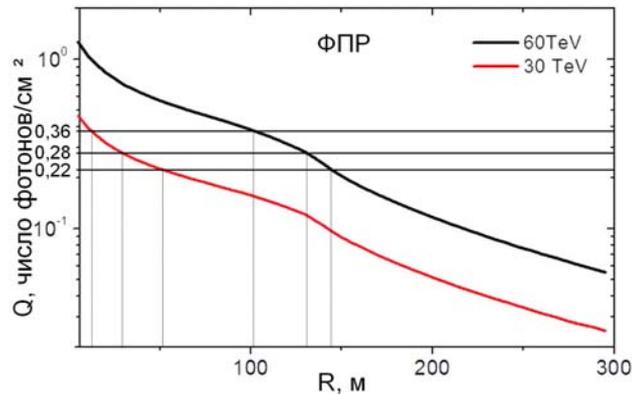


Рис. 2. Функция пространственного распределения черенковских фотонов (плотность фотонов в зависимости от расстояния до оси ливня) для энергий $E=30$ ТэВ и $E=60$ ТэВ.

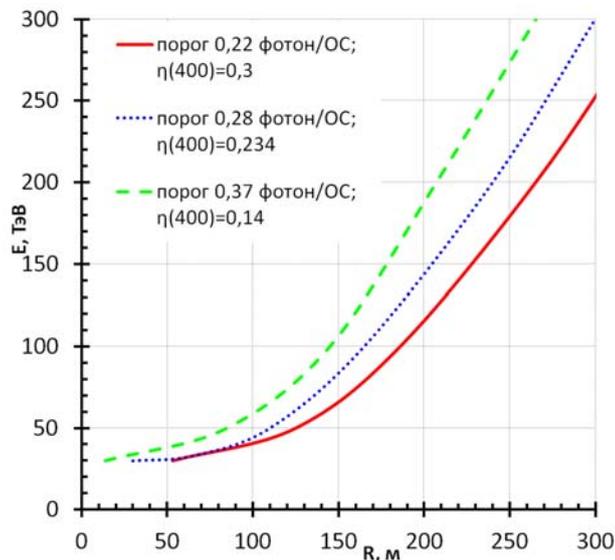


Рис. 3. Зависимость пороговой энергии от расстояния до оси ШАЛ.

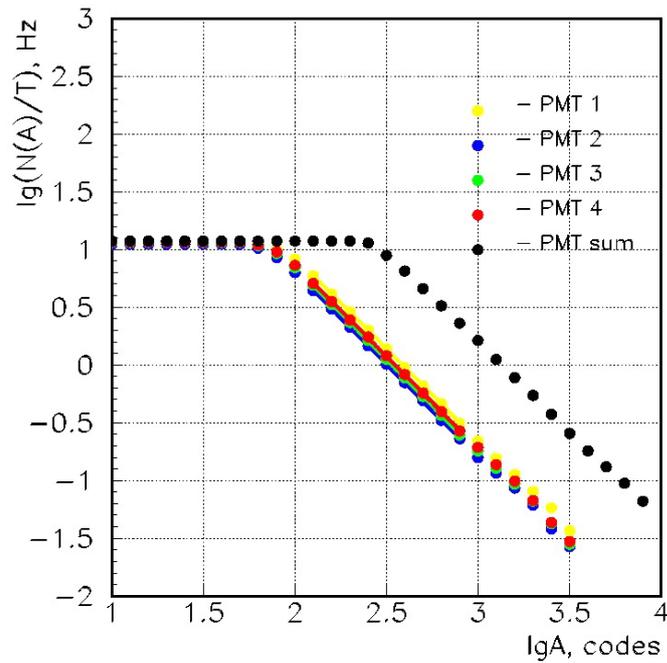


Рис. 4. Экспериментальный амплитудный спектр для 4-х ФЭУ одной ОС и их суммы.

Budnev N., Chernov D., Gress O. et al. Tunka-25 Air Shower Cherenkov array: The main results // *Astroparticle Physics*. 2013. V. 50–52. P. 18–25.

Albrecht Karle. Entwicklung eines neuartigen atmosphärischen Tscherenkovdetectors und Messungen an hochenergetischer Kosmischer Strahlung zwischen 15 und 1000 TeV: Dissertation. Munchen: Max-Planck-Institut für Physik, 1994. V. 25. 27 p.

¹НИИЯФ МГУ, Москва Россия

^{2a}НИИПФ ИГУ, Иркутск, Россия

³ИЯИ РАН, Москва, Россия

⁴Туринский университет, Турин, Италия

⁵Институт М. Планка, Мюнхен, Германия

⁶Институт экспериментальной физики Гамбургского университета, Гамбург, Германия

⁷ИЗМИРАН, Троицк, Московская область, Россия

⁸ДЭЗИ, Цойтен, Германия

⁹НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

¹⁰ОИЯИ, Дубна, Россия

¹¹Институт компьютерных исследований Гумбольдского университета, Берлин, Германия

¹²Институт космических исследований, Бухарест, Румыния