Влияние атмосферного давления на вариации плотности потока частиц широких атмосферных ливней по экспериментальным данным установки Tunka-Grande

© С.Д. Малахов,[1] Р.Д. Монхоев,[1,2] И.И. Астапов,[3] П.А. Безъязыков,[1] Е.А. Бонвеч,[4] А. Блинов,[5] А.Н. Бородин,[5] Н.М. Буднев,[1] А.В. Булан,[4] П.В. Бусыгин,[1] П.В. Волков,[6] П.А. Волчугов,[1,4] Д.М. Воронин,[7] А.Р. Гафаров,[1] А.Ю. Гармаш,[2,8] В.М. Гребенюк,[5,9] О.А. Гресь,[1] Т.И. Гресь,[1] Е.О. Гресь,[1] А.А. Гринюк,[5] О.Г. Гришин,[1] А.Н. Дячок,[1] В.А. Ерофеева,[1] Д.П. Журов,[1] А.В. Загородников,[1] В. Зиракашвили,[10] А.Д. Иванова,[1,11] А.Л. Иванова,[1,2] М.А. Илюшин,[1] И.А. Кабанник,[2] Н.Н. Калмыков,[4] В.В. Киндин,[3] С.Н. Кирюхин,[1] В.А. Кожин,[4] Р.П. Кокоулин,[3] К.Г. Компаниец,[3] Е.Е. Коростелева,[4] Е.А. Кравченко,[2,8] А.П. Крюков,[4] Л.А. Кузьмичев,[4] А. Кьявасса,[12] М.В. Лаврова,[5] А.А. Лагутин,[6] Ю.Е. Лемешев,[1] Б.К. Лубсандоржиев,[7] Н.Б. Лубсандоржиев,[1,4] А. Луканов,[7] Р.Р. Миргазов,[1] Э.А. Окунева,[1,4] Э.А. Осипова,[4] А. Пан,[5] А.Д. Панов,[4] Л.В. Паньков,[1] А.Л. Пахоруков,[1] А.А. Петрухин,[3] Д.А. Подгрудков,[4] И. Поддубный,[1] Е.Г. Попова,[4] Е.Б. Постников,[4] В.В. Просин,[4] А.А. Пушнин,[1] Р.И. Райкин,[6] А.В. Разумов,[1,4] Г.И. Рубцов,[7] Е.В. Рябов,[1] А.К. Сагдеева,[1] В.С. Самолига,[1,2] И. Сатышев,[5] Л.Г. Свешникова,[4] А.Ю. Сидоренков,[7] А.А. Силаев,[4] А.А. Силаев (мл.),[4] А.В. Скурихин,[4] А.В. Соколов,[2,8] В.А. Таболенко,[1] А.Б. Танаев,[1] М.Ю. Терновой,[1] Л.Г. Ткачев,[5,9] Н.А. Ушаков,[7] Д.В. Чернов,[4] А. Шайковский,[5] И.И. Яшин[3]

[1] Иркутский государственный университет,
664003 Иркутск, Россия
[2] Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия
[3] Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия
[4] Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия
[5] Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская обл., Россия
[6] Алтайский государственный университет, 656049 Барнаул, Россия
[7] Институт ядерных исследований РАН,
117312 Москва, Россия
[8] Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
[9] Государственный университет „Дубна“,
141982 Дубна, Московская обл., Россия
[10] Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
108840 Троицк, Москва, Россия
[11] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
117303 Долгопрудный, Московская обл., Россия
[12] Dipartimento di Fisica Generale Universiteta di Torino and INFN,
Torino, Italy
e-mail: malakhov.sd@yandex.ru

Поступило в Редакцию 2 мая 2024 г.
В окончательной редакции 6 августа 2024 г.
Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Представлены результаты исследования барометрического эффекта на установке Tunka-Grande, являющейся частью астрофизического комплекса TAIGA и предназначенной для регистрации заряженной компоненты широких атмосферных ливней от космических лучей высоких и сверхвысоких энергий.

