

УДК 551.593

**КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «УФ АТМОСФЕРА»:  
КАРТОГРАФИЯ НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ В УФ-ДИАПАЗОНЕ  
С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ**

А.А. Белов, П.А. Климов, С.А. Шаракин

Канд. техн. наук А.А. Белов; канд. физ.-мат. наук П.А. Климов;  
канд. физ.-мат. наук С.А. Шаракин (НИИЯФ МГУ)  
от имени коллаборации JEM-EUSO

С 2019 года на борту РС МКС работает космический эксперимент «УФ атмосфера» (Mini-EUSO). Научная аппаратура эксперимента представляет собой высокочувствительный широкоугольный линзовый телескоп с высоким временным разрешением, который устанавливается на УФ прозрачный иллюминатор № 9 служебного модуля. В статье приведено описание научной аппаратуры и примеры первых результатов измерений транзитного и квазистационарного свечения грозовой природы (транзитные атмосферные явления типа ELVE) и антропогенного происхождения.

**Ключевые слова:** УФ свечение атмосферы, орбитальный телескоп, транзитные атмосферные явления

**“UV Atmosphere” Space Experiment: Night Atmosphere  
Cartography in the UV Range with High Time Resolution****A.A. Belov, P.A. Klimov, S.A. Sharakin**

Since 2019, the UV Atmosphere Space Experiment has been carried out aboard the ISS Russian Segment. The scientific equipment is a highly sensitive wide-angle refracting telescope with high time resolution, which is installed on the UV transparent window No 9 of the Service Module. The paper describes scientific equipment used and gives first results of measuring the transient and quasi-stationary glow of thunderstorm nature (transient atmospheric phenomena of the ELVE type) and anthropogenic origin.

**Keywords:** UV airglow, orbiting telescope, transient atmospheric phenomena

В августе 2019 года на борт российского сегмента МКС была доставлена новая научная аппаратура – «УФ атмосфера» (Mini-EUSO). Научная аппаратура представляет собой широкоугольный линзовый телескоп с высоким временным разрешением (подробное описание приведено в следующем разделе) и предназначена для исследования пространственно-временной структуры УФ-излучения ночной атмосферы Земли.

В ближнем УФ-диапазоне (300–400 нм) возможно наблюдение разнообразных процессов, в первую очередь, связанных с возбуждениями линий азота, содержащегося в атмосфере Земли. Это позволяет исследовать как объекты астрофизической природы по флуоресцентному свечению развивающегося в атмосфере каскада (космические лучи, релятивистские пылинки и пр.),

так и внутриатмосферные процессы: грозовые явления нижней и верхней атмосферы, квазистационарное свечение верхних слоев под действием околоземной космической радиации. Важным практическим аспектом является мониторинг антропогенного/техногенного свечения. Вследствие этого космический эксперимент (КЭ) «УФ атмосфера» является многофункциональным и может решать целый ряд задач в разных областях науки.

В ходе проведения КЭ «УФ атмосфера» решаются следующие основные задачи:

- мониторинговые измерения пространственно-временной структуры свечения ночной атмосферы в области ближнего ультрафиолета с высоким временным (2,5 мкс) и пространственным (5 км) разрешением в широком поле зрения ( $\pm 20^\circ$ );

- изучение временного и пространственного распределения свечения при быстрых (1–100 мс) электрических разрядах в атмосфере (транзиентные атмосферные явления, ТАЯ) и поиск корреляции карты распределения ТАЯ различного типа с геофизическими явлениями в верхней атмосфере, ионосфере и магнитосфере;

- изучение распределения по яркости свечения метеороидов с малыми размерами и массой (размер порядка миллиметров, масса порядка 0,1–1 г, энергия порядка  $10^5$  Дж).

Сочетание высокого временного разрешения, чувствительности и широкого поля зрения позволяет решать и ряд других задач: анализ антропогенного влияния на верхние слои атмосферы [1]; регистрация гравитационных волн от цунами [2] и биолюминесценции океанов [3]; исследование воздействия космических энергичных излучений на атмосферу Земли; исследование гипотетических частиц странной кварковой материи – «нуклеаритов» [4].

