

УДК 524.1:504.32

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ЭФФЕКТА НА РАДИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШАЛ

© 2019 г. А. А. Лагутин¹ *, Н. В. Волков¹, А. И. Гончаров¹, Т. Л. Серебрякова¹, Р. И. Райкин¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Алтайский государственный университет”, Барнаул, Россия

*E-mail: lagutin@theory.asu.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Исследуется чувствительность пространственного распределения электронной компоненты ШАЛ к вариациям температурного профиля атмосферы. Для решения задачи используется подход, основанный на развитой авторами вариационной теории чувствительности. Впервые получены коэффициенты дифференциальной чувствительности пространственного распределения электронной компоненты ШАЛ к вариациям температурного профиля атмосферы. Предложен метод коррекции показаний детекторов установки ШАЛ на температурный эффект.

DOI: 10.1134/S036767651908026X

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о химическом составе и происхождении (галактическое либо внегалактическое) космических лучей сверхвысоких ($E > 10^{15}$ эВ) и ультравысоких ($E > 10^{19}$ эВ) энергий относится к числу наиболее актуальных нерешенных вопросов современной астрофизики. Несмотря на значительный прогресс последних лет, связанный с развитием новых методов и техник интерпретации экспериментальных данных о широких атмосферных ливнях (ШАЛ), инициируемых частицами космических лучей в атмосфере Земли, полученные к настоящему времени результаты остаются неоднозначными во всей доступной для изучения методом ШАЛ области энергий (см., например, [1–6]).

Вместе с тем, прогноз относительно возможности решения указанной проблемы в ближайшие 10–15 лет благоприятен в связи с накоплением статистики и получением новых экспериментальных данных существующими (с учетом потенциала их модернизации) и новыми установками по регистрации различных компонент ШАЛ, в том числе располагающимися на территории нашей страны Якутской комплексной установкой ШАЛ [7] и обсерваторией TAIGA [8].

Извлечение информации о составе и спектре космических лучей по данным показаний приборов установки ШАЛ осложняется тем обстоятельством, что свойства атмосферы, в которой проис-

ходит развитие регистрируемых ядерно-каскадных процессов, не остаются постоянными. Экспериментальные данные для различных наблюдаемых ливней соответствуют различным реализациям среды.

Анализ показывает, что радиальное распределение электронов, порожденных каскадным процессом в атмосфере Земли, определяется характером распределения плотности воздуха ρ по высоте атмосферы или, в силу связи плотности с температурой $\rho(t) \sim 1/T(t)$, распределением температуры T по глубине атмосферы t . Вариации температурного профиля атмосферы меняют пространственное распределение плотности частиц.

Целью данной работы является применение разработанного авторами подхода к исследованию чувствительности пространственного распределения электронов ШАЛ к вариациям температурного профиля атмосферы, а также получение с его использованием новых результатов по температурным коэффициентам электронной компоненты ШАЛ.

ВАРИАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ШАЛ

При изучении влияния вариаций температурного профиля $\Delta T(t)$ атмосферы на характеристики ШАЛ задача разделяется на две: расчет функции пространственного распределения $\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))$

частиц ливня на уровне t , порожденного первичной частицей типа i с энергией E , при невозмущенном состоянии атмосферы $T(t)$ и нахождение чувствительности этого распределения $\Delta\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot) \rightarrow T(\cdot) + \Delta T(\cdot))$ к изменениям температурного профиля $T(t) \rightarrow T(t) + \Delta T(t)$. Переменная $T(\cdot)$ в аргументе этих функций отражает зависимость значения соответствующего функционала от всего профиля температуры атмосферы.

При известных функциях \bar{N}_i и $\Delta\bar{N}_i$ пространственные характеристики ШАЛ при некотором распределении температуры $T(t) + \Delta T(t)$ могут находиться с использованием равенства $\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot) + \Delta T(\cdot)) = \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot)) + \Delta\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot) \rightarrow T(\cdot) + \Delta T(\cdot))$.

