



Лаборатория космических лучей  
предельно высоких энергий НИИЯФ МГУ



# Результаты исследования транзиентного свечения атмосферы: в Заполярье, горах Армении и с орбиты Земли.

Климов П.А.

от лаборатории космических лучей предельно высоких энергий ОКН

Конференция НИИЯФ МГУ по итогам 2024 года

24.02.2025

## Заполярье

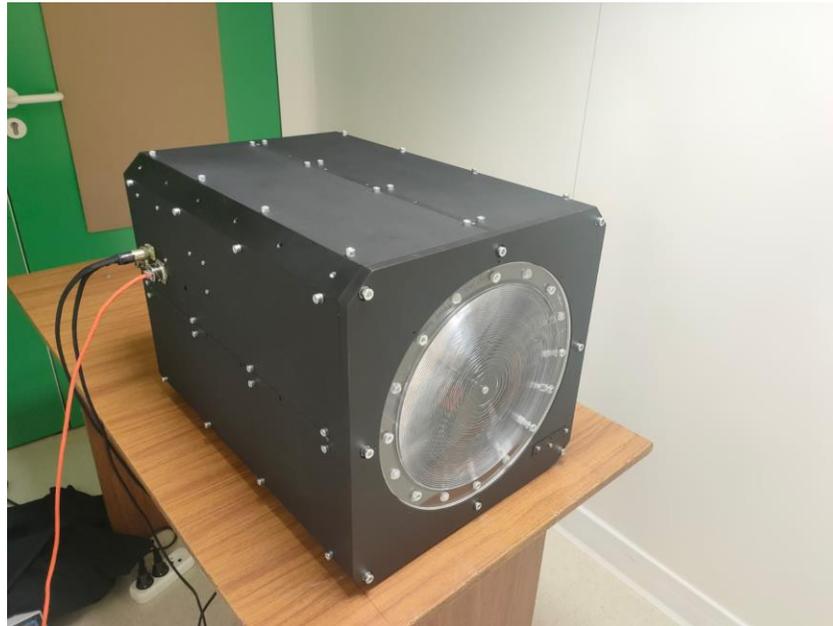
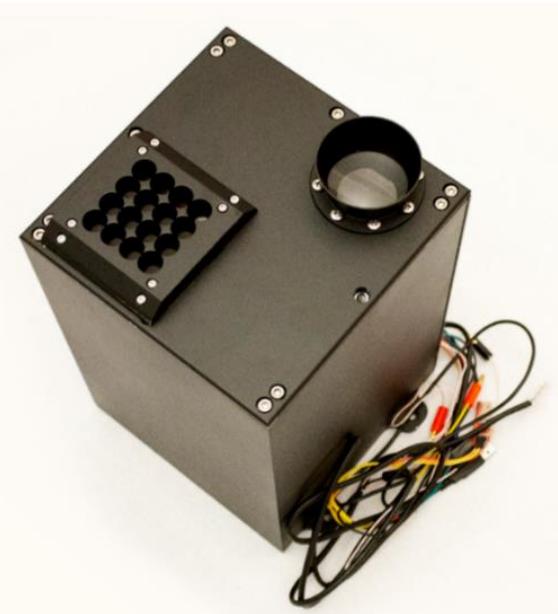
- Klimov, P. A., Nikolaeva, V. D., Saraev, R. E., Shchelkanov, K. D., Belov, A. A., Kozelov, B. V., ... & Sharakin, S. A. (2024). Microbursts of the UV atmospheric emission in the auroral zone. *Advances in Space Research*, 74(8), 3556-3568.
- Klimov, P., Nikolaeva, V., Shchelkanov, K., Saraev, R., Sigaeva, K., Kotikov, A., ... & Roldugin, A. (2024). Optical measurements of precipitating relativistic electron microbursts during geomagnetic disturbance and pulsating aurora. *Advances in Space Research*.

## Арагац

- Belov A.A., Klimov P.A., Murashov A.S., Nikolaeva V.D., Saraev R.E., Sigaeva K.F., Sharakin S.A., Shchelkanov K.D., Trofimov D.A., Zotov M.Yu., Imaging near-UV photometer as an effective instrument for high energy physics of atmosphere, magnetosphere and cosmic rays Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration (TEPA-2024)

## МКС

- Sharakin, S., Barghini, D., Battisti, M., Belov, A., Bertaina, M., Bianciotto, M., ... & Zotov, M. (2024). ELVES Measurements in the “UV Atmosphere”(Mini-EUSO) Experiment Onboard the ISS and Their Reconstruction. *Cosmic Research*, 62(4), 330-338.
- Bertaina, M., Bertone, S., Bisconti, F., ... & Zotov, M. (2024). Observation of meteors from space with the Mini-EUSO detector on board the International Space Station. *Astronomy & Astrophysics*, 687, A304.