Важно отметить, что эксперимент «УФ атмосфера» является частью научной программы крупной международной коллаборации JEM-EUSO по созданию орбитальной обсерватории космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ,  $E > 50 \text{ ЭэВ} = 5 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$ ) [5]. Детектирование частиц происходит путем регистрации флуоресцентного свечения широкого атмосферного ливня (ШАЛ) широкоугольным телескопом с большой площадью входного окна, расположенным на искусственном спутнике Земли [6]. Ввиду сложной методики эксперимента и особенностей измерений в условиях значительных вариаций УФ фона разработка обсерватории ведется поэтапно, путем создания и испытания целого ряда прототипов [7–9]. «УФ атмосфера», предложенный в 2014 году, является первым прибором коллаборации, используемым в космическом полете. Научная аппаратура «УФ атмосфера» разработана и изготовлена в рамках Соглашения между Госкорпорацией по космической деятельности «Роскосмос» и Итальянским космическим агентством.

В данной статье приведено краткое описание аппаратуры и примеры первых результатов наблюдений квазистационарного УФ свечения и быстрых (транзиентных) событий за два года работы на орбите.

## Описание научной аппаратуры

Эксперимент проводится с помощью широкоугольного детектора (телескопа), установленного через переходное кольцо (адаптер) на иллюминатор № 9 служебного модуля российского сегмента МКС. Данный иллюминатор прозрачен в ближнем УФ-диапазоне и позволяет проводить наблюдения в надир.

Телескоп «УФ атмосфера» одновременно обладает и широким полем зрения ( $\pm 20^\circ$ ), высокой чувствительностью (площадь входного окна  $490 \text{ см}^2$ ) и высоким временным разрешением (2,5 мкс). Измерения проводятся в диапазоне длин волн 300–400 нм, что соответствует области флуоресцентного свечения молекулярного азота. Оптическая схема представляет собой двухлинзовую систему с эффективным фокусным расстоянием 25 см. Обе линзы изготовлены из УФ прозрачного пластика ПММА и для обеспечения компактности аппаратуры выполнены в виде линз Френеля. На рис. 1 представлены фотографии телескопа в процессе предполетной подготовки и на борту МКС со стороны входного окна. Отчетливо видна кольцевая френелевская структура передней линзы.



Рис. 1. Широкоугольный телескоп КЭ «УФ атмосфера» в процессе наземной подготовки (слева) и на борту МКС (справа)

Матрица фотоприемника представлена 36 многоанодными фотоэлектронными умножителями (МАФЭУ) фирмы Хамаматасу. Всего в матрице 2304 регистрирующих канала. МАФЭУ работают в режиме счета фотонов, что обеспечивает максимальную чувствительность. Оцифровка сигнала происходит с помощью специализированных микросхем SPACIROC3, специально разработанных для приборов коллаборации JEM-EUSO [10]. Пространственное разрешение определяется фокусным расстоянием и размером пикселя фотоприемника ( $\sim 3 \text{ мм}$ ) и составляет порядка 5 км на поверхности Земли.

Блок-схема детектора представлена на рис. 2. Помимо основного телескопа в составе аппаратуры присутствуют две видеокамеры (обычная и инфракрасная, на схеме обозначены как ВК и ИКК, соответственно).

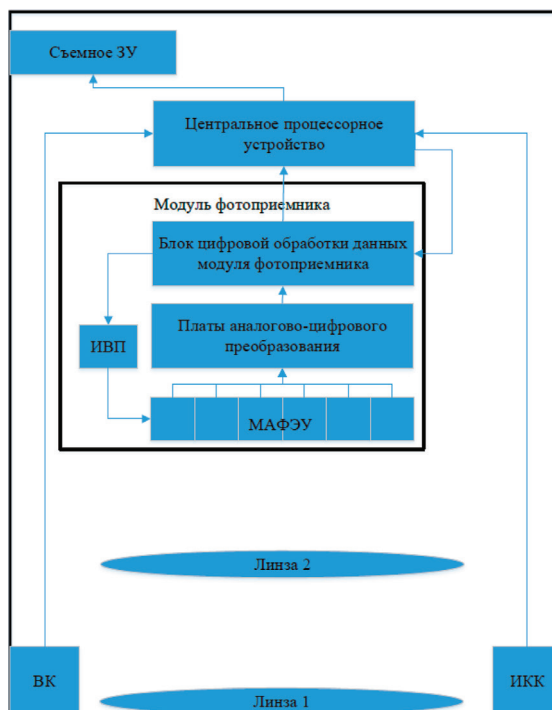


Рис. 2. Блок-схема детектора «УФ атмосфера»:

*ВК* – видеокамера; *ИКК* – инфракрасная камера;  
*ИВП* – источник высоковольтного питания

Важным элементом детектора является источник высоковольтного питания (ИВП), выполненный по схеме Кокрофта-Уолтона [11], который обеспечивает стабильность напряжения на диодной системе МАФЭУ (до 1 кВ), а также выполняет защитную функцию. При резком возрастании интенсивности свечения и, как следствие, тока через диодную систему МАФЭУ, ИВП снимает напряжение в течение 1 мкс. Это позволяет сохранить работоспособность высокочувствительных фотоэлементов (МАФЭУ) и считывающей электроники.

Важную функцию выполняет блок цифровой обработки данных (БЦОД). В БЦОД реализована трехуровневая триггерная система, позволяющая параллельно записывать в течение каждых 5 с наблюдений до 4 событий с временным разрешением 2,5 мкс и 4 событий с разрешением 320 мкс, а также вести непрерывную запись в режиме мониторинга с разрешением 40 мс. Первые два режима позволяют отбирать события разной длительности, а третий – регистрировать относительно медленные вариации УФ свечения на протяжении всей траектории движения МКС. Объем информации, получаемой в процессе работы прибора, – около 13 Гбайт за один восьмичасовой сеанс работы. БЦОД сохраняет поток данных с временным разрешением 2,5 мкс (D1) в буфере. Триггерный алгоритм ищет в буфере превышение сигнала на

16 стандартных отклонений в любом пикселе фотоприемника. И среднеквадратичное отклонение, и среднее значение рассчитываются в реальном времени, т.е. учитывают вариации условий освещения. При срабатывании триггера в памяти сохраняется 128-кадровый буфер (64 кадра до триггера и 64 кадра после него). Независимо от триггера суммы из 128 кадров (320 мкс, D2) непрерывно вычисляются и временно сохраняются в другом буфере, где выполняется аналогичный алгоритм триггера (в этой шкале времени). Точно так же суммы по 128 кадрам D2 (40,96 мс, D3) сохраняются в реальном времени. Каждые 5,24 с 128 пакетов данных D3 и до четырех пакетов D2 и четырех пакетов D1 (при срабатывании соответствующих триггеров) отправляются в ЦПУ для хранения.

Центральное процессорное устройство (ЦПУ) предназначено для сбора научной информации с блока цифровой обработки данных и видеокамер, записи этой информации на флэш-карты, а также выдачи команд управления указанными блоками. ЦПУ представляет собой одноплатный компьютер стандарта PC/104-Express с процессором AMD Fusion G-Series FT1 Single Core 615 MHz, оперативной памятью 2 Гбайта, ПЗУ 32 Гбайта, потребляемая мощность не более 7,5 Вт.

Подробное описание аппаратуры, наземного тестирования и устройства программного обеспечения приведено в [12–14].

## Некоторые результаты измерений

### *Картография ночной атмосферы и антропогенные источники свечения*

К моменту написания статьи было проведено 45 сеансов космического эксперимента «УФ атмосфера». За это время детектор провел измерения УФ свечения в разных областях, с разным уровнем фона, грозовой активности, над океанами и сушей. Карта всех пролетов (ночная часть орбит, когда проводились измерения) представлена на рис. 3.

Для каждого ночного витка и для отдельных его частей были построены карты свечения, на которых хорошо видны облачный покров и антропогенное свечение (города и промышленные центры). На рис. 4 показан пример пролета над Черным морем, полуостровом Крым и Краснодарским краем. Хорошо видно населенное побережье, города Севастополь и Симферополь, Краснодар, Ростов-на-Дону. Основной вклад в УФ фон над сушей представлен стационарным свечением антропогенных источников. Однако высокое временное разрешение прибора позволяет измерять и вспышечные события. Пример последовательности таких коротких вспышек, зарегистрированных на побережье Черного моря во время того же пролета, показан на рис. 5. Вспышки регистрируются над одним и тем же регионом, период следования импульсов менее 1 с, а длительность менее 10 тактов измерения, т. е. менее 25 мкс.