Чувствительность пространственного распределения частиц ливня $\Delta\bar{N}_i$ к изменениям температурного профиля на уровнях атмосферы t_1 может быть представлена в виде [10]

$$\begin{aligned} \Delta\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot) \rightarrow T(\cdot) + \Delta T(\cdot)) &\approx \\ &\approx \int \frac{\delta\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))}{\delta T(t_1)} \Delta T(t_1) dt_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Используя (1), получаем, что для расчета пространственных характеристик ШАЛ в атмосфере, температурный профиль $T(t)$ которой изменяется на $\Delta T(t)$, достаточно знать пространственные характеристики ливня при некотором невозмущенном температурном профиле $\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))$ и коэффициенты дифференциальной чувствительности $\bar{N}_i^{(1)}(r, E, t; t_1, T(\cdot)) = \delta\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot)) / \delta T(t_1) dt_1$, вызванные вариациями температуры атмосферы на различных уровнях t_1 , т. е.

$$\begin{aligned} \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot) + \Delta T(\cdot)) &= \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot)) + \\ &+ \int \frac{\delta\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))}{\delta T(t_1)} \Delta T(t_1) dt_1. \end{aligned} \quad (2)$$

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭФФЕКТ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШАЛ

Для исследования температурного эффекта пространственного распределения электронной компоненты ШАЛ проведена модификация модуля НКГ (Нишимуры—Каматы—Грейзена) расчета радиального распределения электронов ШАЛ вычислительного комплекса CORSIKA v7.6400. В этих расчетах использовалась база данных температурных коэффициентов пространственного распределения электронов в электромагнитных каскадах, полученная авторами ранее путем решения сопряженных уравнений для вариацион-

ных производных распределений частиц в электронно-фотонных каскадах (ЭФК) [10–12].

Анализ уравнений для вариационных производных функции пространственного распределения (ФПР) электронов ЭФК и результатов выполненных тестовых расчетов показал, что в качестве базовой атмосферы при решении задач чувствительности ФПР частиц к вариациям температуры атмосферы удобно выбрать изотермическую атмосферу. Наличие аналитического представления плотности $\rho(t)$ для изотермической атмосферы, а также возможность контроля точности расчетов температурных коэффициентов по данным прямым расчетам пространственных характеристик каскада в атмосферах с различными температурами, позволяет провести расчеты дифференциальных температурных коэффициентов ФПР электронов широких атмосферных ливней $\bar{N}_i^{(1)}(r, E, t; t_1, T(\cdot))$ и нормированных температурных коэффициентов α_i^T ,

$$\alpha_i^T(r, E, t; t_1) = \frac{\bar{N}_i^{(1)}(r, E, t; t_1, T(\cdot))}{\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))}. \quad (3)$$

Расчеты были проведены для изотермической атмосферы с параметрами $T_0 = 293$ К и $\rho(0) = 1.22 \cdot 10^{-3}$ г·см⁻³. В данной работе переменная t отсчитывается от уровня наблюдения, в силу этого далее она не будет указываться в числе переменных функций.

Некоторые результаты расчетов температурных коэффициентов электронной компоненты ШАЛ, инициированных первичными протонами ($i = p$) и ядрами железа ($i = \text{Fe}$), показаны на рисунках 1 и 2. Анализ полученных результатов приводит к следующим выводам:

- изменение температуры на один градус в слое в одну радиационную единицу приводит к изменению ФПР на 0.2–0.6% при возмущениях атмосферы в приземном слое $t_1 \approx 0–0.03$ рад. ед. и 0.06% — для $t_1 \approx 4$ рад. ед.;

- увеличение температуры атмосферы приводит к уменьшению плотности частиц в области $r \leq (10–20)$ м и ее росту — при $r > 40$ м. В области $r \approx (20–40)$ м температурный эффект ФПР электронов минимален.

Для анализа влияния изменения температурного профиля атмосферы на пространственные характеристики были рассчитаны также интегральные температурные коэффициенты $\bar{\alpha}_i^T(r, E; t) = \int_0^t dt_1 \alpha_i^T(r, E; t_1)$. Коэффициенты $\bar{\alpha}_i^T$, имеющие размерность °С⁻¹, описывают относительное изменение характеристик ливня при изменении температуры на один градус на всех высотах атмосферы до уровня t' . Данные рас-

