

УДК 524.1

ОРБИТАЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ: СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТА “КЛПВЭ”

© 2023 г. А. А. Белов^{1, 2}, П. А. Климов¹ *, С. А. Шаракин¹,
М. Ю. Зотов¹ от имени коллаборации JEM-EUSO

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Физический факультет, Москва, Россия

*E-mail: pavel.klimov@gmail.com

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

“КЛПВЭ” (K-EUSO) – планируемый космический эксперимент, направленный на исследование космических лучей предельно высоких энергий путем регистрации с околоземной орбиты флуоресцентного и черенковского излучений широких атмосферных ливней в ночной атмосфере Земли. Обсерватория разрабатывается в рамках коллаборации JEM-EUSO. Порог регистрации составит около 50 ЭэВ, а годовая статистика событий – более 50. Миссия “КЛПВЭ” может существенно дополнить данные наземных экспериментов.

DOI: 10.31857/S0367676523701600, EDN: ONCCMD

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на огромные усилия, предпринимаемые международным научным сообществом, уже почти 60 лет не удается решить одну из фундаментальных проблем современной астрофизики – загадку о природе и происхождении космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ). В этой области накоплен большой объем знаний, но, с одной стороны, результатов двух основных наземных экспериментов: Обсерватории Пьера Оже (РАО) [1], Telescope Array (ТА) [2] и их предшественников до сих пор недостаточно для решения указанной задачи, с другой – между ними имеются серьезные разногласия. Эти разногласия связаны как с характеристиками самого объекта исследования, в первую очередь, с крайне низким потоком КЛ ПВЭ, так и с ограничениями, обусловленными наземными исследованиями, а именно, тем, что наблюдениям с любой из существующих установок доступна лишь часть небесной сферы, и наибольшая экспозиция набирается в непересекающихся областях, так что проверка полученных в них результатов силами другого наземного эксперимента невозможна. Например, результаты РАО и ТА, относящиеся к энергетическому спектру космических лучей при самых высоких энергиях, показывают различия, которые

можно частично объяснить систематическими неопределенностями между двумя обсерваториями, но которые также могут иметь различный характер происхождения, например, статистические флуктуации или даже воздействие мощного источника в северном полушарии [3–7].

Орбитальный детектор с соответствующими техническими параметрами может совершить прорыв в данной области знаний за счет равномерной экспозиции всей небесной сферы и большой статистики регистрируемых событий.

ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ “КЛПВЭ”

Концепция эксперимента основана на детекторе зеркального типа, предложенном в НИИЯФ МГУ им. Скобельцына еще в 2001 г. [8]. С тех пор она прошла несколько этапов совершенствования, чтобы соответствовать как современным и меняющимся научным требованиям, так и технической реализуемости. В 2010 году проект был включен в долгосрочную программу научно-прикладных исследований на борту российского сегмента МКС. В 2012 г. был разработан большой зеркальный телескоп площадью 10 м² с фокусным расстоянием 3 м и полем зрения около 7.5° [9, 10]. Однако на этапе предварительного проектирова-

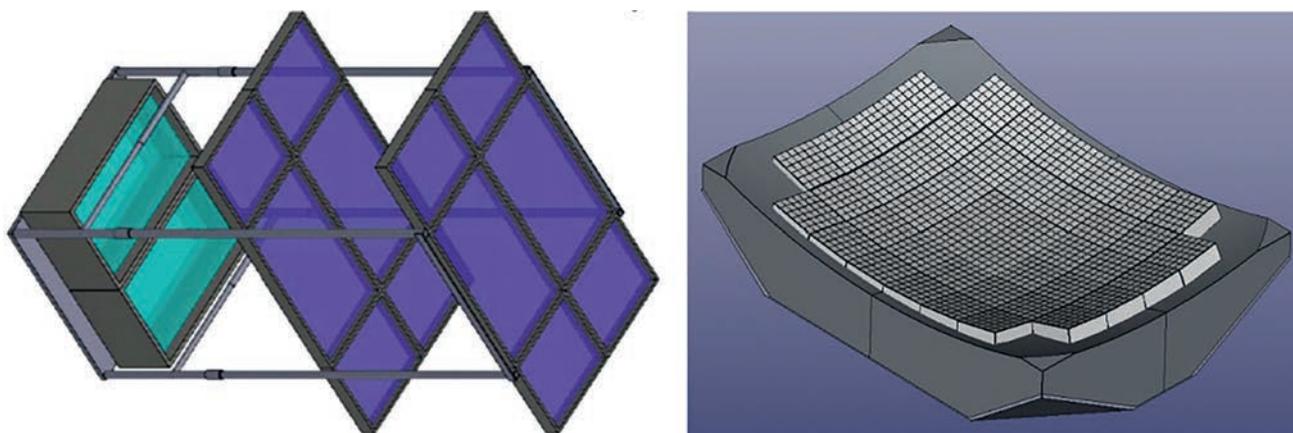


Рис. 1. Схема детектора “КЛПВЭ” с сегментированной преломляющей оптикой и прямоугольной апертурой (слева). 3D-модель фокальной поверхности, построенная из 44 фотодетекторных модулей (справа). Фотоприемник размещен в двух зеленых блоках, показанных на левой панели.