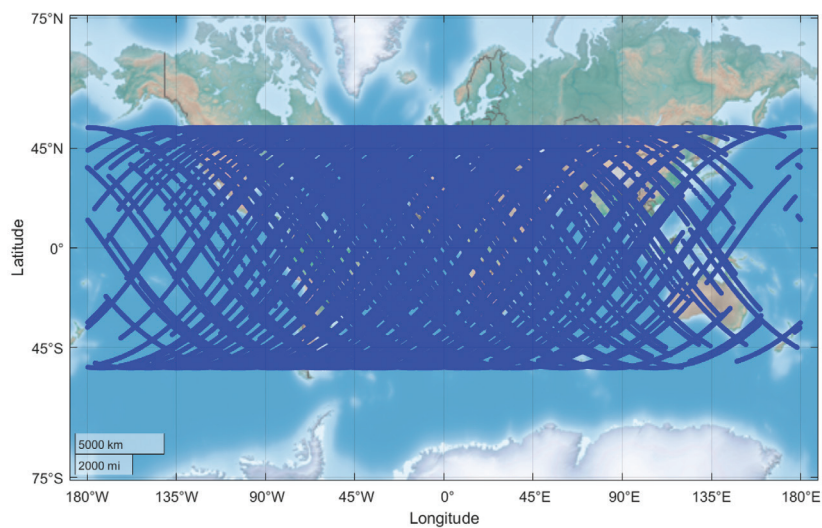


Рис. 3. Карта измерений широкоугольного телескопа «УФ атмосфера»

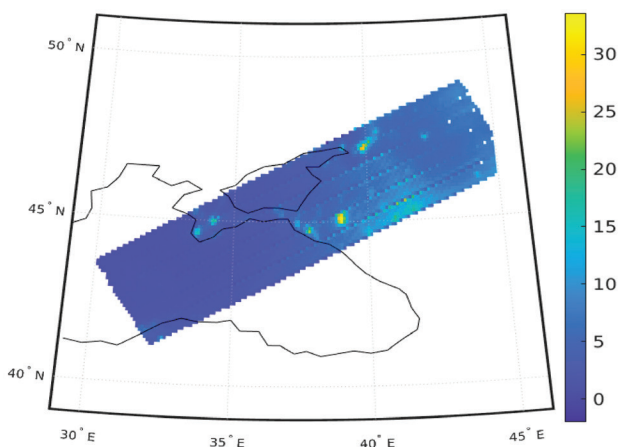


Рис. 4. Пролет НА «УФ атмосфера» над полуостровом Крым и Краснодарским краем

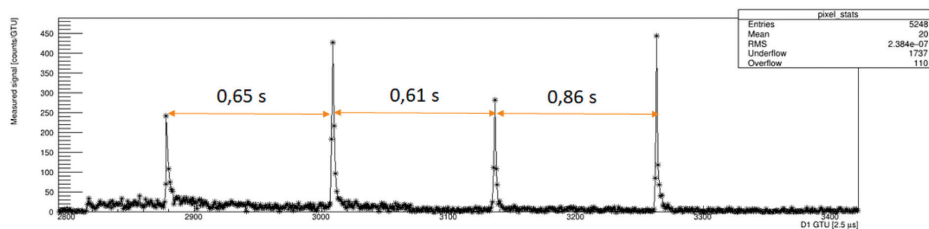


Рис. 5. Короткие вспышки антропогенного характера

Благодаря движению МКС детектор измеряет антропогенное свечение как над сушей, так и над океанами. Это позволяет использовать прибор для непрерывного мониторинга различных видов деятельности человека, в том числе и недоступных для наблюдения наземными средствами. В качестве примера приведем карту УФ-излучения над районом активного рыбного промысла (рис. 6). Несколько групп рыболовных судов были выделены путем сравнения с открытым интернет-ресурсом <https://globalfishingwatch.org/map/>.