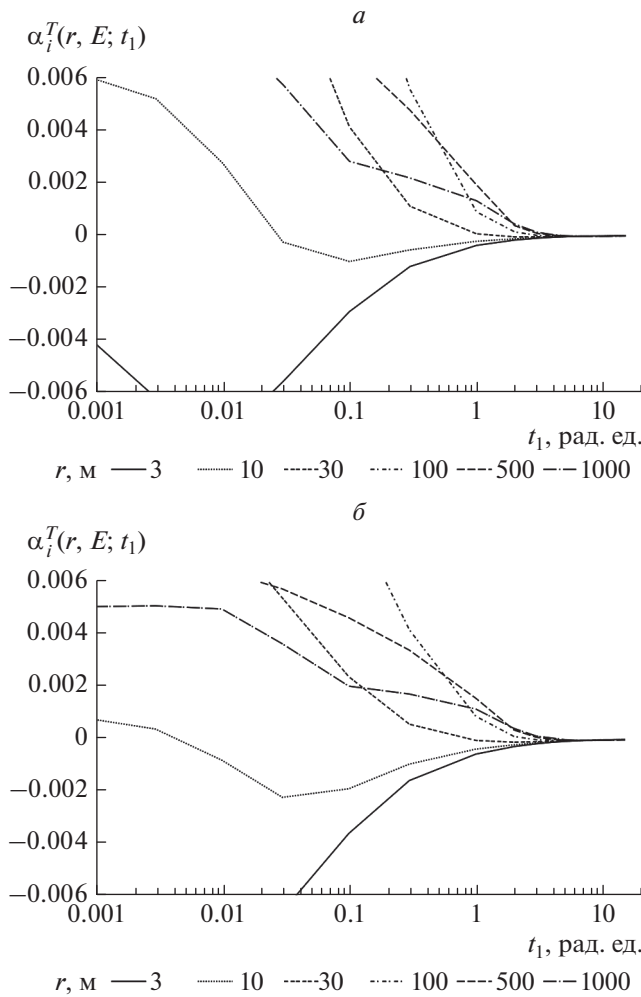


Рис. 1. Зависимость температурных коэффициентов электронной компоненты ШАЛ от уровня возмущения t_1 для разных расстояний от оси ливня для энергии первичной частицы $E = 10^9$ ГэВ. (а) ШАЛ инициированы первичными протонами ($i = p$), (б) — ядрами железа ($i = Fe$).

четов показали, что в области $r \geq 300$ м более 90% вклада в температурный эффект обусловлено вариациями температуры атмосферы в слое толщиной $\Delta t \sim 6-8$ рад. ед. над уровнем наблюдения.

МЕТОД КОРРЕКЦИИ ФПР ЭЛЕКТРОНОВ ШАЛ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭФФЕКТ

Анализ поведения температурных коэффициентов показал, что интеграл $\int_0^t \alpha_i^T(r, E; t_1) \Delta T(t_1) dt_1$, описывающий в линейном приближении изменение ФПР электронов при изменении температурного профиля $T(t_1) \rightarrow T(t_1) + \Delta T(t_1)$ в нижней тропосфе-

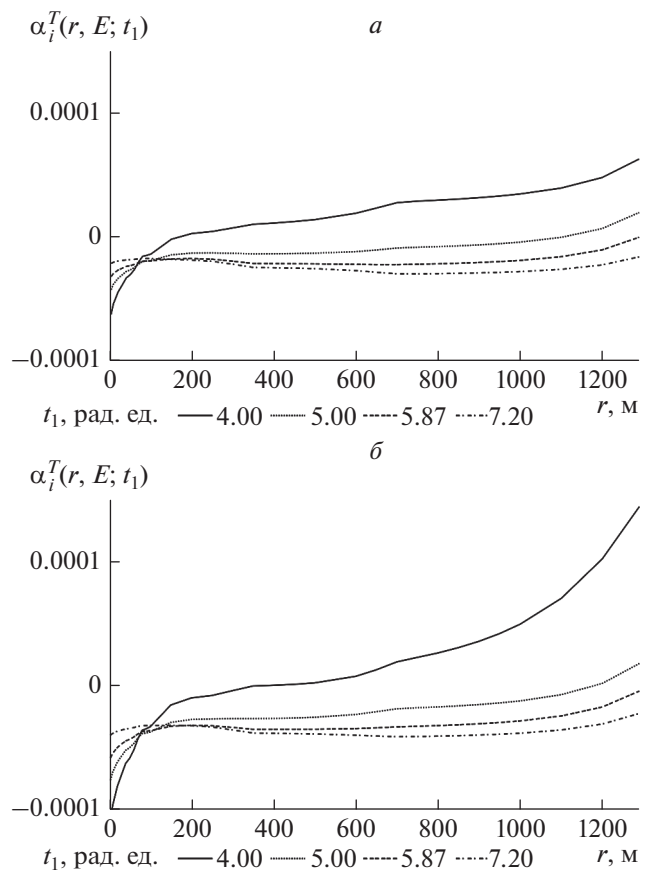


Рис. 2. Зависимость температурных коэффициентов электронной компоненты ШАЛ от расстояния до оси ливня при разных уровнях возмущения t_1 для энергии первичной частицы $E = 10^9$ ГэВ. (а) ШАЛ инициированы первичными протонами ($i = p$), (б) — ядрами железа ($i = Fe$).