ния стало ясно, что параметры прибора (площадь обзора и качество изображения) не позволяют решить актуальные проблемы в области КЛ ПВЭ из-за слишком малой экспозиции данного варианта. Эти соображения инициировали разработку новой оптической системы с целью увеличения поля зрения, улучшения пространственного и углового разрешения и эффективности прибора. Для устранения внеосевой аберрации перед фотоприемником была введена дополнительная корректирующая линза Френеля. Были разработаны две версии детектора: Baseline и Multi-Eye Telescope System (METS) [11, 12]. Позднее эти конфигурации были преобразованы в конструкцию с еще более высокими характеристиками с оптической системой типа Шмидта [13].

Дальнейшие технико-экономические проработки показали трудности с доставкой и установкой прибора за пределами МКС в таком варианте. Было принято решение вернуться к варианту чисто линзовой оптики на основе наработок проекта JEM-EUSO [14], так как это позволяло обеспечить оптимальные массогабаритные характеристики оборудования.

В последней рассматриваемой конфигурации детектор состоит из преломляющей оптической системы с прямоугольной апертурой 1400×2400 мм² (см. рис. 1). Такой размер обусловлен тем, что каждая отдельная рама в сложном состоянии должна иметь размеры менее $1200 \times 700 \times 350$ мм и свободно проходить через грузовой люк ТКК “Прогресс”. Оптика состоит из двух оптических элементов (линз), фокусирующих свет на фокальную поверхность размером 1300×1000 мм. Структура фокальной поверхности состоит из 44 фотоприемных модулей, аналогичных другим проектам JEM-EUSO, с общим числом каналов около 10^5 .

Оба оптических элемента телескопа выполнены в виде сферических линз Френеля, изготовленных из специального материала полиметилметакрилата (ПММА), прозрачного в ближнем УФ-диапазоне. Значительная оптическая сила таких линз создается специальными кольцевыми зонами поверхности Френеля, при этом даже при больших габаритах толщина линз оказывается небольшой, а масса всей системы умеренной. Материал ПММА-000 (продукт Mitsubishi Chemical Corporation) был выбран по нескольким причинам. Наряду с низкой плотностью (около 1.2 г/см³), обеспечивающей малый вес линзы, этот материал обладает рядом важных оптических свойств, в том числе слабой температурной зависимостью показателя преломления. Прозрачность ПММА-000 практически не изменяется при длительном воздействии атомарного кислорода (основного элемента остаточной атмосферы на высоте МКС) и протонов с энергией около 70 МэВ. На сегодняшний день несколько таких линз были изготовлены для проектов JEM-EUSO: баллонных экспериментов EUSO-Balloon [15] и EUSO-SPB1 [16] и космического эксперимента “УФ атмосфера” (Mini-EUSO) [17].

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕЛЕСКОПА

Для последней конфигурации аппаратуры в программном пакете ESAF [18] было проведено моделирование для определения экспозиции, частоты и качества регистрации событий, а также исследования особенностей реконструкции. Расчет экспозиции производился методом Монте-Карло моделирования ШАЛ с разной энергией и направлениями прихода. Был смоделирован отклик детектора, находящегося на средней высоте

орбиты МКС, на несколько тысяч протонных ШАЛ с энергией первичной частицы в диапазоне от 10 до 300 ЭэВ для зенитных углов от 30° до 75° , попадающих равномерно в различные части поля зрения. При этом учитывались циклы дня и ночи, фаз луны, а также наличие в поле зрения облаков и искусственных источников света, аналогично методике [19].

