

УДК 524.1

## ИЗМЕРЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С ОРБИТЫ ЗЕМЛИ: ОТ ПРОЕКТА “ТУС” К К-EUSO И ДАЛЕЕ

© 2021 г. П. А. Климов<sup>1, \*</sup>, М. И. Панасюк<sup>1, 2</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

\*E-mail: pavrel.klimov@gmail.com

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Описан проект К-EUSO, разрабатываемый в коллаборации JEM-EUSO для установки на борту Международной космической станции. При его подготовке успешно реализован ряд технологических проектов: баллонные эксперименты EUSO-Balloon и EUSO-SPB1, телескоп в составе установки Telescope Array (EUSO-TA). С 2019 г. на борту Российского сегмента МКС работает широкоугольный детектор “УФ атмосфера” (Mini-EUSO). После К-EUSO планируется реализация еще более грандиозного эксперимента РОЕММА (probe of extreme multi-messenger astrophysics), нацеленного как на регистрацию КЛ ПВЭ, так и нейтрино высоких энергий.

DOI: 10.31857/S0367676521040189

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее актуальных проблем современной астрофизики является происхождение и природа космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ,  $E > 50 \text{ ЭэВ} = 5 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$ ). Между результатами основных проводимых в настоящее время экспериментов существуют определенные противоречия. В частности, последние результаты коллабораций РАО (Pierre Auger Observatory) и ТА (Telescope Array) [1] показывают, что формы энергетических спектров, полученных в обоих экспериментах, аналогичны друг другу, однако резкое изменение характера спектра по данным РАО начинается существенно раньше, и при этом спектр РАО становится настолько круче, чем спектр ТА, что поток КЛ ПВЭ по данным ТА примерно в 4 раза превышает поток, регистрируемый на установке РАО.

Более того, вследствие своего географического положения эксперименты ТА и РАО наблюдают преимущественно разные части небесной сферы с пересечением в узкой полосе, которая находится на периферии полей зрения обеих установок.

Международная коллаборация JEM-EUSO реализует программу по созданию орбитальной обсерватории космических лучей предельно высоких энергий. Регистрация частиц происходит по

средствам измерения флуоресцентного свечения широкого атмосферного ливня (ШАЛ). Эта методика была предложена еще в 1980 г. Дж. Линсли [2], затем развивалась в рамках проектов MASS [3], OWL [4] и EUSO [5], а впервые реализована в проекте “ТУС” [6]. Орбитальный детектор позволяет достичь максимальной экспозиции регистрации и равномерного обзора всей небесной сферы одним прибором.

Ввиду масштабности проекта на пути его осуществления был разработан и разрабатывается ряд прототипов: EUSO-TA [7], EUSO-balloon [8], EUSO-SPB1 [9] и др. На рис. 1 показана программа экспериментов коллаборации.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕТЕКТОРА ТУС

В 2016–2017 гг. в составе научной аппаратуры спутника “Ломоносов” работал первый в мире орбитальный детектор космических лучей предельно высоких энергий “ТУС” [6]. Детектор “ТУС” – зеркальный телескоп, с площадью оптической системы  $\sim 2 \text{ м}^2$  и матрицей фотоприемника из 256 каналов. Временное разрешение прибора 0.8 мкс, пространственное – 5 км, а площадь обзора на поверхности земли  $80 \times 80 \text{ км}^2$ . Несмотря на относительно низкое пространственное

разрешение, сравнительно малое поле зрения, за время своей работы “ТУС” зарегистрировал почти 80 тыс. разнообразных событий [10, 11]. Детектором “ТУС” измерен ряд УФ вспышек с пространственно-временной структурой, ожидаемой от ШАЛ, которые порождаются КЛ ПВЭ [12]. Большая часть вспышек регистрируется в густонаселенных районах, вблизи аэропортов. Наиболее интересная, описанная в работе [12], зарегистрирована также над территорией США, но вдали от наземных источников излучения, гроз и облачного покрова. На спутнике “Ломоносов” проведено детальное изучение транзитного УФ свечения атмосферы, на фоне которого происходит регистрация ШАЛ. Зарегистрированы многочисленные молниевые разряды, высотные атмосферные явления типа ELVES, антропогенные источники свечений, пульсирующие полярные сияния, метеоры и пр. [13, 14].

### ПРОЕКТ УФ АТМОСФЕРА (MINI-EUSO)

Вторым прототипом, работающим с 2019 г. на борту МКС является эксперимент “УФ атмосфера” (Mini-EUSO) [15]. “УФ атмосфера” – это широкоугольная двухлинзовая оптическая камера с высоким временным разрешением (2.5 мкс) и площадью входного окна 490 см<sup>2</sup>. В ней используются и оптическая схема, и элементы электроники K-EUSO, тем самым осуществляя летную квалификацию и историю эксплуатации на МКС составных частей будущего телескопа КЛ ПВЭ. Прибор успешно проработал 26 сеансов на борту МКС на момент написания статьи. Проведена регистрация медленных вариаций УФ свечения: облачного покрова и антропогенных источников, молниевых разрядов и транзитных высоко атмосферных явлений грозового происхождения и метеоров (более 1000). Зарегистрирован ряд необычных УФ вспышек длительностью около 150 мкс, природа которых не ясна на данный момент.