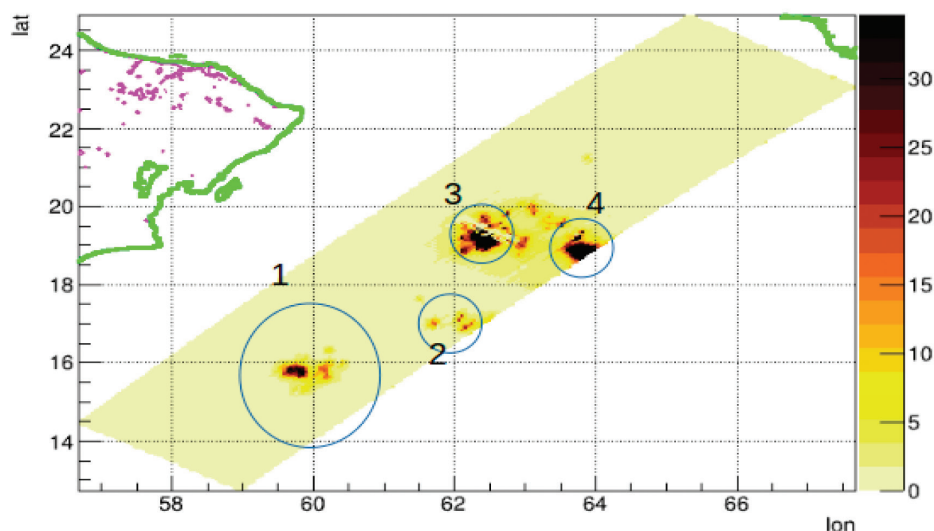


Рис. 6. УФ-излучение над океаном, измеренное телескопом «УФ атмосфера» (Mini-EUSO). Группы точек (1–4) представляют собой рыболовецкие суда

### **Транзиентные атмосферные явления**

Благодаря высоким временному (2,5 мкс) и пространственному разрешению (~4,7 км на высоте 90 км) телескоп «УФ атмосфера» хорошо подходит для наблюдения так называемых транзиентных атмосферных явлений (TLE, от *англ.* Transient Luminous Events), световых вспышек в верхних слоях атмосферы электромагнитной природы. Одним из наиболее частых событий TLE является ELVE (от *англ.* Emission of Light and Very Low Frequency Perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources) – расширяющееся с огромной скоростью на высотах около 90 км светящееся «кольцо». Диаметр кольца может простираться на несколько сотен километров, а общая длительность свечения составляет от нескольких сотен до тысячи микросекунд. Считается, что такое масштабное световое явление вызвано проникновением в ионосферу электромагнитного фронта, сгенерированного в результате грозового разряда [15].

Типичное изображение ELVE представлено на рис. 7, на котором показана временная динамика свечения в виде семи кадров распределения сигнала

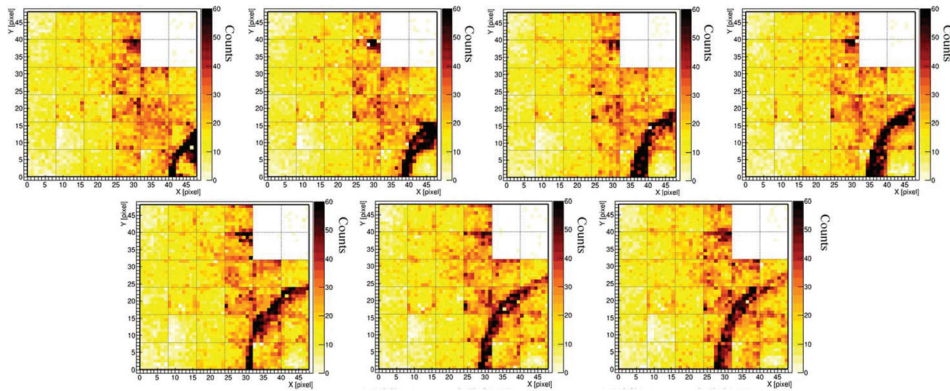


Рис. 7. Событие ELVE, зарегистрированное НА «УФ атмосфера» 05.12.2019

по матрице фотоприемника. Сигнал в каналах фотоприемника (пикселях) сконцентрирован в виде хорошо идентифицируемого участка кольца, радиус которого постепенно увеличивается. (Отсутствие сигнала в четырех МАФЭУ сверху справа связано с тем, что в этой части фотоприемника сработала защита ИВП – произошло переключение в режим пониженной чувствительности Cathode2.)

