

Научная статья

УДК 53.08 : 520.16

DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-03

Температурный эффект пространственного распределения электронной компоненты ШАЛ сцинтилляционных детекторов установки Тунка-Гранде

*Анатолий Алексеевич Лагутин¹, Николай Викторович Волков²,
Артёмий Игоревич Ревякин³*

¹Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, lagutin@theory.asu.ru

²Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, volkov@theory.asu.ru

³Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, artemy507@gmail.com

Original article

Temperature Effect of Spatial Distribution of EAS's Electron Component of the Tunka-Grande Scintillation Array

Anatoly A. Lagutin¹, Nikolay V. Volkov², Artemy I. Revyakin³

¹Altai State University, Barnaul, Russia, lagutin@theory.asu.ru

²Altai State University, Barnaul, Russia, volkov@theory.asu.ru

³Altai State University, Barnaul, Russia, artemy507@gmail.com

В работе обсуждается технология коррекции данных установки Тунка-Гранде на температурный эффект. Для температурной коррекции функции пространственного распределения (ФПР) плотности электронов широких атмосферных ливней используются данные, полученные в результате решения двух подзадач: непрерывного мониторинга температурного профиля атмосферы в зоне расположения установки, а также применения вычислительного комплекса, созданного авторами для приведения показаний приборов зарегистрированного Тунка-Гранде ливня к выбранной в качестве стандартной невозмущенной атмосфере. Первая задача решалась с использованием данных гиперспектрального комплекса AIRS/AMSU-ATMS спутников Aqua и NOAA, а также прогностических данных региональной модели погоды WRF. Для решения второй задачи использовались результаты теории чувствительности потоков космических лучей к вариациям характеристик атмосферы, созданной в Алтайском государственном университете.

Установлены вариации температурного профиля атмосферы в районе расположения обсерватории TAIGA в зимний период. Показано, что изменения ФПР электронов, вызванные этими вариациями, могут превышать ~10 %.

The paper discusses the technology for temperature correction of the Tunka-Grande scintillation array data. The temperature correction of the density spatial distribution function (SDF) of extensive air shower (EAS) electrons is performed using the data obtained from solving two following problems. The first one is the continuous monitoring of the atmosphere temperature profile in the area where the array is located. It is solved using the AIRS/AMSU-ATMS hyperspectral data from the Aqua and NOAA satellites, along with the calculated predictions of the WRF regional weather model. The second one is the computer complex created and developed by the authors to adjust the Tunka-Grande array readings of the registered EAS to the readings of the standard undisturbed atmosphere. The solution to this problem comes from the sensitivity theory (developed at the Altai State University) of cosmic ray fluxes to variations in atmospheric characteristics.

Atmosphere temperature profile variations at the TAIGA observatory location during winter are obtained. It is shown that changes of electron SDFs caused by these variations can exceed ~10 %.

Предложен метод введения поправок на температурный эффект, позволяющий привести показания сцинтилляционных детекторов Тунка-Гранде к выбранной в качестве стандартной невозмущенной атмосфере.

Ключевые слова: гамма-астрономия, обсерватория TAIGA, сцинтилляционная установка Тунка-Гранде, пространственное распределение электронов ШАЛ, температурный эффект, AIRS/AMSU-ATMS

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-72-00057).

Для цитирования: Лагутин А.А., Волков Н.В., Ревякин А.И. Температурный эффект пространственного распределения электронной компоненты ШАЛ сцинтилляционных детекторов установки Тунка-Гранде // Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 1 (135). С. 30–36. DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-03.

Введение

Исследования в области гамма-астрономии высоких энергий, проведенные в течение последних пяти лет, позволили получить принципиально новые революционные результаты. Одним из самых эффектных открытий в этой области, полученных методом широких атмосферных ливней (ШАЛ) [1, 2], стало обнаружение в космических лучах (КЛ) фотонов гамма-излучения с энергиями $E > 100$ ТэВ [3–7]. Существование гамма-квантов таких энергий свидетельствует о наличии в Галактике источников и механизмов ускорения частиц КЛ до ПэВ-ных энергий. Источники КЛ ПэВ-ных энергий называются пэватронами. Несмотря на многочисленные исследования реальных астрофизических объектов в Галактике и сотни зарегистрированных в наземных экспериментах событий с энергиями $E > 0,1$ ПэВ, однозначного ответа о природе пэватронов пока не получено [7].

