

УДК 539.1.05

## ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПРОТОТИПА ШИРОКОУГОЛЬНОГО ТЕЛЕСКОПА SIT В СОСТАВЕ АСТРОФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА TAIGA

© 2021 г. Д. А. Подгрудков<sup>1,2</sup>, Е. А. Бонвеч<sup>1,\*</sup>, И. А. Вайман<sup>1,2</sup>, Д. В. Чернов<sup>1</sup>, И. И. Астапов<sup>3</sup>, П. А. Безъязыков<sup>4</sup>, М. Бланк<sup>5</sup>, А. Н. Бородин<sup>6</sup>, М. Брюкнер<sup>7</sup>, Н. М. Буднев<sup>4</sup>, А. В. Булан<sup>1,2</sup>, А. Вайдянатан<sup>8</sup>, Р. Вишневский<sup>6,7</sup>, П. А. Волчугов<sup>1,2</sup>, Д. М. Воронин<sup>9</sup>, А. Р. Гафаров<sup>4</sup>, О. А. Гресс<sup>4</sup>, Т. И. Гресс<sup>4</sup>, О. Г. Гришин<sup>4</sup>, А. Ю. Гармаш<sup>8,10</sup>, В. М. Гребенюк<sup>6,11</sup>, А. В. Гринюк<sup>6</sup>, А. Н. Дячок<sup>4</sup>, Д. П. Журов<sup>4</sup>, А. В. Загородников<sup>4</sup>, А. Л. Иванова<sup>4,10</sup>, Н. Н. Калмыков<sup>1</sup>, В. В. Киндин<sup>3</sup>, С. Н. Кириухин<sup>4</sup>, Р. Л. Кокоулин<sup>3</sup>, К. Г. Компаниец<sup>3</sup>, Е. Е. Коростелева<sup>1</sup>, В. А. Кожин<sup>1</sup>, Е. А. Кравченко<sup>8,10</sup>, А. П. Крюков<sup>1</sup>, Л. А. Кузьмичев<sup>1</sup>, А. Кьявасса<sup>12</sup>, М. Лаврова<sup>6</sup>, А. А. Лагутин<sup>13</sup>, Ю. Е. Лемешев<sup>4</sup>, Б. К. Лубсандоржиев<sup>10</sup>, Н. Б. Лубсандоржиев<sup>1</sup>, Р. Р. Миргазов<sup>4</sup>, Р. Мирзоян<sup>1,14</sup>, Р. Д. Монхоев<sup>4</sup>, Е. А. Осипова<sup>1</sup>, А. Л. Пахорук<sup>4</sup>, А. Пан<sup>6</sup>, М. И. Панасюк<sup>1</sup>, Л. В. Паньков<sup>4</sup>, А. А. Петрухин<sup>3</sup>, В. А. Полещук<sup>4</sup>, М. Попеску<sup>15</sup>, Е. Г. Попова<sup>9</sup>, А. Порелли<sup>6,7</sup>, Е. Б. Постников<sup>1</sup>, В. В. Просин<sup>1</sup>, В. С. Птускин<sup>16</sup>, А. А. Пушнин<sup>4</sup>, Р. И. Райкин<sup>13</sup>, Г. И. Рубцов<sup>9</sup>, Е. В. Рябов<sup>4</sup>, Я. И. Сагань<sup>6,11</sup>, В. С. Самолига<sup>4</sup>, А. А. Силаев<sup>1</sup>, А. А. Силаев (мл.)<sup>1</sup>, А. Ю. Сидоренков<sup>9</sup>, А. В. Скурихин<sup>1</sup>, М. Слуначка<sup>6</sup>, А. В. Соколов<sup>8,10</sup>, Л. Г. Свешникова<sup>1</sup>, Я. В. Суворкин<sup>4</sup>, В. А. Таболенко<sup>4</sup>, А. В. Танаев<sup>4</sup>, Б. А. Таращанский<sup>4</sup>, М. Ю. Терновой<sup>4</sup>, Л. Г. Ткачев<sup>6,11</sup>, М. Тлужиконт<sup>5</sup>, Н. А. Ушаков<sup>9</sup>, Д. Хорнс<sup>5</sup>, И. В. Яшин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

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

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

<sup>4</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Иркутский государственный университет”, Научно-исследовательский институт прикладной физики,  
Иркутск, Россия

<sup>5</sup>Университет Гамбурга, Гамбург, Германия

<sup>6</sup>Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований,  
Дубна, Россия