Ключевые слова: Tunka-Grande, космические лучи, широкие атмосферные ливни, барометрический коэффициент.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59248.346-24

Введение

Исследование первичных космических лучей (ПКЛ) высоких и сверхвысоких энергий представляет большой интерес с точки зрения понимания механизмов и природы их происхождения, что является одной из важнейших задач современной астрофизики. Регистрация излучения с энергией выше 1 PeV осуществляется при помощи

единственно возможного на данный момент метода, основанного на свойстве ПКЛ порождать каскады вторичных частиц в земной атмосфере — так называемые широкие атмосферные ливни (ШАЛ). В своей основе ШАЛ содержит электрон-фотонную, адронную, мюонную и нейтринную компоненты, а также является источником черенковского, ионизационного и радиочастотного излучений. Все эти составляющие, за исключением нейтрино, могут быть непосредственно зарегистрированы наземными установками, а их восстановленные характеристики использованы для определения свойств ПКЛ. В процессе своего развития компоненты ШАЛ испытывают различные вариации, обусловленные состоянием атмосферы. Наибольший вклад при этом вносит атмосферное давление. С экспериментальной точки зрения барометрический эффект проявляется в виде изменения плотности потока частиц ШАЛ, что в итоге приводит к неточной оценке характеристик ПКЛ [1].

В настоящей работе представлены результаты исследования барометрического эффекта на установке Tunka-Grande по экспериментальным данным, полученным в апреле 2022 г.

1. Эксперимент Tunka-Grande

Установка Tunka-Grande [2] входит в состав астрофизического комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy) [3], расположенного в 50 km от озера Байкал, и предназначена для исследования энергетического спектра и массового состава ПКЛ, а также поиска диффузного гамма-излучения при энергии выше 10 PeV. Установка работает с 2016 г. и представляет собой массив сцинтилляционных счетчиков, объединенных в 19 станций на площади $\sim 0.5\,\mathrm{km}^2$. Каждая станция состоит из двух частей: наземной и подземной. Первая включает в себя 12 счетчиков общей площадью $\sim 8\,\mathrm{m}^2$ и регистрирует все заряженные частицы ШАЛ на уровне наблюдения. Вторая содержит 8 счетчиков площадью $\sim 5\,\mathrm{m}^2$, расположена под слоем грунта и предназначена для выделения мюонной компоненты ШАЛ. Для изучения и учета влияния атмосферного давления и температуры окружающей среды на изменение темпа счета установки (количество зарегистрированных событий за единицу времени) в наземных частях двух станций дополнительно установлены метеостанции.

2. Барометрический коэффициент

На рис. 1 представлены графики среднечасовых значений темпа счета наземной части одной из станций установки Tunka-Grande, атмосферного давления и температуры окружающей среды в зависимости от времени. Экспериментальные данные набраны в апреле 2022 г. Хорошо видна антикорреляция темпа счета станции и

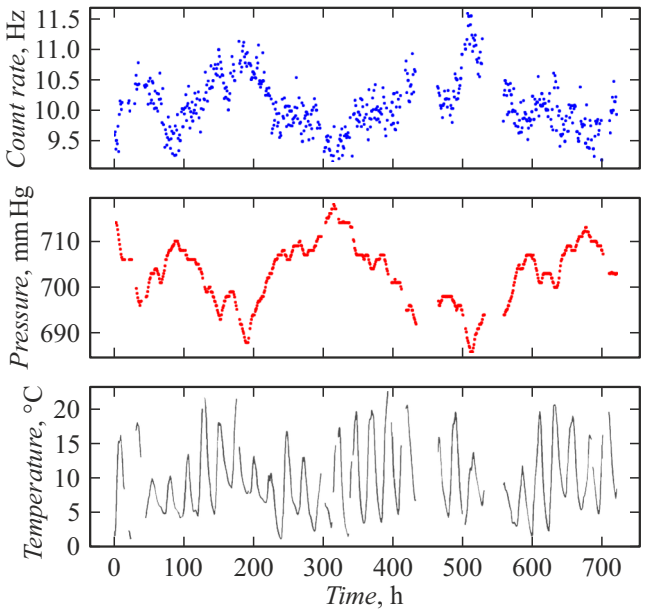


Рис. 1. Зависимости темпа счета станции, атмосферного давления и температуры окружающей среды от времени.

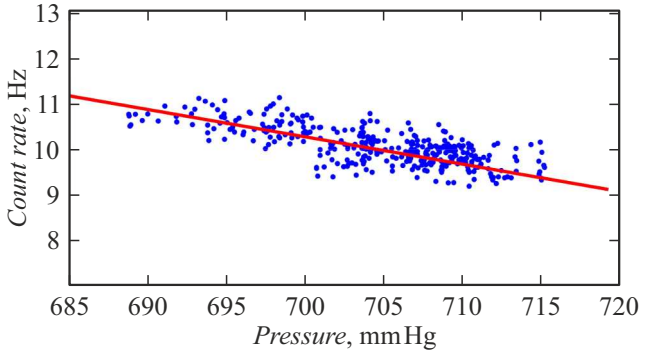


Рис. 2. Зависимость темпа счета станции от атмосферного давления. Красная линия — линейная аппроксимация.