В число крупнейших мировых коллабораций, работа которых направлена на поиск пэватронов, входит гамма-обсерватория TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) [8–11]. Обсерватория TAIGA расположена в Тункинской долине, в 50 км от озера Байкал. Комплекс включает пять основных независимых сегментов: две системы черенковских детекторов TAIGA-HiSCORE и Tunka-133, сцинтилляционная установка TAIGA-Muon, сеть оптических черенковских телескопов TAIGA-IACT и система сцинтилляционных детекторов Тунка-Гранде [8–11]. Установка Тунка-Гранде является основным сегментом обсерватории TAIGA, целью которого является исследование КЛ высоких энергий $E > 0,1$ ПэВ. Система детекторов Тунка-Гранде может восстанавливать энергию первичной частицы по плотности потока частиц ШАЛ на расстоянии 200 м от оси ливня. Однако получение несмещенной оценки энергии ливня, по откликам детекторов установки,

The proposed method of temperature correction helps adjust the Tunka-Grande array readings to the readings of the standard undisturbed atmosphere.

Keywords: gamma-astronomy, TAIGA observatory, Tunka-Grande scintillation array, spatial distribution of EAS electrons, temperature effect, AIRS/AMSU-ATMS

Funding: the work is supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-72-00057).

For citation: Lagutin A.A., Volkov N.V., Revyakin A.I. Temperature Effect of Spatial Distribution of EAS's Electron Component of the Tunka-Grande Scintillation Array. *Izvestiya of Altai State University*. 2024. No 1 (135). P. 30–36. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-03.

требуется учета реального состояния атмосферы в момент регистрации ШАЛ.

Целью работы является получение количественных оценок влияния вариаций температурного профиля атмосферы (температурный эффект) на пространственное распределение электронной компоненты ШАЛ, полученное по данным сцинтилляционных детекторов установки Тунка-Гранде, а также разработка метода коррекции данных установки Тунка-Гранде на температурный эффект.

1. Температурная коррекция ФПР электронов

Для температурной коррекции ФПР плотности частиц ШАЛ установки Тунка-Гранде требуются данные, которые должны быть получены в результате решения двух подзадач: первая — обеспечение постоянного мониторинга температурного профиля атмосферы в зоне расположения установки, вторая — создание вычислительного комплекса, который позволяет привести показания сцинтилляционных детекторов Тунка-Гранде зарегистрированного ливня к выбранной в качестве стандартной невозмущенной атмосфере.

Первая задача решалась с использованием данных гиперспектрального спутникового комплекса AIRS/AMSU, установленного на борту спутника Aqua [12], а также прогностических данных региональной модели погоды WRF [13]. Созданный NASA алгоритм совместной обработки данных ИК-зондировщика AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder) и микроволнового радиометра AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit) позволял, до выхода из строя AMSU-A в 2016 г., восстанавливать вертикальные профили температуры и влажности атмосферы при 80 % покрытия области наблюдения облаками. В нашей работе [14] предложен подход для восстановления «всепогодного» режима работы AIRS с использованием данных другого СВЧ-радиометра ATMS (Advanced Technology

Microwave Sounder) [15], установленного на спутниках Suomi-NPP, NOAA-20 и NOAA-21 [16].

Для решения второй задачи использовались результаты теории чувствительности потоков космических лучей к вариациям характеристик атмосферы, созданной в Алтайском государственном университете [17].

На данном этапе работ по созданию технологии оценки энергии ливня по откликам детекторов установки Тунка-Гранде в качестве стандартного профиля выбрана изотермическая атмосфера с параметрами $T_0 = 293$ К, $\rho(0) = 1.22 \cdot 10^{-3}$ г · см⁻³. Поскольку пере-

менная t отсчитывается от уровня наблюдения, далее она не будет указываться в числе переменных функций. В выражениях ниже переменная $T(\cdot)$ в аргументах функций отражает их зависимость от всего профиля температуры атмосферы.