К настоящему времени в базе данных, зарегистрированных детектором НА «УФ атмосфера» за первый год работы, надежно выявлено 17 событий типа ELVE (Lauga, ICRC2021), расположенных в основном в низкоширотных регионах. Интересно, что среди всех зарегистрированных событий три носят повторный характер: два события типа двойной ELVE и один тройной ELVE. Двойные ELVE ранее регистрировались с помощью наземных установок, смотрите например в работе [16]. Первые наблюдения таких событий с орбиты произведены детектором «ТУС» на спутнике «Ломоносов» [17]. Физическая модель двойного ELVE предполагает существование двух электромагнитных фронтов, приходящих в ионосферу с временной задержкой: первого, непосредственно от электромагнитного источника (ЭМИ), и второго, отраженного от (проводящей) земной поверхности. Первоначальный источник этого импульса в таком случае должен быть расположен на удалении от поверхности земли, что не выполняется для ударов типа облако-земля. Единственным известным источником с достаточной мощностью являются компактные внутриоблачные разряды, происходящие у верхнего края некоторых грозовых облаков. Анализ динамики развития двойного ELVE позволяет не только изучать его пространственно-временную структуру, но и определить положение источника ЭМИ, спровоцировавшего их появление. Интерпретации свечения типа тройной ELVE в настоящее время не существует и требует дальнейшего исследования (рис. 8).

Поле зрения детектора «УФ атмосфера», а значит и потенциальное количество регистрируемых событий в 10 раз больше, чем у телескопа «ТУС».



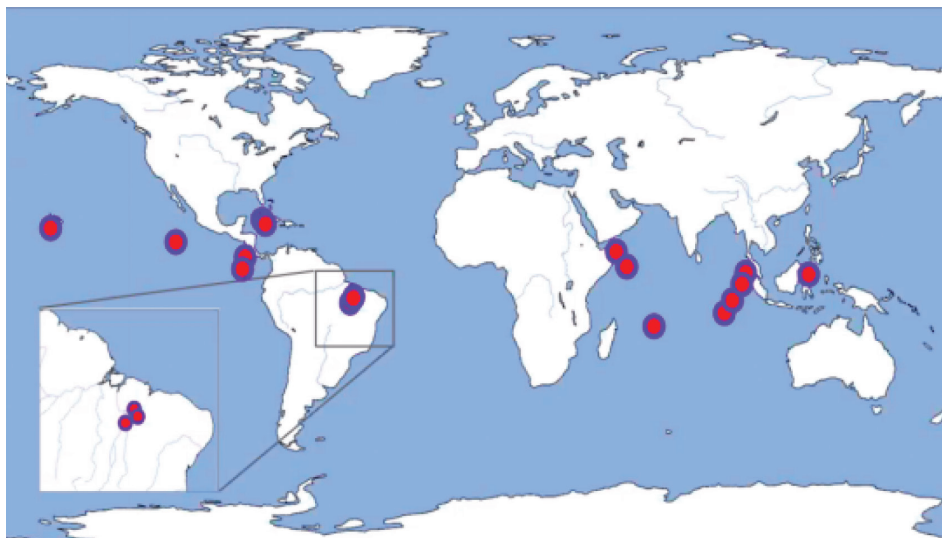


Рис. 8. Географическое распределение 17 событий типа ELVE, зарегистрированных детектором НА «УФ атмосфера»

Предварительная оценка частоты событий типа ELVE по данным детектора «УФ атмосфера» составила около 15 событий в минуту по всему Земному шару, что превышает оценки аналогичных экспериментов [18, 19] и частично объясняется высокой чувствительностью прибора.

#### ***Кинематическая реконструкция события ELVE***

Высокое временное разрешение и широкое поле зрения прибора позволяют детально исследовать пространственно-временную динамику событий. Для примера рассмотрим реконструкцию одного из событий типа ELVE, проделанную на основе данных «УФ атмосфера» (первый вариант опубликован в работе [20]).

Для каждого кадра события специальный алгоритм, учитывающий как координаты сработавшего пикселя, так и величину сигнала в нем, определяет паттерн «дуги окружности». Пример такого паттерна и аппроксимирующей окружности приведен на рис. 9 слева для кадра 4181 события ELVE, зарегистрированного 26 октября 2020 г. Пиксели детектора, положение и сигнал которых использовался для аппроксимации, отмечены черными точками. Центр аппроксимирующей окружности (отмечен красной точкой) имеет координаты (–88 км, 27 км), ее радиус равен 71 км на высоте 90 км. Справа на рисунке показано распределение сигнала по радиальному расстоянию  $R$  (в км) от центра окружности для кадра 4236. Гауссова аппроксимация пика (красная линия) позволяет оценить значение  $R$  в данный момент времени. Высокое отношение сигнал/шум (в случае события ELVE201026) приводит к надежному восстановлению зависимости  $R(t)$  (рис. 10).