<sup>7</sup>Немецкий электронный синхротрон (DESY), Цойтен, Германия

<sup>8</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск, Россия

<sup>9</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>10</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук,  
Новосибирск, Россия

<sup>11</sup>Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области  
“Университет “Дубна”, Дубна, Россия

<sup>12</sup>Национальный институт ядерной физики, Турин, Италия

<sup>13</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Алтайский государственный университет”, Барнаул, Россия

<sup>14</sup>Физический институт Макса Планка, Мюнхен, Германия

<sup>15</sup>Институт космических наук, Будапешт, Румыния

<sup>16</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: bonvech@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Прототип малого широкоугольного телескопа был установлен в Тункинской долине в составе установки TAIGA в сентябре 2019 г. За прошедшие 8 сеансов наблюдений были собраны данные по работе установки, проведена проверка режимов работы систем телескопа, работа триггерной системы и системы сопряжения с комплексом TAIGA. Представлены первые результаты анализа данных о работе прототипа телескопа.

DOI: 10.31857/S0367676521040293

## ВВЕДЕНИЕ

Прототип малого широкоугольного телескопа (small imaging telescope, SIT) был установлен в центре первого кластера детектор HiSCORE комплексной установки TAIGA [1, 2] и проработал в составе установки сезон измерений 2019–2020. SIT входит в сеть сопряжения установки HiSCORE [2] наравне с остальными ее станциями. Телескоп предназначен для регистрации вспышек излучения Вавилова–Черенкова (далее черенковский свет) от широких атмосферных ливней (ШАЛ).

SIT состоит из шестиугольного зеркала с большим диаметром 700 мм и радиусом кривизны 940 мм. Поле зрения ограничено диафрагмой диаметром 400 мм (с учетом камеры эффективная площадь  $0.1 \text{ м}^2$ ), отстоящей от центра зеркала на 710 мм. Между диафрагмой и зеркалом установлена камера телескопа диаметром 250 мм. Полный угол обзора установки составляет около  $18^\circ$ . Подробное описание установки приведено в [3]. Оптическая ось установки направлена строго на юг под углом  $25^\circ$  к вертикали.

Светочувствительная камера SIT, представляет собой шестиугольную матрицу, состоящую из 49 кремниевых фотоумножителей (SiPM) SensL MicroFC-SMTPA-60035 со светособорниками, обеспечивающими сбор света с 73% полной площади камеры. Оцифровка сигнала производится с частотой 80 МГц. По сигналу триггера записываются сигналы всех каналов течение 1 мкс до сигнала триггера и 5 мкс после, формируя один “кадр”. В телескопе SIT используются системы управления электроникой и сбора данных, ранее разработанные и испытанные в эксперименте СФЕРА-2 [4].

В течение всего периода измерений измерялись и записывались вместе с данными событий параметры телеметрии: температура матрицы SiPM, общий ток и напряжение питания матрицы, температура электроники, температура и давление воздуха. Данные телеметрии используются для определения калибровочных поправок по напряжению питания и температуре SiPM.

## СТАТИСТИКА

SIT проработал с сентября 2019 г. по апрель 2020 г., в том числе в режиме сопряжения с установкой HiSCORE с конца декабря 2019 г. В течение этого времени набралось 110 ясных безлунных периодов наблюдений, из них 66 ночей в режи-

ме сопряжения с установкой HiSCORE. За этот период зарегистрировано 1.92 млн событий. Все события вошли в анализ работы матрицы SiPM, определение зависимости усиления каждого SiPM от температуры и напряжения. Для оценки результатов работы самого детектора зарегистрированные события прошли процедуру отбора.

Первичный отбор событий заключался в поиске пика события в развертке суммарного сигнала всех 49 каналов. Частота работы триггерной платы отличалась в 8 раз от частоты работы плат оцифровки сигнала, поэтому положение триггерной метки известно с точностью около 100 нс. Событие в “кадре” считалось найденным, если в окне 150 нс вокруг ожидаемой метки триггера найден пик выше  $5\sigma$  относительно остального сигнала в “кадре”.