Ранее нами было показано (см. [17, 18]), что в первом приближении теории чувствительности изменение функции пространственного распределения $\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))$ частиц ШАЛ на уровне t , порожденного первичной частицей типа i энергии E в невозмущенной атмосфере $T(\cdot)$, при изменении температурного профиля $T(\cdot) \rightarrow T(\cdot) + \Delta T(\cdot)$ имеет вид:

$$\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot) + \Delta T(\cdot)) - \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot)) = \int \frac{\delta \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))}{\delta T(t_1)} \Delta T(t_1) dt_1. \quad (1)$$

Поскольку отношение $\alpha_i^T(r, E, t; t_1) = \frac{1}{\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))} \frac{\delta \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))}{\delta T(t_1)}$ есть нормализованный температурный коэффициент [17], то уравнение (1) может быть записано в виде:

$$\frac{\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot) + \Delta T(\cdot)) - \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))}{\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))} = \int \alpha_i^T(r, E, t; t_1) \Delta T(t_1) dt_1. \quad (2)$$

Численный анализ влияния вариаций температуры атмосферы на относительное изменение пространственной плотности электронной компоненты ШАЛ, которые описываются равенством (2), был проведен с использованием модификаций модуля НКГ пакета CORSIKA [19]. Ключевыми элементами модернизированной версии вычислительного комплекса CORSIKA является использование разработанного в [20, 21] скейлингового формализма для описания пространственного распределения электронов в парциальных электронно-фотонных каскадах, формирующих электронную компоненту ШАЛ, а также опция расчета коэффициентов чувствительности $\delta \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot)) / \delta T(t_1)$ (см. работы [17, 18]).

Таким образом, проведенная модификация модуля НКГ расчета радиального распределения электронов ШАЛ вычислительного комплекса CORSIKA позволила описать не только пространственное распределение электронной компоненты в парциальных электронно-фотонных каскадах от гамма-квантов, формирующих электронную компоненту ШАЛ, но и их вариационные производные, т.е. дифференциальные температурные коэффициенты.

2. Метод коррекции данных установки Тунка-Гранде на температурный эффект

Анализ поведения температурных коэффициентов $\alpha_i^T(r, E, t; t_1)$ показал, что интеграл в (2), описывающий в линейном приближении изменение ФПР электронов при изменении температурного профиля $T(\cdot) \rightarrow T(\cdot) + \Delta T(\cdot)$ в нижней тропосфере в области $[0, t]$

($t \approx (6 - 8)$ рад. ед.), может быть аппроксимирован произведением интегрального температурного коэффициента $\bar{\alpha}_i^T(r, E; t)$ на среднюю вариацию температуры $\Delta \bar{T}$ в этом слое, т.е. может быть записан в виде:

$$\int_0^t \alpha_i^T(r, E; t_1) \Delta T(t_1) dt_1 \approx \bar{\alpha}_i^T(r, E; t) \Delta \bar{T}, \quad (3)$$

где $\Delta \bar{T} = \frac{1}{T} \int_0^t dt_1(r, E; t) \Delta T$.

Результаты расчетов точных и приближенных поправок подтверждают справедливость равенства (3) и, таким образом, приближенного описания температурного эффекта

$$\frac{\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot) + \Delta T(\cdot)) - \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))}{\bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot))} = \bar{\alpha}_i^T(r, E; t) \Delta \bar{T}. \quad (4)$$

Равенство (4) позволяет предложить новый метод введения поправок на температурный эффект, основанный на результатах теоретических расчетов интегральных температурных коэффициентов $\bar{\alpha}_i^T(r, E; t)$ и экспериментальных данных по средней температуре в слое $t \sim (6 - 8)$ рад. ед. над уровнем наблюдения. В частности, относительное изменение ФПР электронов на расстоянии $r = 200$ м в вертикальных ШАЛ от протонов p энергии $(10^6 - 10^8)$ ГэВ дается соотношением:

$$\frac{\Delta \bar{N}_p(200, E; T(\cdot) \rightarrow T(\cdot) + \Delta T(\cdot))}{\bar{N}_p(200, E; T_0)} = (1 \div 3) \cdot 10^{-3} \Delta \bar{T}.$$

Поскольку вариации $\Delta \bar{T}$ в слое $t \sim (6 - 8)$ рад. ед. в районе расположения обсерватории TAIGA в зимний период достигают 35 К, изменения ФПР электронов могут превышать $\sim 10\%$.

Предложенный метод введения поправок на температурный эффект позволяет привести показания детекторов Тунка-Гранде к выбранной в качестве стандартной невозмущенной атмосфере.

