УДК 524.1

# ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАКСИМУМА ЛИВНЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ TUNKA RADIO EXTENSION

© 2019 г. П. А. Безъязыков<sup>1,</sup> \*, Н. М. Буднев<sup>1</sup>, О. А. Гресс<sup>1</sup>, А. В. Загородников<sup>1</sup>, Ю. А. Казарина<sup>1</sup>, М. Кляйфгес<sup>2</sup>, Е. Е. Коростелёва<sup>3</sup>, Д. Г. Костюнин<sup>4</sup>, Л. А. Кузьмичёв<sup>3</sup>, В. В. Ленок<sup>4</sup>, Н. Лубсандоржиев<sup>3</sup>, Т. Н. Маршалкина<sup>1</sup>, Р. Д. Монхоев<sup>1</sup>, Э. А. Осипова<sup>3</sup>, Л. В. Паньков<sup>1</sup>, А. Л. Пахоруков<sup>1</sup>, В. В. Просин<sup>3</sup>, О. Л. Федоров<sup>1</sup>, Р. Хиллер<sup>4</sup>, А. Хонгс<sup>4</sup>, Т. Хьюге<sup>4</sup>, Д. О. Черных<sup>1</sup>, Д. А. Шипилов<sup>1</sup>, Ф. Г. Шрёдер<sup>2, 5</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский государственный университет", Научно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Технологический институт Карлсруэ, Институт обработки данных и электроники, Карлсруэ, Германия <sup>3</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>4</sup>Технологический институт Карлсруэ, Институт ядерной физики, Карлсруэ, Германия

<sup>5</sup>Университет Дэлавера, факультет физики и астрономии, Ньюарк, США

\*E-mail: domifa@rambler.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г. После доработки 20.02.2019 г. Принята к публикации 26.04.2019 г.

Типка-Rex – антенная решетка, расположенная в Тункинской долине, регистрирующая радиоизлучение широких атмосферных ливней, инициированных космическими лучами с энергиями свыше 100 ПэВ. В работе представлен уточненный метод восстановления максимума ливня по данным Tunka-Rex. Разработана модель расчета эффективности детектора, учитывающая различные параметры: энергию и диапазон масс первичных частиц, геометрию ливня и конфигурацию детектора. Выполнена оценка систематической погрешности, вносимой атмосферой, на восстановление глубины максимума ливня и получено распределение среднего максимума ливня в зависимости от энергии.

DOI: 10.1134/S0367676519080064

#### введение

Типка-Rex [1] — антенная решетка, регистрирующая радиоизлучение широких атмосферных ливней (ШАЛ), инициированных космическими лучами (КЛ) высоких энергий. Регистрация проводится в диапазоне 30—80 МГц по триггеру от оптических (Тунка-133 [2]) и сцинтилляционных (Tunka-Grande [3]) детекторов. В сравнении с классическими оптическими методами, регистрация радиоизлучения ШАЛ представляет особый интерес ввиду независимости от погодных условий и времени суток.

На настоящий момент Tunka-Rex состоит из 63 антенных станций, покрывающих площадь около 3 км<sup>2</sup>. Каждая антенная станция состоит из двух перпендикулярных кольцевых антенн SALLA (Short Aperiodic Loaded Loop Antenna) [4] диаметром 120 см, закрепленных на столбе на высоте 2.5 м. В верхней части антенной станции антенны подключены к малошумящему усилителю, который, в свою очередь, подключен к фильтруусилителю и далее к АЦП Тунки-133 или Tunka-Grande (частота дискретизации – 200 МГц, динамический диапазон – 12 бит, длина дорожки – 1024 значения).

### РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Радиоизлучение ШАЛ обусловлено двумя основными эффектами. Первый эффект — геомагнитный [5] — заключается в изменении направления движения заряженной компоненты ливня под воздействием геомагнитного поля, зависит от направления прихода ливня (чем меньше угол к вектору геомагнитного поля, тем меньше амплитуда регистрируемого радиоизлучения) и вносит основной вклад в итоговую картину. Второй эффект — эффект Аскарьяна [6], заключается в из-



**Рис. 1.** Среднее расстояние до максимума ливня в зависимости от зенитного угла и энергии первичной частицы по данным моделирования.

менении заряда ливня вследствие ионизации атмосферы и аннигиляции позитронов. Вклад этого эффекта в сравнении с геомагнитным достаточно мал (около 10%), однако остается существенным и должен учитываться при обработке данных и интерпретации полученных результатов [7]. Таким образом, для значительного количества событий существует зависимость эффективности регистрации в зависимости от направления прихода первичной частицы.