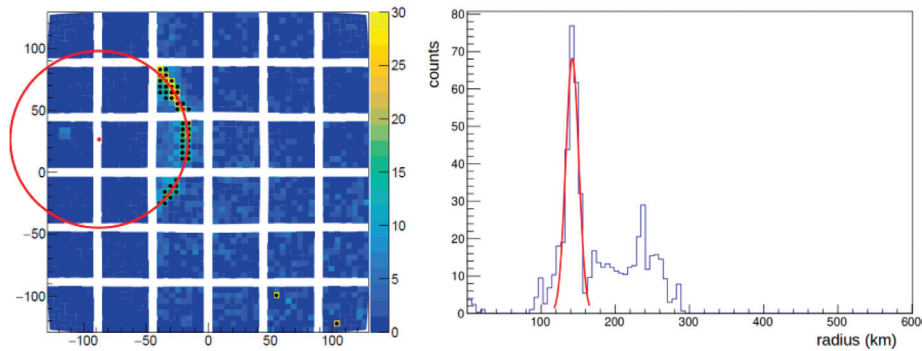


Рис. 9. Реконструкция события ELVE201026

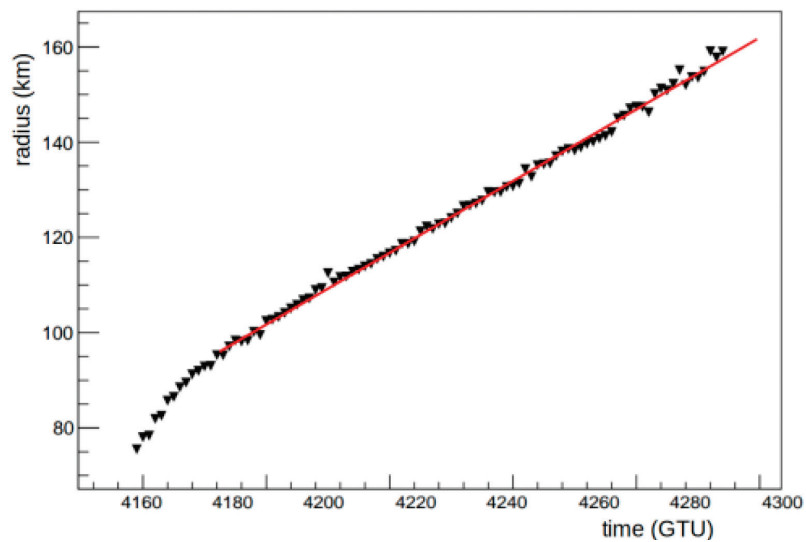


Рис. 10. Радиус свечения  $R$  (в км) события ELVE201026 как функция времени  $t$  (в GTU)

В модели возникновения ELVE в результате пересечения сферическим фронтом электромагнитной волны тонкого слоя ионосферы зависимость видимого радиуса свечения  $R$  от времени  $t$  описывается как:  $R^2(t) = c^2 t^2 - (h - h_0)^2$ , где  $h_0$  и  $h$  – высота разряда и ионосферы соответственно, а  $c \approx 300\,000$  км/с – скорость света. Отсюда видимая скорость расширения свечения определяется как скорость увеличения  $R$ :

$$V(t) = dR/dt = c \times [1 - (h - h_0)^2 / (c^2 t^2)^{-1/2}].$$

На рис. 10 линейная аппроксимация асимптотической области  $R(t)$  приводит к оценке  $V = (301\,000 \pm 2000)$  км/с, что вполне согласуется с такой интерпретацией.

## Выводы

С октября 2019 года на борту российского сегмента МКС работает научная аппаратура «УФ атмосфера». Аппаратура подготовлена в рамках совместного космического эксперимента ГК «Роскосмос» и Итальянского космического агентства коллаборацией JEM-EUSO. Проведено более 40 сеансов эксперимента. Показана надежность работы аппаратуры и эффективность регистрации явлений разнообразного типа. После обработки результаты эксперимента «УФ атмосфера» могут быть использованы для исследования стационарных и транзитных источников УФ-излучения атмосферы Земли как антропогенного, так и природного (геофизического и астрофизического) происхождения. В ходе эксперимента проведена регистрация транзитных атмосферных явлений типа ELVE (одинарные, двойные и тройные). Высокое временное разрешение позволяет детально реконструировать пространственно-временную динамику событий.