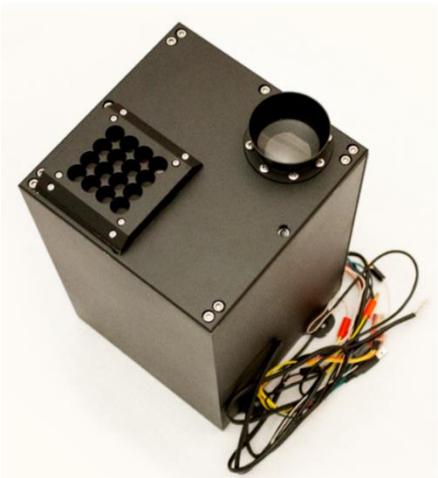
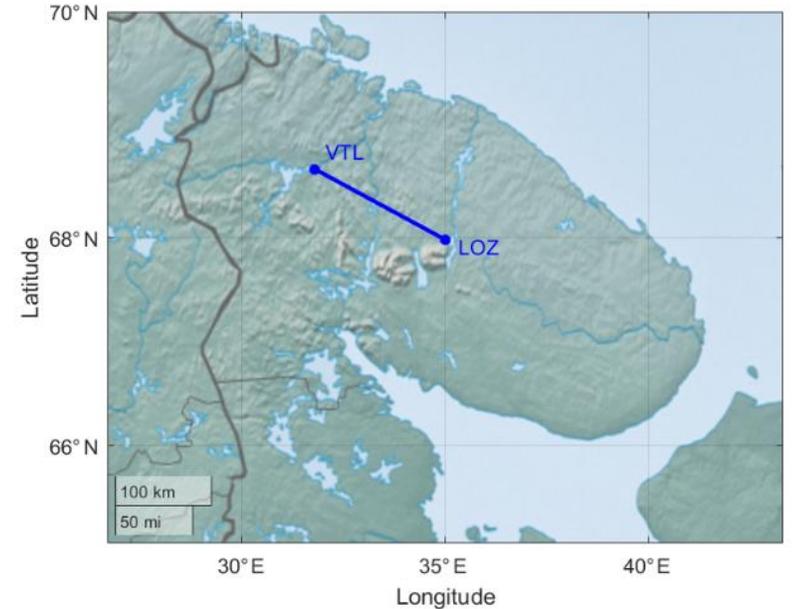
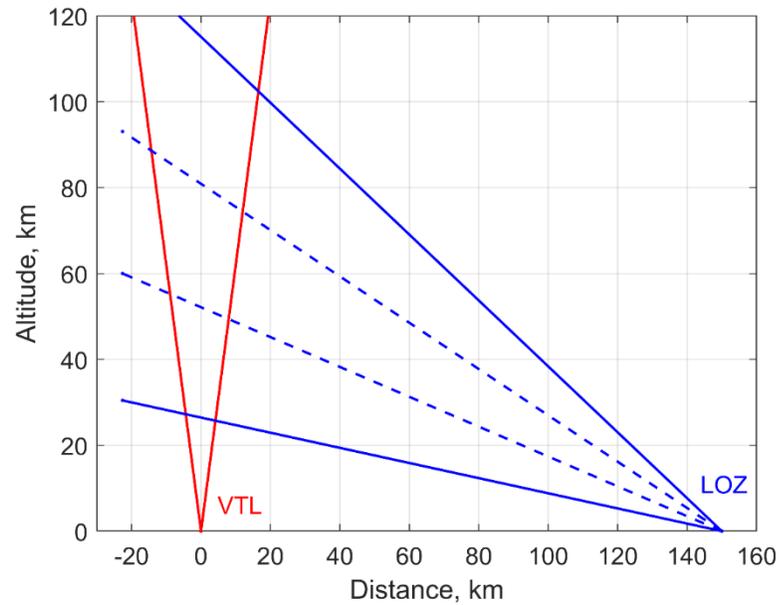
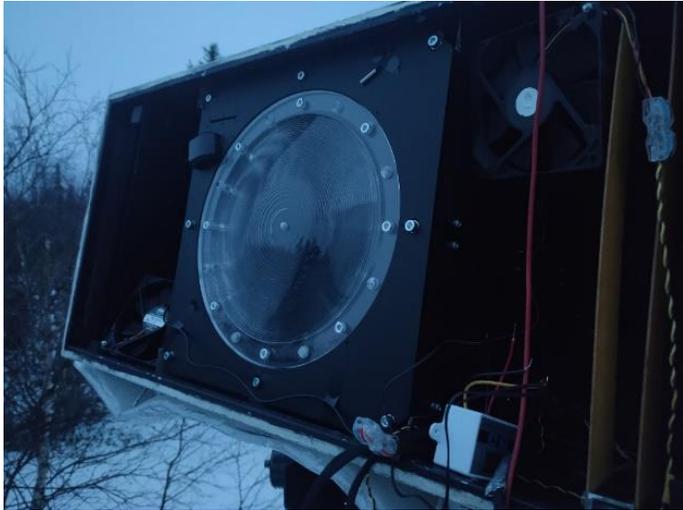
- ✓ 4 МАФЭУ ( $16 \times 16$  пикселей), счетный режим
- ✓ Временное разрешение: 2.5 мкс, 320 мкс, 1 мс
- ✓ Поле зрения:  $2\gamma_m = 18^\circ$
- ✓ Угловое разрешение:  $\Delta\gamma = a/f = 19 \text{ мрад} = 1.1^\circ$
- ✓ Площадь входного зрачка:  $S = 19.6 \text{ см}^2$