3. Температурный эффект электромагнитной компоненты ШАЛ, измеряемой сцинтилляционными детекторами

Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что пространственное распределение плотности частиц, измеренное сцинтилляционным детектором, отличается от ФПР электронов [22]. Причиной этого различия является взаимодействие электронов и фотонов каскада со сцинтиллятором и контейнером детектора, в котором он находится.

Для анализа влияния детектора на ФПР электронов ЭФК в наших работах (см., например, [23, 24]) были проведены расчеты пространственного распределения энерговыделения в сцинтилляционных детекторах. Было установлено, что измеряемое сцинтилляционными детектором пространственное распределение плотности частиц $\bar{N}_{si}(r, E, t; T(\cdot))$ хорошо описывается соотношением

$$\bar{N}_{si}(r, E, t; T(\cdot)) = K_s(r, E) \bar{N}_i(r, E, t; T(\cdot)), \quad (5)$$

где $K_s(r, E)$ — корректирующая функция, значения которой установлены численно, $\bar{N}_i(r, E, T(\cdot))$ — ФПР электронов в ШАЛ от первичной частицы типа i .

Действуя на (5) оператором $\delta/\delta T(t_i)$, можно получить выражение для коэффициента дифференциальной чувствительности пространственного распределения плотности частиц, измеряемого сцинтилляционными детекторами. Поскольку температурные вариации несущественно влияют на энергетический спектр частиц, достигающих детектор на уровне наблюдения, и, следовательно, на их энерговыделение в детекторах, находим, что

$$\bar{N}_{si}(r, E; T(\cdot)) = K_s(r, E) \bar{N}_i(r, E; T(\cdot)). \quad (6)$$

Нормированный температурный коэффициент тогда равен

$$\alpha_{si}^T(r, E, t_1) = \bar{N}_{si}^{(1)}(r, E, t_1; T(\cdot)) / \bar{N}_{si}(r, E; T(\cdot)). \quad (7)$$

Из выражений (5)–(7) следует, что нормированный температурный коэффициент пространственного распределения плотности частиц, измеряемого сцинтилляционными детекторами $\alpha_{si}^T(r, E, t_1)$, равен нормированному температурному коэффициенту пространственного распределения электронов $\alpha_i^T(r, E, t_1)$.

4. Результаты

Основные результаты, полученные в работе, заключаются в следующем.

1. По данным спутникового мониторинга установлено, что вариации температурного профиля в слое атмосферы $t \sim (6 - 8)$ рад. ед. в районе расположения обсерватории TAIGA в зимний период достигают 35 К. В силу этого изменения ФПР электронов могут превышать $\sim 10\%$.

2. Показано, что предлагаемый метод введения поправок на температурный эффект позволяет привести показания сцинтилляционных детекторов Тунка-Гранде к выбранной в качестве стандартной невозмущенной атмосфере.

3. Показано, что нормированный температурный коэффициент пространственного распределения плотности частиц, измеряемого сцинтилляционными детекторами, равен нормированному температурному коэффициенту пространственного распределения электронов.

Заключение

В работе проведено исследование температурного эффекта пространственного распределения электронной компоненты ШАЛ сцинтилляционных детекторов установки Тунка-Гранде. В основе технологии коррекции данных установки на температурный эффект лежат результаты теории чувствительности потоков космических лучей к вариациям характеристик атмосферы, созданной в Алтайском государственном университете, а также данные дистанционного зондирования Земли, полученные в Центре космического мониторинга АлтГУ.

Библиографический список

1. Abbasi R.U., Abe M., Abu-Zayyad T., et al. Study of Ultra-High Energy Cosmic Ray Composition using Telescope Array's Middle Drum Detector and Surface Array in Hybrid Mode // *Astroparticle Physics*. 2015. Vol. 64. P. 49–62. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2014.11.004
2. Aab A., Abreu P., Aglietta M., et al. (Pierre Auger Collaboration) Evidence for a Mixed Mass Composition at the 'Ankle' in the Cosmic-Ray Spectrum // *Physics Letters B*. 2016. Vol. 762. P. 288–295. DOI: 10.1016/j.physletb.2016.09.039
3. Amenomori M., Bao Y.W., Bi X., et al. (Tibet AS_y Collaboration). First Detection of Photons with Energy beyond 100 TeV from an Astrophysical Source // *Physical Review Letters*. 2019. Vol. 123. Art. No 051101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.051101