Для расчета эффективности регистрации радиоизлучения ШАЛ в условиях Tunka-Rex была разработана Монте-Карло модель, базирующаяся на данных моделирований CoREAS, и параметрах детектора. Модель рассчитывает след ливня (область на поверхности детектора, внутри которой амплитуда радиоизлучения превышает порог), применяет выборку по количеству антенн и рассчитывает эффективность регистрации событий в зависимости от энергии и направления прихода. Результаты работы модели были сравнены с реальным восстановлением Tunka-Rex. Были взяты входные данные с хост-детектора для событий 2012—2017 гг., для каждого события была рассчитана эффективность регистрации. Далее были выбраны события с рассчитанной эффективностью регистрации >90% и проведено их сравнение с реально зарегистрированными (прошедшими все фильтры, выборки и с успешно восстановленными параметрами ливня) событиями. Проверка показала хорошее согласие работы модели с данными хост-эксперимента (см. табл. 1.)

### ФИТИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШАБЛОНОВ

Для увеличения точности восстановления максимума ливня был апробирован следующий подход. Для предобработанных событий Tunka-Rex была выполнена серия моделирований радиоизлучения ливня (для каждого отдельного событий по серии, свободный параметр — масса первичной частицы и глубина максимума ливня). По результатам моделирований были получены дорожки сигналов, огибающие которых сравнивались с огибающими, восстановленными из реальных данных, после чего находился минимум  $\chi^2$  между моделированным и реальным сигналом, и соответственно, положение глубины максимума ливня, относящееся к соответствующему моделированию. Более подробно см. [8].

#### ВЛИЯНИЕ ИНДЕКСА ПРЕЛОМЛЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Было проведено исследование влияния атмосферного индекса преломления на восстановление параметров ШАЛ [9]. Для расчета индекса преломления использовались данные спутниковой системы наблюдений атмосферы GDAS [10], включающие распределения плотности, влажности и температуры воздуха в зависимости от высоты с разрешением по времени 3 часа и по пространству 1°. Было проведено сравнение данных GDAS с данными модели атмосферы, заложенной в CORSIKA [11] и использующейся для обработки данных Tunka-Rex. Были построены про-

Поколение антенн	Год	Кол-во антенн	Ожидаемое число событий	Зарегистрировано событий	Эффективность
1a	2012/13	18	23	20	0.85
1b	2013/14	25	28	27	0.96
2	2015/16	44	14	14	1.00
3	2016/17	63	17	16	0.94
		Итого	82	77	0.94

Таблица 1. Результаты работы модели расчета эффективности для разных сезонов измерений и их сравнение с результатами восстановления Tunka-Rex



**Рис. 2.** Зависимость отклонения индекса преломления по данным GDAS от индекса преломления, используемого в моделировании CORSIKA, как функция высоты.

фили индекса преломления (рис. 2), на основе которых был проведен расчет систематической ошибки определения максимума ливня на Tunka-Rex. Расчетная флуктуация максимума ливня вследствие изменения атмосферных условий незначительна.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные в данной работе методы позволили увеличить точность восстановления энергии до 10% и максимума ливня до 25–35 г/см<sup>2</sup> в эксперименте Tunka-Rex. Также была разработана и протестирована модель расчета эффективности регистрации радиоизлучения ШАЛ, позволяющая рассчитывать апертуру и экспозицию детектора и, как следствие, получать более высокую точность в задачах восстановления энергетического спектра и массового состава КЛ. В дальнейшем мы планируем провести более детальную калибровку и изучение систематики и перейти к восстановлению массового состава с использованием комбинированных измерений радио и сцинтилляционного детекторов.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (гос. задания 3.9678.2017/БЧ, 3.904.2017/ПЧ, 3.6787.2017/ИТР, 1.6790.2017/ИТР), грантами РФФИ (16-02-00738, 17-02-00905, 18-32-00460). Работа выполнена с использованием оборудования ТАЦКП в рамках выполнения соглашения с Министерством науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор RFMEFI59317X0005).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Prosin V.V., Berezhnev S.F., Budnev N.M. et al.* // EPJ Web Conf. 2015. V. 99. Art. № 04002.
- 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. № 3. Р. 395.
- 3. Bezyazeekov P.A. et al. (Tunka-Rex Collaboration) // Phys. Rev. D. 2018. V. 97. Art. № 122004.
- 4. *Abreu P. et al. (Pierre Auger) //* JINST. 2012. V. 7. Art. № 10011.
- Kahn F.D., Lerche I. // Proc. Phys. Soc. 1966. V. A289. P. 206.
- 6. Аскарьян Г.А. // ЖЭТФ. 1961. Т. 41. С. 616.
- Kostunin D. et al. (Tunka-Rex Collaboration) // Astropart. Phys. 2016. V. 74. P. 79.
- Marshalkina T.N. et al. (Tunka-Rex Collaboration) // Proc. 26th E + CRS and 35th RCRC. (Barnaul, 2018). P. 135.
- 9. *Mitra P. et al. (LOFAR Collaboration) //* Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). P. 325.
- https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/ model-datasets/global-data-assimilation-system-gdas
- 11. *Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al.* // FZKA-6019. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers. Karlsruhe: Forschungszentrum, 1998. 90 p.