ре в области $[0, t]$, при $t \sim 6-8$ рад. ед. может быть аппроксимирован произведением интегрального температурного коэффициента $\bar{\alpha}_i^T(r, E; t)$ на среднюю вариацию температуры $\Delta \bar{T} = \frac{1}{T} \int_0^t dt_1 \Delta T(t_1)$ в этом слое, т.е. может быть записан в виде

$$\int_0^t \alpha_i^T(r, E; t_1) \Delta T(t_1) dt_1 \approx \bar{\alpha}_i^T(r, E; t) \Delta \bar{T}. \quad (4)$$

Равенство (4) позволяет определить ФПР электронов $f(r, E, T(\cdot) + \Delta T(\cdot))$ в атмосфере с температурным профилем $T(t) + \Delta T(t)$ через ФПР в базовой изотермической атмосфере $f(r, E; T_0)$ следующим образом:

$$f(r, E; T(\cdot) + \Delta T(\cdot)) = f(r, E; T_0) [1 + \bar{\alpha}_f(r, E; t) \Delta \bar{T}]. \quad (5)$$

В частности, относительное изменение ФПР электронов на расстоянии $r = 600$ м в вертикальных ШАЛ от протонов энергии $10^6 - 10^8$ ГэВ дается соотношением

$$\frac{\Delta f_p(600, E; T(\cdot) \rightarrow T(\cdot) + \Delta T(\cdot))}{f_p(600, E; T_0)} = (2-4) \cdot 10^{-3} \overline{\Delta T}. \quad (6)$$

Поскольку вариации $\overline{\Delta T}$ в слое $\sim 6-8$ рад. ед. в районах расположения Якутской комплексной установки ШАЛ и обсерватории TAIGA достигают 30 К (см., например, [13]), изменения ФПР электронов могут превышать $\sim 10\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые получены коэффициенты дифференциальной чувствительности пространственного распределения электронной компоненты ШАЛ к вариациям температурного профиля атмосферы. Показано, что вариации пространственного распределения ШАЛ определяются, в основном, изменениями температуры атмосферы в слое $6-8$ рад. ед. над уровнем наблюдения.

Предложен метод коррекции показаний детекторов установки ШАЛ на температурный эффект. Показано, что изменения функции пространственного распределения электронной компоненты ШАЛ на уровне наблюдения в зонах расположения Якутской комплексной установки ШАЛ и обсерватории TAIGA, обусловленные вариациями температурного профиля атмосферы, могут превышать 10% .

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки РФ (государственное задание на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований, выполняемых в АлтГУ, проект № 3.5939.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Apel W.D., Arteaga-Velazquez J.C., Bekk K. et al. (KASCADE-Grande collaboration) // Phys. Rev. D. 2013. V. 87. Art. № 081101.*
2. *Buitink S., Corstanje A., Falcke H. et al. (LOFAR collaboration) // Nature. 2016. V. 531. P. 70.*
3. *Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al. (Pierre Auger collaboration) // Phys. Lett. B. 2016. V. 762. P. 288.*
4. *Settimo M. // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 718. Art. № 052037.*
5. *Abbasi R.U., Abe M., Abu-Zayyad T. et al. // Astropart. Phys. 2015. V. 64. P. 49.*
6. *Lagutin A.A., Volkov N.V., Tyumentsev A.G., Raikin R.I. // EPJ Web Conf. 2017. V. 145. Art. № 06004.*
7. *Дьяконов М.Н., Егоров Т.А., Ефимов Н.Н. и др. Космическое излучение предельно высокой энергии. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991.*
8. *Ivanov A.A. (Yakutsk array group) // EPJ Web Conf. 2013. V. 53. Art. № 04003.*
9. *Budnev N., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // JINST. 2017. V. 12. P. C08018.*
10. *Лагутин А.А., Учайкин В.В. Метод сопряженных уравнений в теории переноса космических лучей высоких энергий: монография. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2013.*
11. *Гончаров А.И., Лагутин А.А., Мелентьева В.В. Чувствительность пространственного распределения электронов в электронно-фотонных каскадах к вариациям температурного профиля атмосферы. Препринт АГУ; № 15. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2000.*
12. *Лагутин А.А., Гончаров А.И., Мелентьева В.В., Райкин Р.И. // Известия АлтГУ. 2008. Т. 57. № 1. С. 18.*
13. *Лагутин А.А., Мордвин Е.Ю., Волков Н.В., Макушев К.В. // Опт. атм. и океана. Физ. атм.: Матер. XXIII Междунар. симпозиума. (Иркутск, 2018). С. D57.*