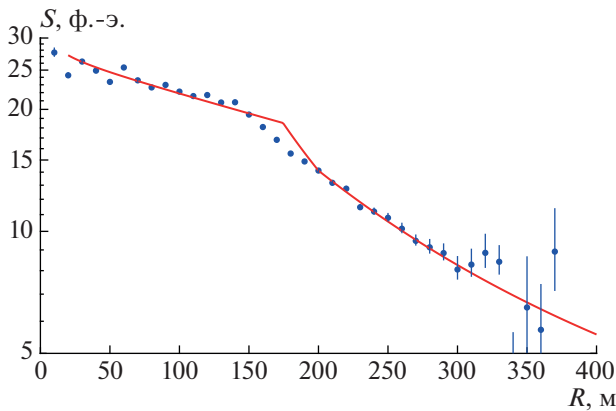
Положение обнаруженного пика суммарного сигнала далее считалось временем прихода события. В интервале 60 нс вокруг него проводился поиск и интегрирование импульсов в развертке каждого канала, формируя изображение события. Далее проводился отсев случайных пиков, не относящихся к событию: тепловой шум SiPM, фотоэлектроны от фоновой засветки, проявляющиеся как изолированные пиксели.

В силу расположения матрицы SiPM вне фокуса зеркала размер пятна сведения параллельного пучка лучей превышал размер одного пикселя, т.е. свет от ШАЛ не мог формировать изображение, состоящее только из одного пикселя. Поэтому из рассмотрения исключались также события, в изображении которых присутствовал только один пиксель.

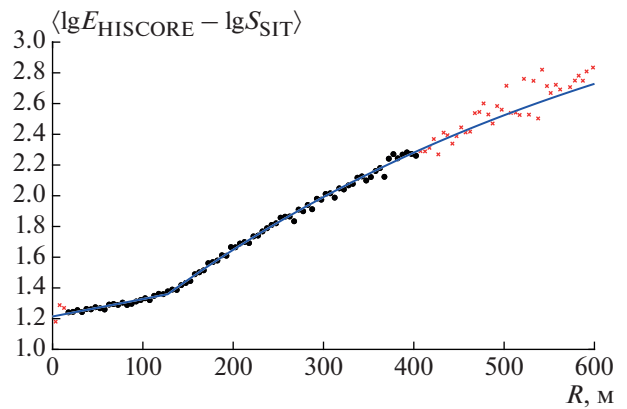
По этим критериям из исходных 1.92 млн записанных триггеров было отобрано 610 тысяч событий, из них 75 тысяч были одновременно зафиксированы установкой HiSCORE. Для каждого из этих событий были восстановлены направления прихода черенковского света от ШАЛ, суммарная амплитуда события  $S$  в фотоэлектронах, площадь изображения, длительность суммарного импульса, время прихода света для последующего более точного сравнения с HiSCORE и ряд других параметров.

## АНАЛИЗ СОВМЕСТНЫХ СОБЫТИЙ

При анализе совместных событий SIT и HiSCORE использовались параметры, не регистрируемые SIT, но определяемые по данным



**Рис. 1.** ФПР ЧС, восстановленная по данным SIT для первичных частиц с энергией 350–450 ТэВ. Расстояние до оси и энергия ШАЛ получены от HiSCORE. Зарегистрированный сигнал  $S$  приведен в числе фотоэлектронов. Линией приведена теоретическая ФПР ЧС из работы [7].



**Рис. 2.** Средняя разность логарифма энергии  $E$  первичной частицы ШАЛ в ТэВ и логарифма полной амплитуды  $S$  события SIT в фотоэлектронах в зависимости от расстояния до оси ливня. Сплошной линией показана параметризация этой зависимости. Точками показаны данные, вошедшие в построение параметризации, косыми крестами — не вошедшие.

HiSCORE: координаты оси ливня и энергия первичной частицы. Алгоритмы восстановления параметров ШАЛ в эксперименте HiSCORE описаны в работе [5]. Стоит отметить, что оценка расстояния до оси ШАЛ по данным SIT возможна по ширине импульса, однако точность этой оценки крайне низкая в силу недостаточной частоты оцифровки, поскольку требуется частота оцифровки сигнала выше 200 МГц.

В целях исключения случайных совпадений, для анализа брались только те события, в которых сработало несколько измерительных пунктов установки HiSCORE, включая один из четырех ближайших к телескопу SIT, расположенных на расстояниях около 75 м каждый.