Расчеты показали, что годовая экспозиция зависит от пороговой энергии регистрации и для “КЛПВЭ” выходит на плато в районе $\sim 18000 \text{ км}^2 \cdot \text{ср}$ в год, что достигается при энергиях выше 100 ЭэВ (для сравнения с $5000\text{--}7000 \text{ км}^2 \cdot \text{ср}$ в год коллаборации Auger и $\text{TA} \times 4$). Эффективность 50% достигается около 40 ЭэВ. Предполагаемая спектр Auger [20], ожидаемая частота событий КЛ ПВЭ оценивается примерно в 65 событий в год выше 50 ЭэВ, включая 4 события с энергиями выше 100 ЭэВ. Для сравнения коллаборация Pierre Auger Observatory регистрирует в среднем ~ 19 событий в год выше 50 ЭэВ. Угловое разрешение прибора детектора лежит в области $3^\circ\text{--}7^\circ$ при малых зенитных углах и улучшается до $1^\circ\text{--}2^\circ$ для квази-горизонтальных событий. С увеличением первичной энергии точность реконструкции возрастает. Разрешение по энергии варьируется от 20 до 35% при малых зенитных углах и повышается до 5–15% для квази-горизонтальных событий. Точность определения энергии также растет при увеличении энергии ШАЛ. Примерно 80% событий с энергиями 10^{20} эВ и выше может быть реконструировано в автоматическом режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках совместной работы с коллаборацией JEM-EUSO проведена оптимизация параметров научной аппаратуры проекта “КЛПВЭ”, разработана двухлинзовая оптическая система и проведено исследование работы орбитального телескопа. Показано, что возможна регистрация более 65 событий КЛ ПВЭ в год с энергией выше 50 ЭэВ при равномерной экспозиции по всему небу. Маловероятно, что проект будет реализован на борту МКС, как предполагалось ранее. Поэтому на данном этапе рассматривается возможный перенос аппаратуры на будущую Российскую орбитальную служебную станцию (РОСС) или реализация на автоматических космических аппаратах в стереорежиме, аналогично проекту РОЕММА [21]. Эта работа находится на самой начальной стадии и должны быть проведены дополнительные исследования, в частности учтены особенности орбит и других условий наблюдения в полярной области и в стереорежиме. Первая задача может быть решена с помощью данных, полученных в

проекте “ТУС”, орбита аппарата была полярной (как предполагается для РОСС) и были измерены фоновые условия в высоких широтах [22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pierre Auger Collaboration // NIM A. 2015. V. 798. P. 172.
2. Abbasi R., Abu-Zayyad T., Allen M. et al. // Proc. ICRC2021. V. 395. (Berlin, 2021). Art. No. 203.
3. Deligny O. // arXiv: 2001.08811. 2020.
4. Tsunesada Y., Abreu P., Aglietta M. et al. // Proc. ICRC2021. V. 395. (Berlin, 2021). Art. No. 337.
5. Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al. // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. No. 6. Art. No. 062005.
6. Hanlon W. // arXiv: 1908.01356. 2019.
7. di Matteo A., Anchordoqui L., Bister T. et al. // arXiv: 2111.12366. 2021.
8. Khrenov B.A., Panasyuk M.I., Alexandrov V.V. et al. // Proc. AIP Conf. 2001. V. 566. No. 1. P. 57.
9. Khrenov B.A., Alexandrov V.V., Bugrov D.I. et al. // Phys. Atom. Nuclei. 2004. V. 67. No. 11. P. 2058.
10. Garipov G.K. Alexandrov V.V., Bugrov D.I. // Proc. AIP Conf. 2001. V. 566. No. 1. P. 76.
11. Panasyuk M., Klimov P., Khrenov B. // Proc. ICRC2015. V. 236. (Hague, 2015). Art. No. 669.
12. Гарипов Г.К., Зотов М.Ю., Климов П.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 358; Garipov G.K., Zotov M.Y., Klimov P.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 3. P. 326.
13. Klimov P., Casolino M. et al. // Proc. ICRC2017. V. 301. (Busan, 2017). Art. No. 412.
14. Adams J.H., Ahmad S., Albert J.N. et al. // Exp. Astronomy. 2015. V. 40. No. 1. P. 19.
15. Adams J.H., Ahmad S., Albert J.N. et al. // Exp. Astronomy. 2015. V. 40. No. 1. P. 281.
16. Wiencke L., Olinto A. // Proc. ICRC2017. V. 301. (Busan, 2017). Art. No. 1097.
17. Capel F., Belov A., Casolino M., Klimov P. // Adv. Space Res. 2018. V. 62. No. 10. P. 2954.
18. Fenu F., Shinozaki K., Miyamoto H. et al. // arXiv: 1909.12012. 2019.
19. Adams J., Ahmad S., Albert J.-N. et al. // Astropart. Phys. 2013. V. 44. P. 76.
20. Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al. // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. No. 6. Art. No. 062005.
21. Olinto A.V., Krizmanic J., Adams J.H. et al. // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2021. V. 2021. No. 06. Art. No. 007.
22. Barghini D., Bertaina M., Cellino A. et al. // Adv. Space Res. 2022. V. 70. No. 9. P. 2734.

**Orbital detector of ultra-high-energy cosmic rays:
status and prospects of the KLYPVE project**

**A. A. Belov^{a, b}, P. A. Klimov^{a, *}, S. A. Sharakin^a,
M. Yu. Zotov^a on behalf of the JEM-EUSO collaboration**

^a*Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia*

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

KLYPVE (K-EUSO) is a planned space experiment aimed at studying ultra-high-energy cosmic rays by detecting fluorescent and Cherenkov radiation from extensive air showers in the Earth's night atmosphere from near-Earth orbit. The observatory is being developed as a part of the JEM-EUSO program. The registration threshold will be about 50 EeV, and the annual statistics of events will be more than 50. The KLYPVE mission can significantly supplement the data of ground-based experiments.