Реализация этого проекта является важным шагом при разработке детектора КЛ ПВЭ следующего поколения (проекты K-EUSO, EUSO-SPB2, РОЕММА).

*Статья подготовлена по материалам исследований, выполненных в КЭ «УФ атмосфера» на российском сегменте МКС.*

## ЛИТЕРАТУРА/ REFERENCES

- [1] Гарипов Г.К. и др. Обнаружение глобальных явлений техногенного ультрафиолетового и инфракрасного свечений ночной атмосферы на спутнике «Вернов» // ЖЭТФ. – 2016. – Т. 150. – №. 3. – С. 470–479.  
Garipov G.K. et al. Detection of Global Phenomena of Technogenic Ultraviolet and Infrared Nightglows Onboard the Vernov Satellite, JETP (Journal of Experimental and Theoretical Physics), 2016, V. 150, No 3, pp. 470–479.
- [2] Peltier W.R., Hines C.O. On the Possible Detection of Tsunamis by a Monitoring of the Ionosphere, Journal of Geophysical Research, 1976, V. 81, No 12, pp. 1995–2000.
- [3] Miller S.D. et al. Detection of a Bioluminescent Milky Sea from Space, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005, V. 102, No 40, pp. 14181–14184.
- [4] De Rújula A., Glashow S.L. Nuclearites – a Novel Form of Cosmic Radiation, Nature, 1984, V. 312, No 5996, pp. 734–737.
- [5] Ricci M. et al. The JEM-EUSO Program, Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2016. V. 718, No 5, P. 052034. DOI: 10.1088/1742-6596/718/5/052034
- [6] Benson R., Linsley J. Satellite Observation of Cosmic Ray air Showers, International Cosmic Ray Conference, 1981, V. 8, pp. 145–148.
- [7] Abdellaoui G. et al. EUSO-TA–First Results From a Ground-Based EUSO Telescope, Astroparticle Physics. 2018, V. 102, pp. 98–111.
- [8] Wiencke L. et al. EUSO-SPB1 Mission and Science, 5<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, SISSA Medialab, 2018, V. 301, P. 1097.
- [9] Klimov P.A. et al. The TUS Detector of Extreme Energy Cosmic Rays on Board the Lomonosov Satellite, Space Science Reviews, 2017, V. 212, No 3, pp. 1687–1703.

- [10] Blin-Bondil S. et al. Spaciroc3: A Front-End Readout Asic for JEM-EUSO Cosmic Ray Observatory, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP), Amsterdam, 2014.
- [11] Plebaniak Z. et al. HVPS System for EUSO Detectors, 35<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf., SISSA, 2017.
- [12] Capel F. et al. Mini-EUSO: A High Resolution Detector for the Study of Terrestrial and Cosmic UV Emission from the International Space Station, Advances in Space Research, 2018, V. 62, No 10, pp. 2954–2965.
- [13] Belov A. et al. The Integration and Testing of the Mini-EUSO Multi-Level Trigger System, Advances in Space Research, 2018, V. 62, No 10, pp. 2966–2976.
- [14] Capel F. et al. Mini-EUSO Data Acquisition and Control Software // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. 2019, V. 5, No 4, P. 044009.
- [15] Inan U.S., Bell T.F., Rodriguez J.V. Heating and Ionization of the Lower Ionosphere by Lightning // Geophysical Research Letters. 1991, V. 18, No 4, pp. 705–708.
- [16] Marshall R.A., Da Silva C.L., Pasko V.P. Elve Doublets and Compact Intracloud Discharges // Geophysical Research Letters. 2015, V. 42, No 14, pp. 6112–6119.
- [17] Barghini D. et al. UV Telescope TUS onboard Lomonosov Satellite: Selected Results of the Mission // Advances in Space Research. 2021.
- [18] Chen A.B. et al. Global Distributions and Occurrence Rates of Transient Luminous Events // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2008, V. 113, No A8.
- [19] Sato M. et al. Global Occurrence Rates and Their LT/Monthly/Seasonal Variations of Lightning, Elves, and Sprites Derived from JEM-GLIMS Observations // AGU Fall Meeting Abstracts. 2016, V. 2016, P. AE33B-0443.
- [20] Marcelli L. et al. Observation of ELVES with Mini-EUSO Telescope on board the International Space Station // arXiv preprint arXiv: 2112.08004. 2021.