

*В. М. Гребенюк, А. А. Гринюк, М. В. Лаврова,  
А. В. Ткаченко, Л. Г. Ткачев*

## Космический детектор ТУС

Измерение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ)  $E \sim 10^{20}$  эВ (в 1000 раз больше энергии ускорителя ЛHC!) и поиск источников КЛПВЭ является одной из важнейших задач современной астрофизики высоких энергий. Несмотря на многолетние исследования широких атмосферных ливней (ШАЛ), образованных частицами КЛПВЭ, основные вопросы физики КЛПВЭ остаются открытыми, прежде всего из-за недостаточной статистики существующих экспериментальных данных вследствие малости их потока ( $\sim 1$  частица на  $100 \text{ км}^2$  за 100 лет), а также их противоречивости. В связи с этим особый интерес представляют проекты новых исследований ШАЛ от частиц КЛПВЭ с борта космического аппарата на орбите спутника Земли. Важным преимуществом такого детектора является возможность получения данных со всех направлений небесной сферы с помощью одной и той же установки и методики, а также возможность одновременного измерения флуоресцентного и черенковского сигнала ШАЛ. Детектор ТУС является первой установкой для измерения флуоресцентного и черенковского излучений ШАЛ, рождаемых частицами КЛПВЭ, с космической орбиты. Он запущен 28 апреля 2016 г. на солнечно-синхронную орбиту с космодрома «Восточный» на борту

---

*V. M. Grebenyuk, A. A. Grinyuk, M. V. Lavrova,  
A. V. Tkachenko, L. G. Tkachev*

## TUS Orbital Detector

The measurement of spectrum, composition and anisotropy of Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR)  $E \sim 10^{20}$  eV (1000 times the LHC energy!) and the search for possible UHECR sources are an important part of the particle physics study. Despite years of research of the Extensive Air Showers (EAS), the results in the UHECR physics do not give clear answers to the most important questions, to a large extent the problem is due to a very low UHECR flux ( $\sim 1$  particle per  $100 \text{ km}^2$  over 100 yr) as well as data inconsistency. Thus, the projects of new studies of the UHECR from the satellite in the orbit of the Earth are very interesting. An important advantage of a space detector is the possibility of taking data from different arrival directions of the sky with the same apparatus and the same systematic uncertainties, as well as the possibility of measurement of the fluorescence and the Cherenkov signal of EAS. The TUS detector is the first setup to measure fluorescence and the Cherenkov radiation of EAS produced by particles from the orbit. The TUS was launched on 28 April 2016 on a solar-synchronous orbit from the Vostochny spaceport on-board the “Lomonosov” satellite. The main goal

спутника «Ломоносов». Главной целью космического эксперимента ТУС является исследование космических лучей предельно высоких энергий.

ТУС представляет собой телескоп-рефлектор (рис. 1), состоящий из зеркала-концентратора френелевского типа большой площади ( $2 \text{ м}^2$ ), предназначенного для сбора и фокусировки сигнала ШАЛ на матрицу фотоприемника из  $16 \times 16$  фотоумножителей (ФЭУ), расположенных в фокальной плоскости зеркала. Отбор полезных событий для дальнейшего анализа осуществляет двухуровневая триггерная система.

Регулярный сбор данных происходит с 16 августа 2016 г. с наибольшим приоритетом в отношении режима регистрации ШАЛ. Уже зарегистрировано более 200 000 событий. При поиске КЛПВЭ-событий было найдено большое количество фоновых событий

различного происхождения, которые возникают в атмосфере Земли, такие как вспышки грозовой природы, события типа «эльф». Большую группу фоновых событий (~12%) представляют интенсивные вспышки, развивающиеся за время менее одного такта длительностью 0,8 мкс, источниками которых являются космические частицы с энергиями 100–200 МэВ, проходящие через стеклянные фильтры перед ФЭУ.

Было найдено несколько десятков ШАЛ-кандидатов. Анализ данных ТУС показывает, что большая часть отобранных событий является короткими неподвижными источниками света, в то время как сигнал от ШАЛ распространяется в атмосфере на много километров со скоростью света.