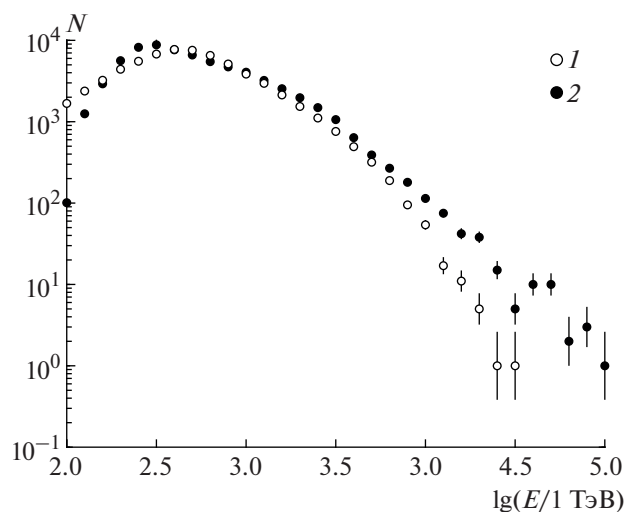
На рис. 1 приведена средняя функция поперечного распределения черенковского света (ФПР ЧС) в диапазоне энергий 350–450 ТэВ. ФПР получена путем усреднения зарегистрированных суммарных амплитуд  $S$  событий с осью на выбранном расстоянии от детектора SIT. Данная ФПР по форме совпадает с модельными ФПР ЧС [6], т.е. регистрируемые SIT события в целом являются вспышками черенковского света от ШАЛ, а не случайными совпадениями.

Анализ эффективности регистрации, возможной ее неоднородности по полю зрения, фактической квантовой эффективности использованных SiPM и эффектов геометрических искажений будет проведен в последующих работах. Анализ работы отдельных SiPM приведен частично в [3].

Проведена привязка параметра  $S$  суммарной амплитуды события детектора SIT к первичной энергии события, полученной из данных HiSCORE. На рис. 2 показан средняя разность логарифма полной энергии ШАЛ в ТэВ и логарифма полной амплитуды события  $S$  в фотоэлектронах в зави-

симости от расстояния  $R$  до оси ливня. Кривой показана параметризация зависимости кусочно-непрерывной функцией, точками показаны экспериментальные данные, вошедшие в построение параметризации, косыми крестиками — исключенные из анализа данные в областях малой статистики, где полученные точки недостоверны.

С учетом полученной на предыдущем шаге кривой поправок энергии возможно оценить энергию ШАЛ по показаниям SIT с привлечением от HiSCORE лишь информации о положении оси ливня. Распределение событий по энергии, построенное по параметру  $S$  телескопа SIT приведено на рис. 3 вместе с распределением по энергии, определенной по данным установки HiSCORE.



**Рис. 3.** Распределения событий по энергии, 1 — построенные по параметру  $S$  телескопа SIT, 2 — по энергии, определенной по данным установки HiSCORE.

В дальнейшем планируется провести прямое полное моделирование работы SIT и моделирование отклика детектора с известными свойствами SiPM. Такая работа позволит перейти от использования кривой на рис. 2 к использованию модельных соотношений для различных расстояний от оси ливня для различных первичных частиц с различными энергиями, т.к. учет зависимости от этих параметров позволит повысить точность оценки энергии первичной частицы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прототип малого широкоугольного телескопа SIT проработал в составе астрофизического комплекса TAIGA в течение измерительного сезона 2019–2020 гг. Реализована аппаратурная синхронизация телескопа SIT с установкой HiSCORE.

На основании данных установки HiSCORE проведена процедура энергетической калибровки телескопа SIT. В дальнейшем планируется разра-

ботка независимого метода оценки энергии событий по данным телескопа.

Работа поддержана РФФ (проект № 19-72-20230).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Budnev N., Astapov I., Barbashina N. et al. (TAIGA Collaboration) // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2017. V. 845. P. 330.
2. Gress O., Astapov I., Budnev N. et al. (TAIGA Collaboration) // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2017. V. 845. P. 367.
3. Chernov D., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // J. Instrum. 2020. V. 15. No. 9. Art. No. C09062.
4. Antonov R.A., Bonvech E.A., Chernov D.V. et al. // Astropart. Phys. 2020. V. 122. Art. No. 102460.
5. Prosin V., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // EPJ Web Conf. 2019. V. 210. Art. No. 01003.
6. Prosin V.V., Berezhnev S.F., Budnev N.M. et al. // EPJ Web Conf. 2015. V. 99. Art. No. 04002.
7. Budnev N., Chernov D., Gress O. // Astropart. Phys. 2013. V. 50–52. P. 18.