### Спектрометр:

- ✓ 16 ФЭУ, режим постоянного тока, со светофильтрами (337 нм, 390 нм, 430 нм, широкополосные УФС1 и КС11).

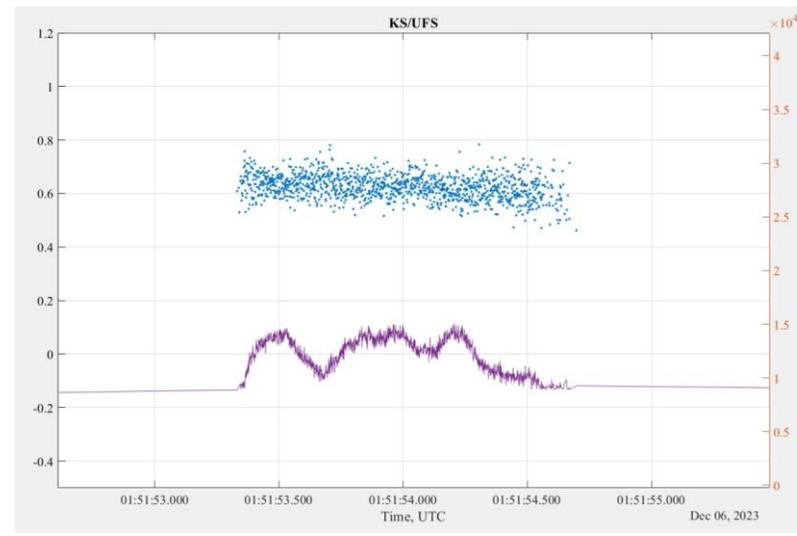
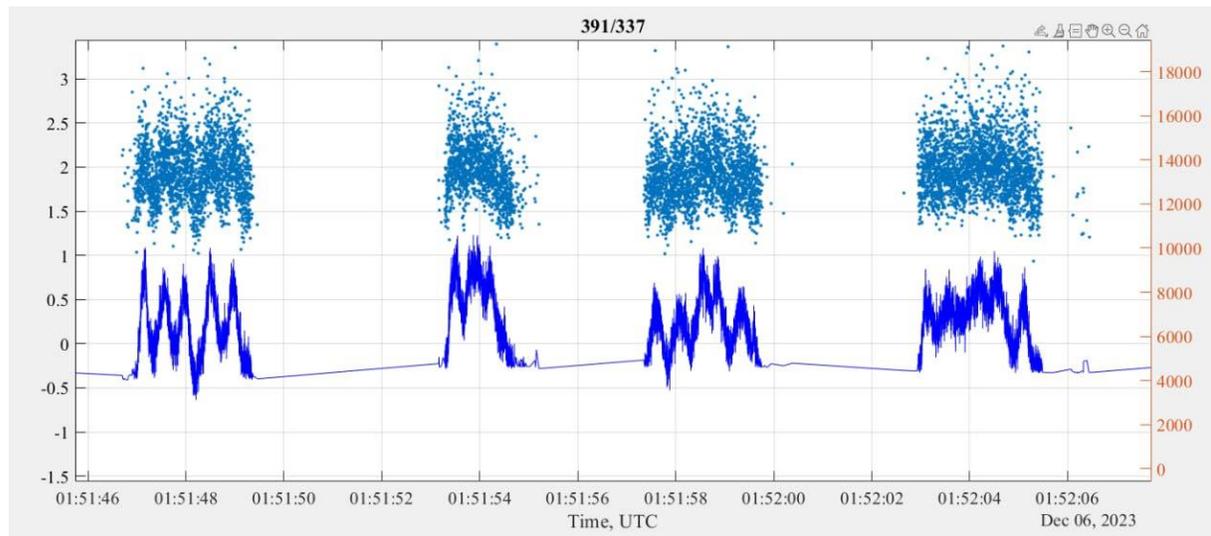
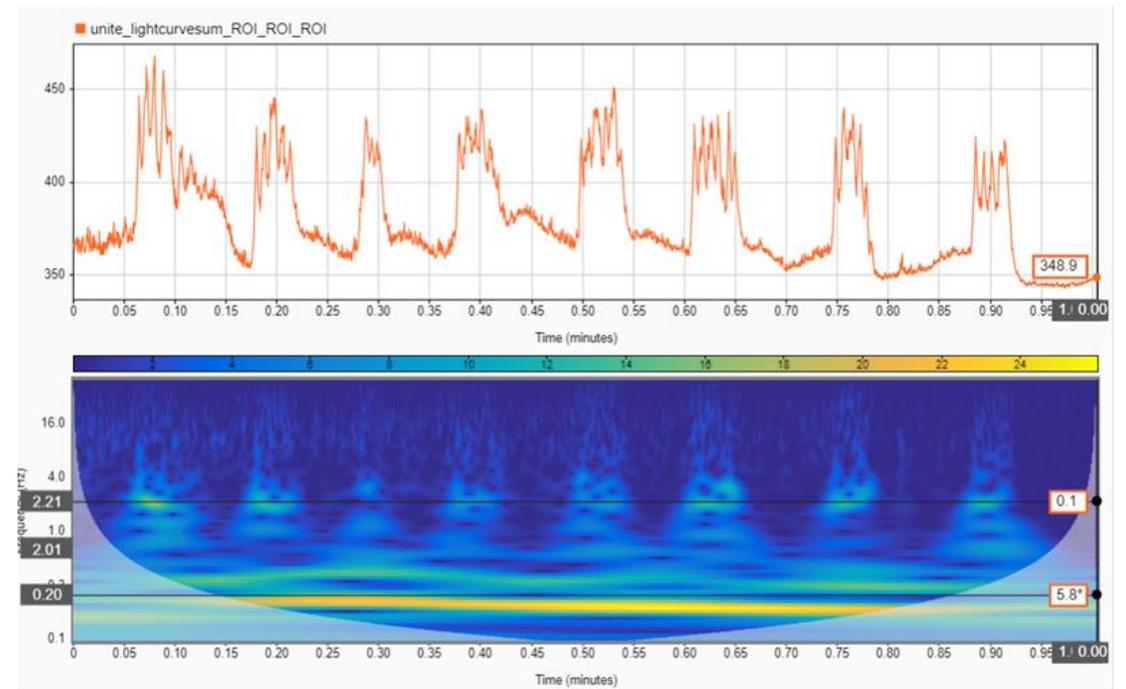
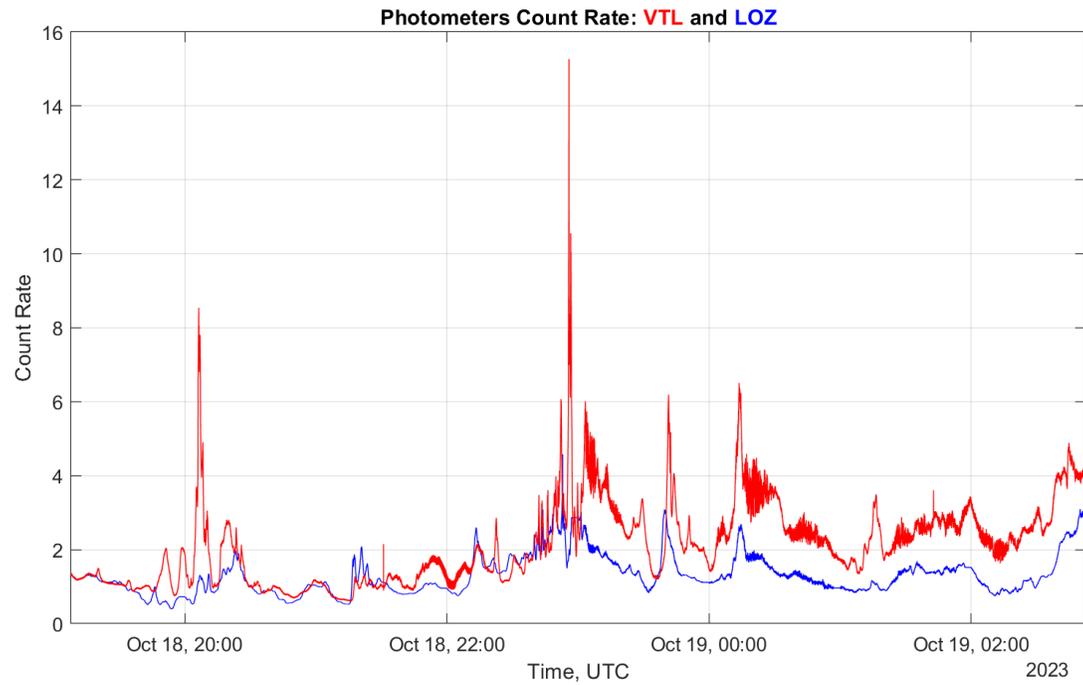
- ✓ 12 (36) МАФЭУ,  $16 \times 48$  ( $48 \times 48$ ) пикселей, счетный режим
- ✓ Временное разрешение: 2,5 мкс, 320 мкс, 1 мс, 41 мс.
- ✓ Поле зрения:  $2\gamma_m = 40^\circ$
- ✓ Угловое разрешение:  $\Delta\gamma = a/f = 15 \text{ мрад} = 0.9^\circ$
- ✓ Площадь входного зрачка:  $S = 490 \text{ см}^2$