На рис. 2 представлены результаты исследования наиболее убедительных ШАЛ-кандидатов. На верхней

Рис. 1. Слева: схематический вид детектора ТУС на борту спутника «Ломоносов». Справа: запуск спутника «Ломоносов» с космодрома «Восточный»

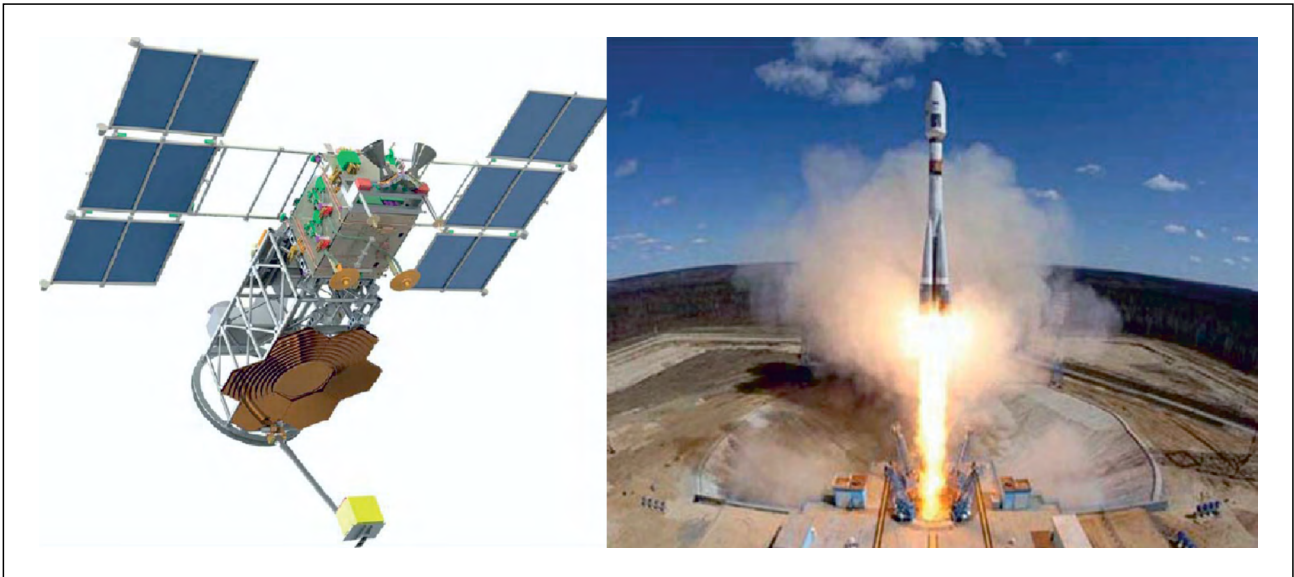


Fig. 1. Left: scheme of the TUS detector on-board the “Lomonosov” satellite. Right: launch of the “Lomonosov” satellite from the Vostochny spaceport

of the TUS space experiment is to study Ultra High Energy Cosmic Rays.

There are two main parts of the detector: a modular Fresnel mirror ( $2 \text{ м}^2$ ), which is designed to collect and focus the EAS signal on photodetector, and a photo receiver matrix with the corresponding DAQ electronics (Fig. 1). The photodetector consists of 16 modules, each of 16 pixels, and the front-end photodetector module board. The TUS trigger system, that consists of two levels, selects the useful events.

The regular data have been received since 16 August 2016 with the highest priority for the EAS mode. More than 200 000 events have been registered. A significant

part of the events in EAS mode are slow flashes of thunderstorm nature and the so-called “elven” events. A large group of events (~ 12%) are instant flashes that develop during  $0.8 \mu\text{s}$  in a group of neighboring pixels arranged in a structure and look like a track. The simulation shows that sources of such events can be protons with energies 100–200 MeV that hit the UV filters.

A few tens of EAS candidates have been found. Analysis of TUS data shows that most of the selected events are short immobile light source, although the signal from the EAS spreads in the atmosphere for many kilometers at the speed of light.

части рисунка схематически показаны матрицы фотодетектора: фиолетовым цветом — неработающие ФЭУ, ШАЛ-кандидату отвечают пиксели разного цвета в соответствии со временем прохождения максимального сигнала. В обоих случаях ШАЛ распространяется справа налево, сверху вниз и уходит за пределы поля зрения. Длина проекции ШАЛ в атмосфере составляет 15–20 км, а их продолжительность 120–140 мкс, как это видно на нижней части рисунка, где приведены

гистограммы сработавших пикселей. С помощью программы реконструкции событий в детекторе ТУС оценены зенитный  $\theta$  и азимутальный  $\varphi$  углы для кандидатов ШАЛ, представленных на рис. 2: левое событие —  $\theta \cong 33^\circ$ ,  $\varphi \cong 225^\circ$ , правое событие —  $\theta \cong 22^\circ$ ,  $\varphi \cong 253^\circ$ .

В настоящее время спутник «Ломоносов» продолжает свой полет, детектор ТУС работает нормально и продолжает набирать данные.