### ТЕЛЕСКОП КЛПВЭ (K-EUSO) НА БОРТУ МКС

Основной задачей коллаборации JEM-EUSO является создание крупногабаритного телескопа, с порогом регистрации в области энергий ГЗК (Грейзена–Зацепина–Кузьмина) -обрезания и количеством регистрируемых частиц порядка 100 в год. Разрабатывается телескоп “КЛПВЭ” (или K-EUSO) для установки на борт Международной космической станции. K-EUSO должен обеспечивать регистрацию треков частиц КЛ ПВЭ на площади observable атмосферы Земли порядка 10<sup>4</sup> км [16, 17]. На данный момент, с целью оптимизации масс-габаритных характеристик детектора, удобства доставки и монтажа на борту РС МКС коллаборацией JEM-EUSO прорабатывается двухлинзовый вариант телескопа с площа-

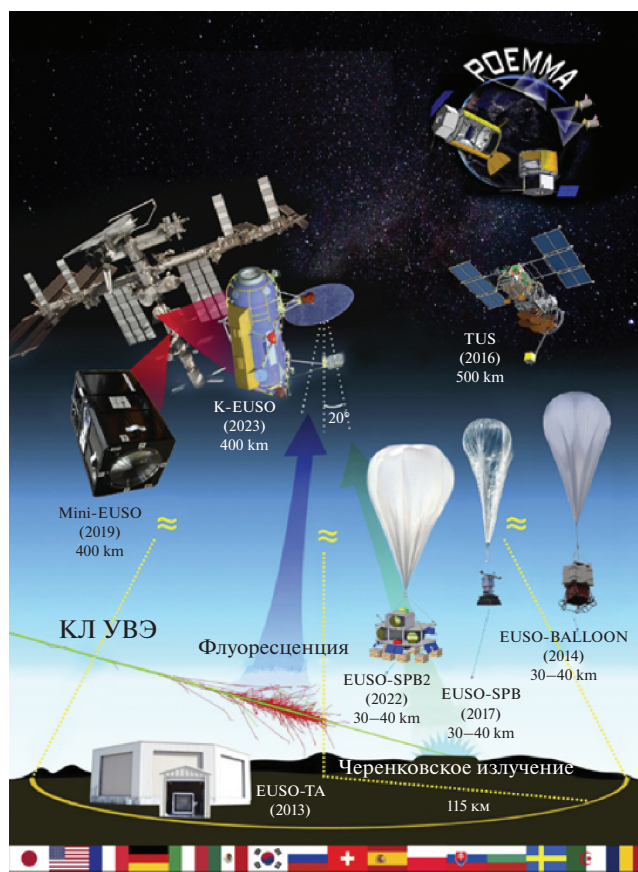


Рис. 1. Программа экспериментов коллаборации JEM-EUSO.

дью входного окна 3 м<sup>2</sup>. Первая линза является двусторонней линзой Френеля, на второй передняя поверхность – френелевская, а задняя – дифракционная. Это обеспечивает качественную фокусировку во всем поле зрения прибора (40°). В составе фотоприемной поверхности порядка 10<sup>5</sup> каналов с полем зрения 600 × 600 м каждый и временным разрешением 2.5 мкс. Фотоприемник выполнен в виде модульной структуры, организованной по сетевому принципу [18]. Каждый модуль имеет 2304 канала и свою систему сбора и анализа данных. Комплекс аппаратуры K-EUSO планируется к запуску в 2024 г. Проект позволит провести измерение энергетического спектра КЛ ПВЭ по всей небесной сфере и установить причины разногласий в данных ведущих современных экспериментов Telescope Array и Pierre Auger Observatory, исследовать анизотропию КЛ ПВЭ на разных масштабах (от поиска источников до крупномасштабной анизотропии).

### EUSO-SPB2 И РОЕММА

Одновременно с K-EUSO ведется работа над созданием комплексных детекторов, нацеленных

на реализацию комплементарных измерений (КЛ ПВЭ и нейтрино высоких энергий) с орбиты и на стратосферных баллонах. На сегодняшний день готовится второй стратосферный эксперимент EUSO-SPB2. Впервые в одном эксперименте предлагается сочетание возможности регистрации флуоресцентного трека ШАЛ с временным разрешением 1 мкс и прямого черенковского свечения горизонтальных ливней и возможно, восходящих ливней от тау-нейтрино при наблюдении на лимб с временным разрешением 10–20 нс [19]. Запуск EUSO-SPB2 запланирован на 2023 г.