4. Abeyssekara A.U., Albert A., Alfaro R., et al. (HAWC Collaboration) Multiple Galactic Sources with Emission above 56 TeV Detected by HAWC // *Physical Review Letters*. 2020. Vol. 124. Art.No 021102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.021102
5. Abeyssekara A.U., Albert A., Alfaro R., et al. (HAWC Collaboration) HAWC Observations of the Acceleration of Very-High-Energy Cosmic Rays in the Cygnus Cocoon // *Nature Astronomy*. 2021. Vol. 5. P. 465–471. DOI: 10.1038/s41550-021-01318-y
6. Amenomori M., Bao Y.W., Bi X., et al. (Tibet AS_γ Collaboration). Potential PeVatron Supernova Remnant G106.3+2.7 seen in the Highest-Energy Gamma Rays // *Nature Astronomy*. 2021. Vol. 5. P. 460–464. DOI: 10.1038/s41550-020-01294-9
7. Cao Z., Aharonian F.A., An Q., et al. Ultrahigh-energy Photons up to 1.4 Petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic Sources // *Nature*. 2021. Vol. 594. P. 33–36. DOI: 10.1038/s41586-021-03498-z
8. Budnev N., Astapov I., Bezyazeev P. (TAIGA Experiment) TAIGA — A Hybrid Array for High Energy Gamma-ray Astronomy and Cosmic-ray Physics // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2022. Vol. 1039. Art. No 167047. DOI: 10.1016/j.nima.2022.167047
9. Astapov I.I., Bezyazeev P.A., Blank M. (TAIGA Experiment) Cosmic-Ray Research at the TAIGA Astrophysical Facility: Results and Plans // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2022. Vol. 134. No 4. P. 469–478. DOI: 10.1134/S1063776122040136
10. Astapov I., Bezyazeev P., Bonvech E., et al. (TAIGA Experiment). The TAIGA — a Hybrid Detector Complex in Tunka Valley for Astroparticle Physics, Cosmic Ray Physics and Gamma-Ray Astronomy // *Physics of Atomic Nuclei*. 2023. Vol. 86. No 4. P. 471–477. DOI: 10.1134/S1063778823040051
11. Ivanova A.L., Astapov I., Bezyazeev P. (TAIGA Experiment). Scintillation Experiment on the Study of Cosmic Rays and Gamma Fluxes in the Tunka Valley // *Physics of Atomic Nuclei*. 2023. Vol. 86. No 4. P. 478–482. DOI: 10.1134/S1063778823040221
12. Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C., et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: Design, Science Objectives, Data Products, and Processing Systems // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003. Vol. 41. P. 253–264. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808356
13. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 4 // *NCAR Tech. Note*. 2019. 145 p. DOI: 10.5065/1dfh-6p97
14. Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V., Revyakin A.I. Restoration of the All-Weather Mode of the AIRS/AMSU Hyperspectral System of the AQUA Satellite Using the ATMS Microwave Radiometer of the SUOMI-NPP and NOAA-20 Satellites // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2022. Vol. 58. No 2. P. 180–187. DOI: 10.3103/S8756699022020066
15. Weng F., Zou X., Sun N., et al. Calibration of Suomi National Polar-orbiting Partnership Advanced Technology Microwave Sounder // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. Vol. 118. No 11. P. 11187–11200. DOI: 10.1002/jgrd.50840
16. Goldberg M.D., Kilcoyne H., Cikanek H., Mehta A. Joint Polar Satellite System: The United States Next Generation Civilian Polar-orbiting Environmental Satellite System // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. Vol. 118. Issue 24. P. 13463–13475. DOI: 10.1002/2013JD020389
17. Лагутин А.А., Учайкин В.В. Метод сопряженных уравнений в теории переноса космических лучей высоких энергий : монография. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2013. 293 с.
18. Lagutin A.A., Goncharov A.I., Raikin R.I., et al. Atmospheric Effects of Electron and Muon Components of Cosmic Rays: Sensitivity Theory Approach and Data of Operational Satellite Monitoring // *Physics of Atomic Nuclei*. 2021. Vol. 84. No 6. P. 1150–1158. DOI: 10.1134/S1063778821130196
19. Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N., Schatz G., Thouw T. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. Technical Report. Karlsruhe. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. 1998. 90 p.
20. Lagutin A.A., Raikin R.I., Inoue N., Misaki A. Electron Lateral Distribution in Air Showers: Scaling Formalism and its Implications // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. 2002. Vol. 28. P. 1259–1274. DOI: 10.1088/0954-3899/28/6/309
21. Lagutin A.A., Raikin R.I., Serebryakova T.L. Air Shower Universality in the Energy Range of 10^{14} to 10^{22} eV // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics*. 2013. Vol. 77. No 5. P. 623–625. DOI: 10.3103/S1062873813050353
22. Apel W.D., Badea A.F., Bekk K., et al. Comparison of Measured and Simulated Lateral Distributions for Electrons and Muons with KASCADE // *Astroparticle Physics*. 2006. Vol. 24. P. 467–483. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2005.10.001
23. Lagutin A.A., Plyashnikov A.V., Goncharov A.I. The Lateral Distribution of the Electrons in the Electromagnetic Air Shower // *Nuclear Physics B — Proceedings Supplements*. 1998. Vol. 60. P. 161–167. DOI: 10.1016/S0920-5632(97)00511-2
24. Lagutin A.A., Plyashnikov A.V., Melentyeva V.V., et al. Lateral Distribution of Electrons in Air Showers // *Nuclear Physics B — Proceedings Supplements*. 1999. Vol. 75A. P. 290–292. DOI: 10.1016/S0920-5632(99)00269-8