Рис. 2. ШАЛ-кандидаты. Вверху: изображение событий с активными пикселями на матрице ФЭУ. Внизу: стековые гистограммы сработавших пикселей в зависимости от времени после вычитания фона и нормировки на усиление ФЭУ

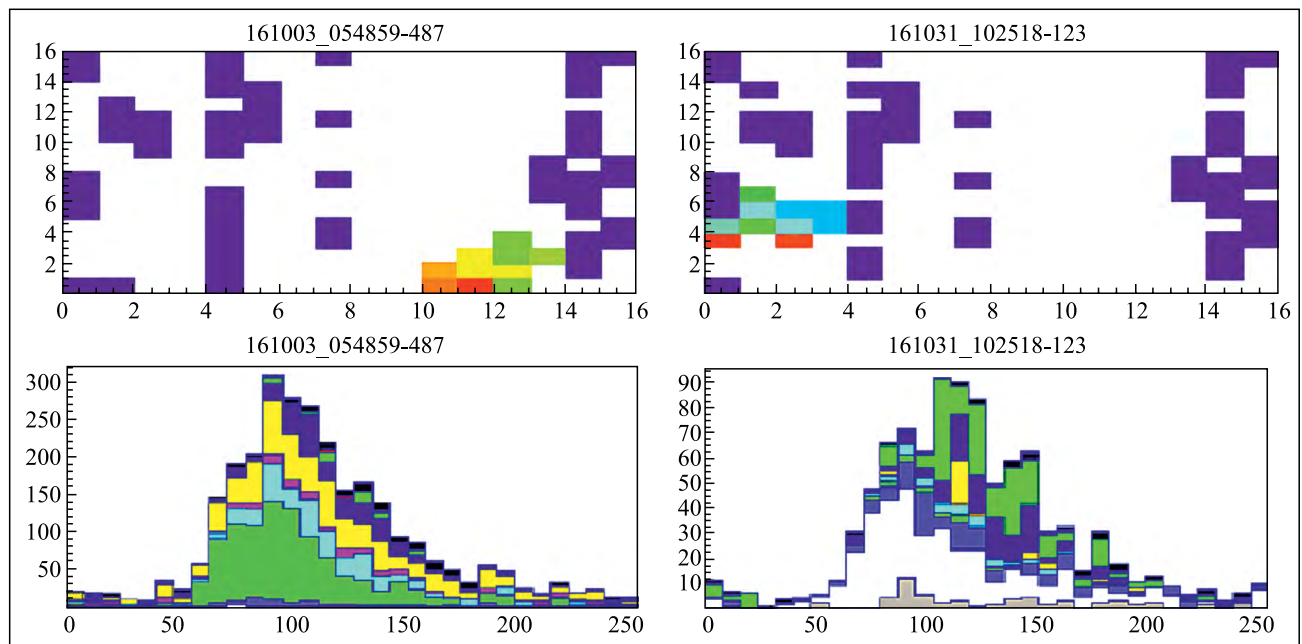


Fig. 2. The EAS candidates. Upper plot — image of events with hit pixels on PMT matrix. Bottom plot — the amplitude variation of time for selected hit pixels (stack histogram)

The results of the research of the best and the most convincing EAS candidates are presented in Fig. 2. In the upper panel of Fig. 2 the photodetector matrix is shown — dead PMT are shown in purple, the pixels of different colors correspond to the EAS candidate in accordance with the time of passage of the maximum signal. In both cases, the EAS spreads from right to left, from top to bottom and extends beyond the field of view. The length of the EAS projection on the ground is 15–20 km and EAS duration is about 120–140  $\mu\text{s}$ , as follows from the stack histogram. Using the program of reconstruction of events in the TUS detector, the zenith and azimuth angles for the EAS candidates in Fig. 2 are calculated: the left event  $\theta \cong 33^\circ$ ,  $\varphi \cong 225^\circ$ , right event  $\theta \cong 22^\circ$ ,  $\varphi \cong 253^\circ$ .

At present, the “Lomonosov” satellite continues its flight; the TUS detector is operating normally and continuing to take data.

### Список литературы / References

1. *Garipov G. K.* // Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. P. 326.
  2. *Grebnyuk V. M.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 5. P. 579.
  3. *Grinyuk A. A.* // Astropart. Phys. 2017. V. 90. P. 93.
  4. *Klimov P. A.* // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. P. 1687.
  5. *Климов П. А.* // Изв. РАН. Сер. Физ. 2017. Т. 81, вып. 4. С. 442.
- Klimov P. A.* // Izv. Akad. Nauk. Ser. Fiz. 2017. V. 81, No. 4. P. 442.