давления, что подтверждает факт наличия барометрического эффекта. При этом минимизировано влияние температуры воздуха на вариации темпа счета. Следует отметить, что такое поведение характерно для всех станций установки.

На рис. 2 представлен график зависимости среднечасовых значений темпа счета станции от атмосферного давления по аналогичным экспериментальным данным, на основе которого рассчитан барометрический коэффициент [4]:

$$\beta = (k/f_0) \cdot 100\%,$$

где f_0 — значение среднего темпа счета за период наблюдений, k — показатель наклона аппроксимирующей функции вида

$$f(P) = k \cdot P + b.$$

После анализа экспериментальных данных получено значение $k = -0.0595 \pm 0.0002\,\mathrm{Hz/mm\,Hg}$ и

$f_0 = 10.1 \pm 0.032$ Hz. Таким образом, барометрический коэффициент $\beta \approx -0.589$ %/mm Hg.

3. Перспективы учета барометрического коэффициента при восстановлении параметров ШАЛ и ПКЛ

Для определения энергии ПКЛ по данным установки Tunka-Grande используется следующее выражение [2]:

$$\log(E/eV) = \log(\rho_{200}/(particle \cdot m^{-2})) \cdot 0.84 + 15.99,$$

где ρ_{200} — плотность восстановленного числа частиц на расстоянии 200 от оси ШАЛ.

С целью повышения точности измерений энергии ПКЛ необходимо ввести учет влияния атмосферного давления на мощность ШАЛ и соответственно погрешность определения параметра ρ_{200}. Для этого необходимо уточнить значения барометрического коэффициента, в том числе в зависимости от числа сработавших станций. В настоящее время для анализа доступны экспериментальные данные, набранные за 7 сезонов измерений ($\sim 12\,500$ h).

Заключение

По экспериментальным данным установки Tunka-Grande подтверждено наличие барометрического эффекта, связанного с процессом развития ШАЛ. Показано, что барометрический коэффициент для отдельных станций установки составляет 0.589 %/mm Hg. В дальнейшем предполагается учесть влияние атмосферного давления при обработке и анализе экспериментальных данных, что позволит улучшить точность восстановления параметров ШАЛ и ПКЛ.

Финансирование работы

Работа выполнена на базе УНУ „Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ“. Исследование поддержано Российским научным фондом (проект 23-72-00016 (раздел 3)), Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FZZE-2024-0005, FZZE-2023-0004, FSUS-2020-0039) и грантом Иркутского государственного университета для молодых ученых № (091-23-306) „Определение барометрического коэффициента установки Tunka-Grande“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] P.K.F. Grieder. *Extensive Air Showers High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects — A Tutorial, Reference Manual and Data Book* (Springer, Berlin, 2010), p. 256. DOI: 10.1007/978-3-540-76941-5

[2] Р.Д. Монхоев. Письма в ЭЧАЯ, 20 (5), 1117 (2023). DOI: 10.1134/S1547477123050552

[3] N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeekov, E. Bonvech, A. Borodin, A. Bulan, A. Chiavassa, D. Chernov, A. Dyachok, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, E. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, A.D. Ivanova, A.L. Ivanova, N. Kalmykov, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Komponiets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, M. Lavrova, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhiev, N. Lubsandorzhiev, A. Lukanov, D. Lukyantsev, S. Malakhov, R. Mirgazov, R. Monkhoev, E. Okuneva, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, L. Panasenko, L. Pankov, A.D. Panov, A. Petrukhin, I. Poddubny, D. Podgrudkov, V. Poleschuk, V. Ponomareva, E. Popova, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, A. Razumov, G. Rubtsov, E. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga, A. Silaev, A. Silaev Junior, A. Sidorenkov, A. Skurikhin, A. Sokolov, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, A. Tanaev, B. Tarashchansky, M.Y. Ternovoy, L. Tkachev, R. Togoo, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, N. Volkov, D. Voronin, A. Zagorodnikov, A. Zhaglova, D. Zhurov, I. Yashin. Nucl. Instrum. Meth. A, **1039**, 167047 (2022). DOI: 10.1016/j.nima.2022.167047

[4] К.Г. Компаниец. *Мюонный годоскоп УРАГАН*, автореф. канд. дис. (МИФИ (гос. ун-т), М., 2008)