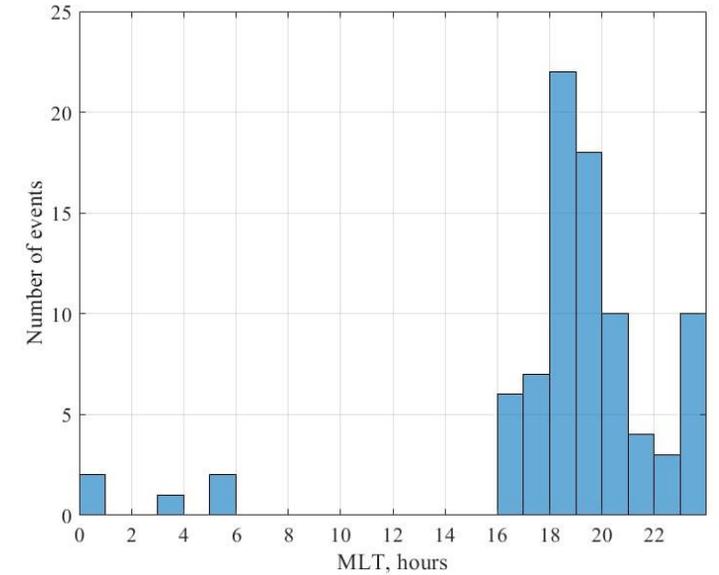
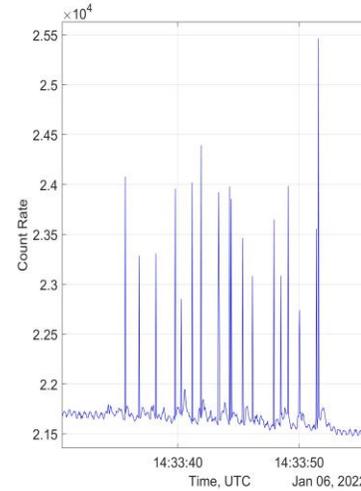
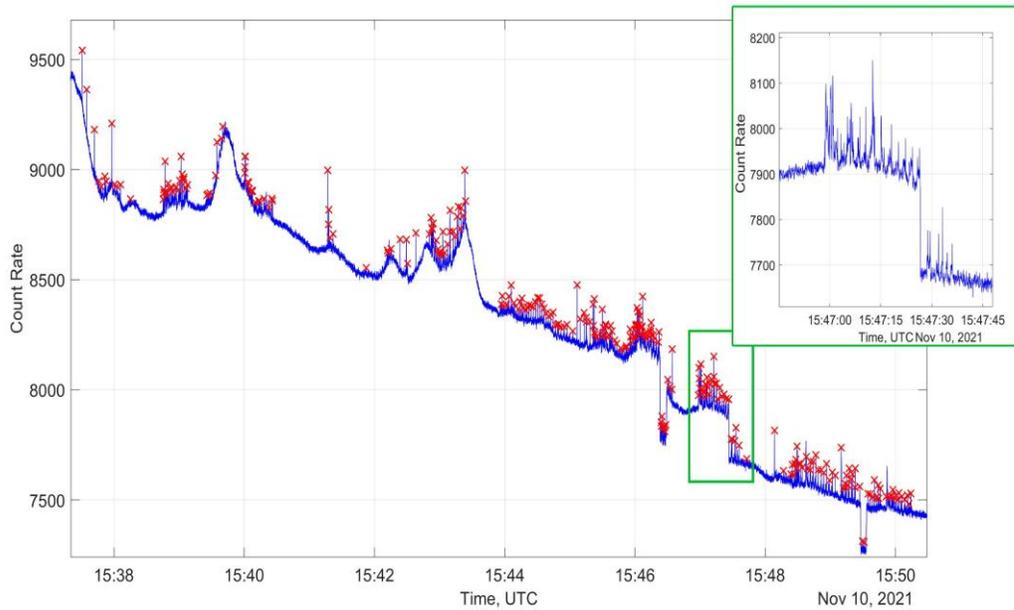
# Проект PAIPS (Pulsating Aurora Imaging Photometers System) – прямое измерение высоты ППС и спектральных особенностей излучения