## First results of wide-angle telescope prototype for the TAIGA installation

D. A. Podgrudkov<sup>a,b</sup>, E. A. Bonvech<sup>a,\*</sup>, I. V. Vaiman<sup>a,b</sup>, D. V. Chernov<sup>a</sup>, I. I. Astapov<sup>c</sup>, P. A. Bezyazeev<sup>d</sup>, M. Blank<sup>e</sup>, A. Borodin<sup>f</sup>, M. Brückner<sup>f</sup>, N. Budnev<sup>d</sup>, A. Bulan<sup>a,b</sup>, A. Vaidyanathan<sup>i</sup>, R. Wischnewski<sup>g</sup>, P. Volchugov<sup>a,b</sup>, D. Voronin<sup>p</sup>, A. Gafarov<sup>d</sup>, O. Gress<sup>d</sup>, T. Gress<sup>d</sup>, O. Grishin<sup>d</sup>, A. Garmash<sup>i,j</sup>, V. Grebenyuk<sup>f,k</sup>, A. Grinyuk<sup>f</sup>, A. Dyachok<sup>d</sup>, D. Zhurov<sup>d</sup>, A. Zagorodnikov<sup>d</sup>, A. Ivanova<sup>d,j</sup>, N. Kalmykov<sup>a</sup>, V. Kindin<sup>c</sup>, S. Kiryuhin<sup>d</sup>, R. Kokoulin<sup>c</sup>, K. Kompaniets<sup>c</sup>, E. Korosteleva<sup>a</sup>, V. Kozhin<sup>a</sup>, E. Kravchenko<sup>i,j</sup>, A. Kryukov<sup>a</sup>, L. Kuzmichev<sup>a</sup>, A. Chiavassa<sup>h</sup>, M. Lavrova<sup>f</sup>, A. Lagutin<sup>l</sup>, Yu. Lemeshev<sup>d</sup>, B. Lubsandorzhev<sup>l</sup>, N. Lubsandorzhev<sup>a</sup>, R. Mirgazov<sup>d</sup>, R. Mirzoyan<sup>a,m</sup>, R. Monkhoev<sup>d</sup>, E. Osipova<sup>a</sup>, A. Pakhorukov<sup>d</sup>, A. Pan<sup>f</sup>, M. Panasyuk<sup>a</sup>, L. Pankov<sup>d</sup>, A. Petrukhin<sup>c</sup>, V. Poleschuk<sup>d</sup>, M. Popescu<sup>n</sup>, E. Popova<sup>a</sup>, A. Porelli<sup>f,g</sup>, E. Postnikov<sup>a</sup>, V. Prosin<sup>a</sup>, V. Ptuskin<sup>l</sup>, A. Pushnin<sup>d</sup>, R. Raikin<sup>o</sup>, G. Rubtsov<sup>p</sup>, E. Rjabov<sup>d</sup>, Y. Sagan<sup>f,k</sup>, V. Samoliga<sup>d</sup>, A. Silaev<sup>a</sup>, A. Silaev, Jr., A. Sidorenkov<sup>a</sup>, A. Skurikhin<sup>a</sup>, M. Slunicka<sup>f</sup>, A. Sokolov<sup>i,j</sup>, L. Sveshnikova<sup>a</sup>, Y. Suvorkin<sup>d</sup>, V. Tabolenko<sup>d</sup>, A. Tanaev<sup>d</sup>, B. Tarashansky<sup>d</sup>, M. Ternovoy<sup>d</sup>, L. Tkachev<sup>f,k</sup>, M. Tluczykont<sup>e</sup>, N. Ushakov<sup>p</sup>, D. Horns<sup>e</sup>, I. Yashin<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>b</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia

<sup>c</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

<sup>d</sup>Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>e</sup>Institute for Experimental Physics, University of Hamburg, Hamburg, Germany

<sup>f</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

<sup>g</sup>DESY, Zeuthen, Germany

<sup>h</sup>Dipartimento di Fisica Generale Universiteta di Torino and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Torino, Italy

<sup>i</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>j</sup>Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>k</sup>Dubna State University, Dubna, Russia

<sup>l</sup>Altai State University, Barnaul, Russia

<sup>m</sup>Max-Planck-Institut für Physik, Munich, Germany

<sup>n</sup>Institute of Space Science, Bucharest, Romania

<sup>o</sup>Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Russia

<sup>p</sup>Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia

\*e-mail: bonvech@yandex.ru

The prototype of a small wide-angle telescope was installed in September 2019 in the Tunka Valley as a part of TAIGA installation. During 8 measuring sessions the data was collected on prototype systems, as trigger, data acquisition, telemetry, TAIGA synchronization. Here we present the first results of telescope prototype performance analysis.