References

1. Abbasi R.U., Abe M., Abu-Zayyad T., et al. Study of Ultra-High Energy Cosmic Ray Composition using Telescope Array's Middle Drum Detector and Surface Array in Hybrid Mode. *Astroparticle Physics*. 2015. Vol. 64. P. 49–62. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2014.11.004
2. Aab A., Abreu P., Aglietta M., et al. (Pierre Auger Collaboration) Evidence for a mixed mass composition at the 'ankle' in the cosmic-ray spectrum. *Physics Letters B*. 2016. Vol. 762. P. 288–295. DOI: 10.1016/j.physletb.2016.09.039

3. Amenomori M., Bao Y.W., Bi X., et al. (Tibet AS_γ Collaboration). First Detection of Photons with Energy beyond 100 TeV from an Astrophysical Source. *Physical Review Letters*. 2019. Vol. 123. Art. No 051101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.051101
4. Abeysekara A.U., Albert A. Alfaro R., et al. (HAWC Collaboration) Multiple Galactic Sources with Emission above 56 TeV Detected by HAWC. *Physical Review Letters*. 2020. Vol. 124. Art. No 021102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.021102
5. Abeysekara A.U., Albert A. Alfaro R., et al. (HAWC Collaboration) HAWC Observations of the Acceleration of Very-High-Energy Cosmic Rays in the Cygnus Cocoon. *Nature Astronomy*. 2021. Vol. 5. P. 465–471. DOI: 10.1038/s41550-021-01318-y
6. Amenomori M., Bao Y.W., Bi X., et al. (Tibet AS_γ Collaboration). Potential PeVatron Supernova Remnant G106.3+2.7 Seen in the Highest-Energy Gamma Rays. *Nature Astronomy*. 2021. Vol. 5. P. 460–464. DOI: 10.1038/s41550-020-01294-9
7. Cao Z., Aharonian F.A., An Q., et al. Ultrahigh-Energy Photons up to 1.4 Petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic Sources. *Nature*. 2021. Vol. 594. P. 33–36. DOI: 10.1038/s41586-021-03498-z
8. Budnev N., Astapov I., Bezyazeev P. (TAIGA Experiment) TAIGA — A Hybrid Array for High Energy Gamma-ray Astronomy and Cosmic-ray Physics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2022. Vol. 1039. Art. No 167047. DOI: 10.1016/j.nima.2022.167047
9. Astapov I.I., Bezyazeev P.A., Blank M. (TAIGA Experiment) Cosmic-Ray Research at the TAIGA Astrophysical Facility: Results and Plans. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2022. Vol. 134. No 4. P. 469–478. DOI: 10.1134/S1063776122040136
10. Astapov I., Bezyazeev P., Bonvech E., et al. (TAIGA Experiment). The TAIGA — a Hybrid Detector Complex in Tunka Valley for Astroparticle Physics, Cosmic Ray Physics and Gamma-Ray Astronomy. *Physics of Atomic Nuclei*. 2023. Vol. 86. No 4. P. 471–477. DOI: 10.1134/S1063778823040051
11. Ivanova A.L., Astapov I., Bezyazeev P. (TAIGA Experiment). Scintillation Experiment on the Study of Cosmic Rays and Gamma Fluxes in the Tunka Valley. *Physics of Atomic Nuclei*. 2023. Vol. 86. No 4. P. 478–482. DOI: 10.1134/S1063778823040221
12. Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C., et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: Design, Science Objectives, Data Products, and Processing Systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003. Vol. 41. P. 253–264. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808356
13. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 4. *NCAR Tech. Note*. 2019. 145 p. DOI: 10.5065/1dfh-6p97
14. Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V., Revyakin A.I. Restoration of the All-Weather Mode of the AIRS/AMSU Hyperspectral System of the AQUA Satellite Using the ATMS Microwave Radiometer of the SUOMI-NPP and NOAA-20 Satellites. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2022. Vol. 58. No 2. P. 180–187. DOI: 10.3103/S8756699022020066