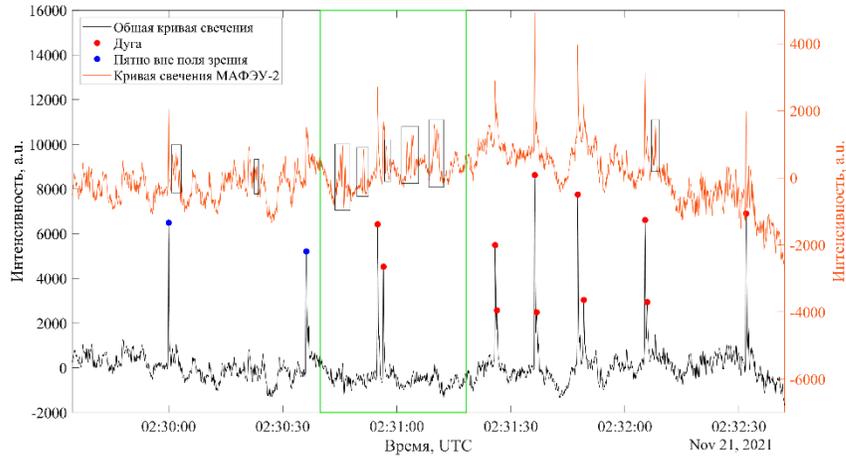
Два высокочувствительных фотометра на расстоянии 150 км в обсерваториях «Верхнетуломский» и «Ловозеро» для стереометрических измерений атмосферных пульсаций в ближнем УФ диапазоне с высоким временным разрешением.