После К-EUSO планируется реализация еще более грандиозного эксперимента РОЕММА (probe of extreme multi-messenger astrophysics), нацеленного как на регистрацию КЛ ПВЭ, так и нейтрино высоких энергий, выше 20 ПэВ, от экстремальных астрофизических транзиентных источников [20, 21]. Проект представляет собой систему двух телескопов на двух космических аппаратах, обеспечивающих стереоскопическое изображение трека ШАЛ и регистрацию прямого черенковского свечения от восходящих ливней энергичных нейтрино.

Статья опубликована по материалам исследований, выполненных в КЭ “КЛПВЭ” для российского сегмента Международной космической станции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Deligny O. for the Pierre Auger collaboration.* // Proc. ICRC2019. (Madison, 2019). P. 234.
2. *Benson R., Linsley J.* // Bull. Amer. Astron. Soc. 1980. V. 12. P. 818.
3. *Takahashi Y.* // Proc. 24th ICRC. (Rome, 1995). V. 3. P. 170.
4. *Stecker F.W., Krizmanic J.F., Barbier L.M. et al.* // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2004. V. 136. P. 433.
5. *Scarsi L., Catalano O., Maccarone M.C. et al.* // Proc. 27th ICRC 2001. (Hamburg, 2001). V. HE. P. 839.
6. *Klimov P.A., Panasyuk M.I., Khrenov B.A. et al.* // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. P. 1687.
7. *Abdellaoui G., Abe S., Adams J.H. et al.* // Astropart. Phys. 2018. V. 102. P. 98.
8. *Abdellaoui G., Abe S., Adams J.H. et al.* // Astropart. Phys. 2019. V. 111. P. 54.
9. *Wiencke L., Olinto A.* // Proc. ICRC2017. (Busan, 2017). V. 301. Art. No. 1097.
10. *Климов П.А., Зотов М.Ю., Чирская Н.П. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 442; *Klimov P.A., Zotov M.Yu., Chirskaya N.P. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 4. P. 407.
11. *Khrenov B.A., Klimov P.A., Panasyuk M.I. et al.* // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2017. V. 2017. No. 9. Art. No. 006.
12. *Khrenov B.A., Garipov G.K., Kaznacheeva M.A. et al.* // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2020. V. 2020. No. 3. Art. No. 033.
13. *Klimov P.A., Kaznacheeva M.A., Khrenov B.A. et al.* // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2018. V. 15. No. 8. P. 1139.
14. *Казначеева М.А., Климов П.А., Хренов Б.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1125; *Kaznacheeva M.A., Klimov P.A., Khrenov B.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 8. P. 1024.
15. *Capel F., Belov A., Casolino M., Klimov P.* // Adv. Space Res. 2018. V. 62. No. 10. P. 2954.
16. *Casolino M., Klimov P., Piotrowski L.* // Progr. Theor. Exp. Phys. 2017. V. 2017. No. 12. Art. No. 12A107.
17. *Klimov P., Casolino M.* // Proc. ICRC2019. (Madison, 2019). P. 412.
18. *Белов А.А., Климов П.А., Шаракин С.А.* // ПТЭ. 2018. № 1. С. 27; *Belov A.A., Klimov P.A., Sharakin S.A.* // Instrum. Exp. Techn. 2018. V. 61. No. 1. P. 27.
19. *Wiencke L., Olinto A.* // Proc. ICRC2019. (Madison, 2019). V. 358. P. 466.
20. *Anchordoqui L.A., Bergman D.R., Bertaina M.E. et al.* // arXiv: 1907.03694. 2019.
21. *Venters T.M., Reno M.H., Krizmanic J.F. et al.* // arXiv: 1906.07209. 2019.

## Ultra-high energy cosmic rays measurements from space: from TUS to K-EUSO and beyond

P. A. Klimov<sup>a,\*</sup>, M. I. Panasyuk<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Lomonosov Moscow State University, Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia

<sup>b</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia

\*e-mail: pavel.klimov@gmail.com

KLYPVE-EUSO project being developed by the JEM-EUSO collaboration for installation on board the International Space Station is described. During the preparation of the K-EUSO project, the JEM-EUSO collaboration successfully carried out a number of pathfinders: balloon experiments EUSO-Balloon and EUSO-SPB1, and a fluorescence detector at the Telescope Array site (EUSO-TA). The UV Atmosphere (Mini-EUSO) experiment is operating onboard the Russian Segment of the ISS since October, 2019. A more advanced experiment called РОЕММА (Probe of Extreme Multi-Messenger Astrophysics) is planned to be implemented after K-EUSO. It is aimed at detecting both UHECRs and high-energy neutrinos.