15. Weng F., Zou X., Sun N., et al. Calibration of Suomi National Polar-Orbiting Partnership Advanced Technology Micro-wave Sounder. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. Vol. 118. No 11. P. 11187–11200. DOI: 10.1002/jgrd.50840
16. Goldberg M.D., Kilcoyne H., Cikanek H., Mehta A. Joint Polar Satellite System: The United States Next Generation Civilian Polar-orbiting Environmental Satellite System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. Vol. 118. Issue 24. P. 13463–13475. DOI: 10.1002/2013JD020389
17. Lagutin A.A., Uchaikin V.V. *Adjoint Method in the Theory of Transport of High-Energy Cosmic Rays*. Barnaul: Altai State University Press, 2013. 293 p. (In Russ.)
18. Lagutin A.A., Goncharov A.I., Raikin R.I., et al. Atmospheric Effects of Electron and Muon Components of Cosmic Rays: Sensitivity Theory Approach and Data of Operational Satellite Monitoring. *Physics of Atomic Nuclei*. 2021. Vol. 84. No 6. P. 1150–1158. DOI: 10.1134/S1063778821130196
19. Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N., Schatz G., Thouw T. *CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. Technical Report*. Karlsruhe. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1998. 90 p.
20. Lagutin A.A., Raikin R.I., Inoue N., Misaki A. Electron Lateral Distribution in Air Showers: Scaling Formalism and its Implications. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. 2002. Vol. 28. P. 1259–1274. DOI: 10.1088/0954-3899/28/6/309
21. Lagutin A.A., Raikin R.I., Serebryakova T.L. Air Shower Universality in the Energy Range of 10^{14} to 10^{22} eV. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics*. 2013. Vol. 77. No 5. P. 623–625. DOI: 10.3103/S1062873813050353
22. Apel W.D., Badea A.F., Bekk K., et al. Comparison of Measured and Simulated Lateral Distributions for Electrons and Muons with KASCADE. *Astroparticle Physics*. 2006. Vol. 24. P. 467–483. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2005.10.001
23. Lagutin A.A., Plyasheshnikov A.V., Goncharov A.I. The Lateral Distribution of the Electrons in the Electromagnetic Air Shower. *Nuclear Physics B — Proceedings Supplements*. 1998. Vol. 60. P. 161–167. DOI: 10.1016/S0920-5632(97)00511-2
24. Lagutin A.A., Plyasheshnikov A.V., Melentyeva V.V., et al. Lateral Distribution of Electrons in Air Showers. *Nuclear Physics B — Proceedings Supplements*. 1999. Vol. 75A. P. 290–292. DOI: 10.1016/S0920-5632(99)00269-8

Информация об авторах

А.А. Лагутин, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и теоретической физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

Н.В. Волков, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики и теоретической физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

А.И. Ревякин, аспирант кафедры радиофизики и теоретической физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия.

Information about the authors

A.A. Lagutin, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Radiophysics and Theoretical Physics Department, Altai State University, Barnaul, Russia;

N.V. Volkov, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Associate Professor at the Radiophysics and Theoretical Physics Department, Altai State University, Barnaul, Russia;

A.I. Revyakin, Postgraduate Student of the Radiophysics and Theoretical Physics Department, Altai State University, Barnaul, Russia.