# Пример измерения временной структуры сияний. Пульсации.

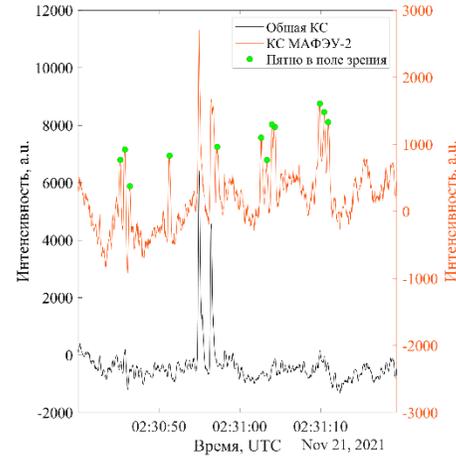




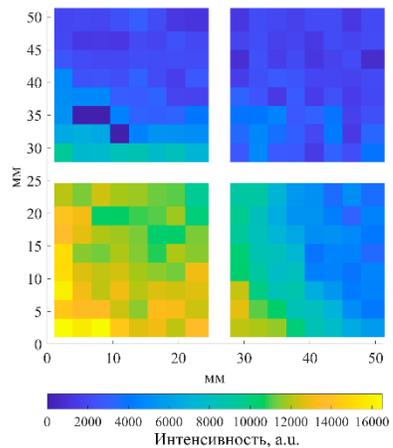
- За 3 сезона работы зарегистрировано 75 групп микровсплесков. Микровсплески измеряются сериями длительностью от 10 с до ~1 часа.
- Каждый импульс имеет сложную структуру. Временной интервал между импульсами не является постоянным и варьируется в диапазоне от 100 мс до 5 с.
- Типичная амплитуда составляет около 500–1000 отсчетов, что примерно соответствует интенсивности излучения на входном окне  $10^4$ – $10^5$  фотон/см<sup>2</sup> ср с.
- Микровсплески наблюдаются в основном в период низкой геомагнитной активности (средний индекс  $K_p$  1+).
- Микровсплески наблюдаются в вечернем секторе MLT. Вероятный эффект выборки событий или определяется физическим механизмом генерации?



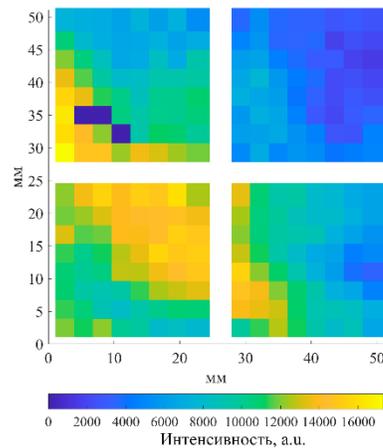
а



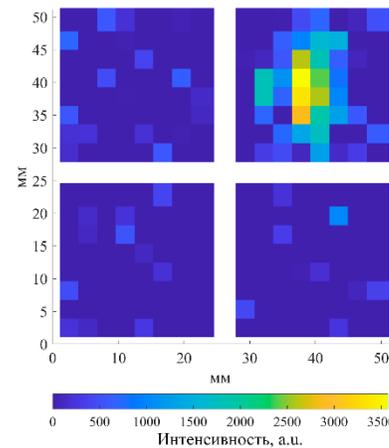
б



в

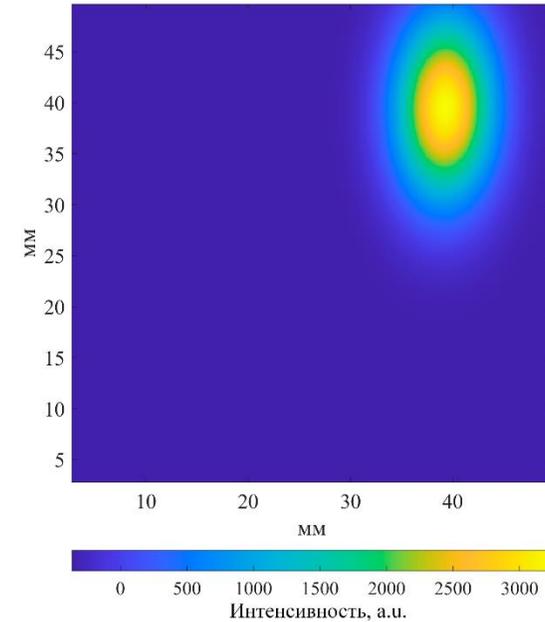


г



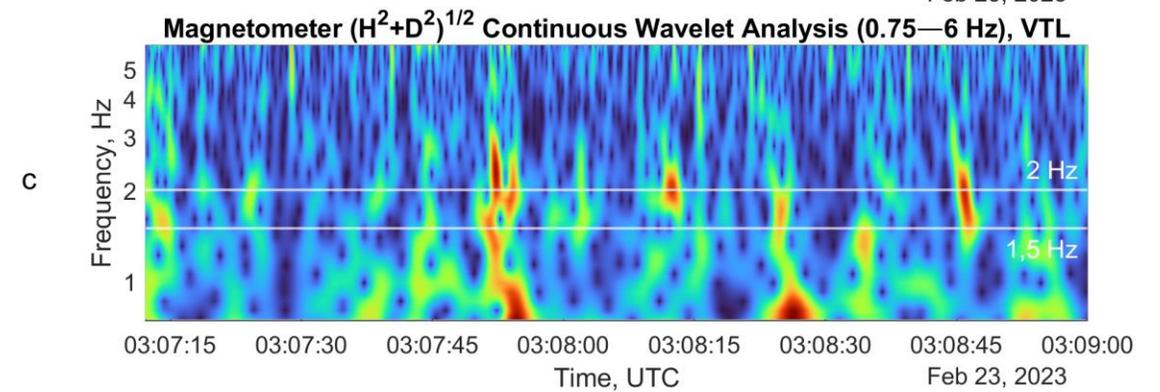
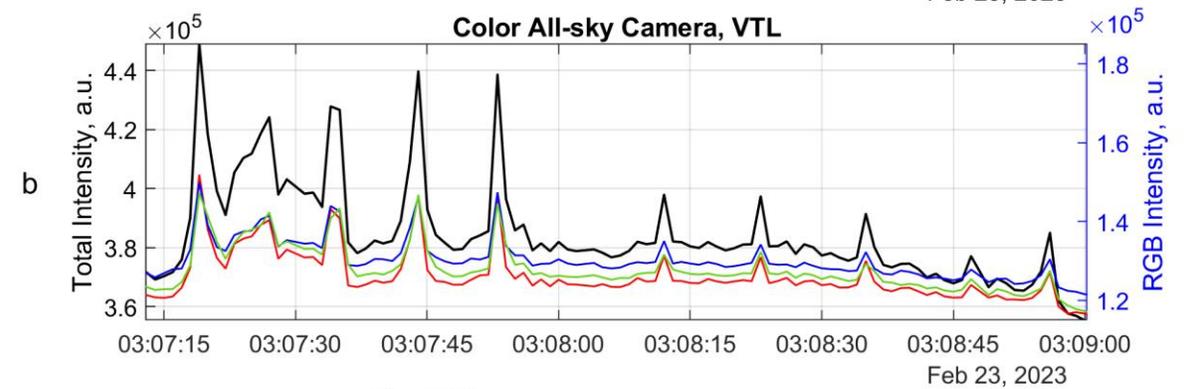
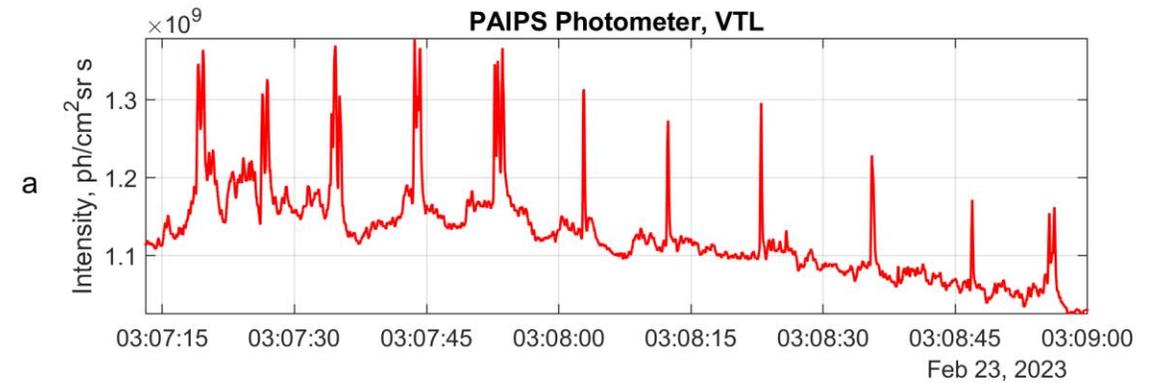
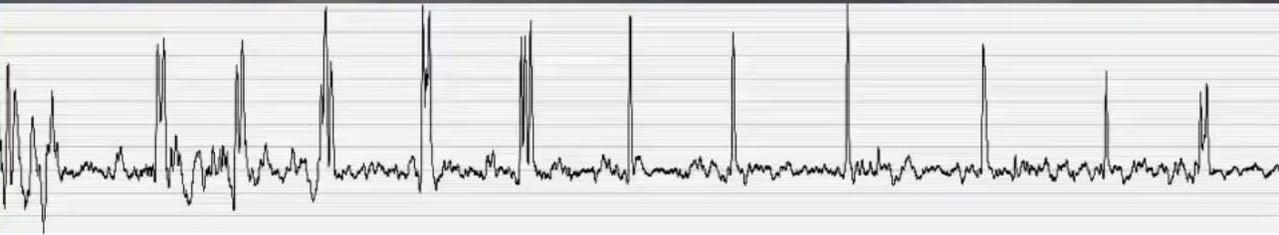
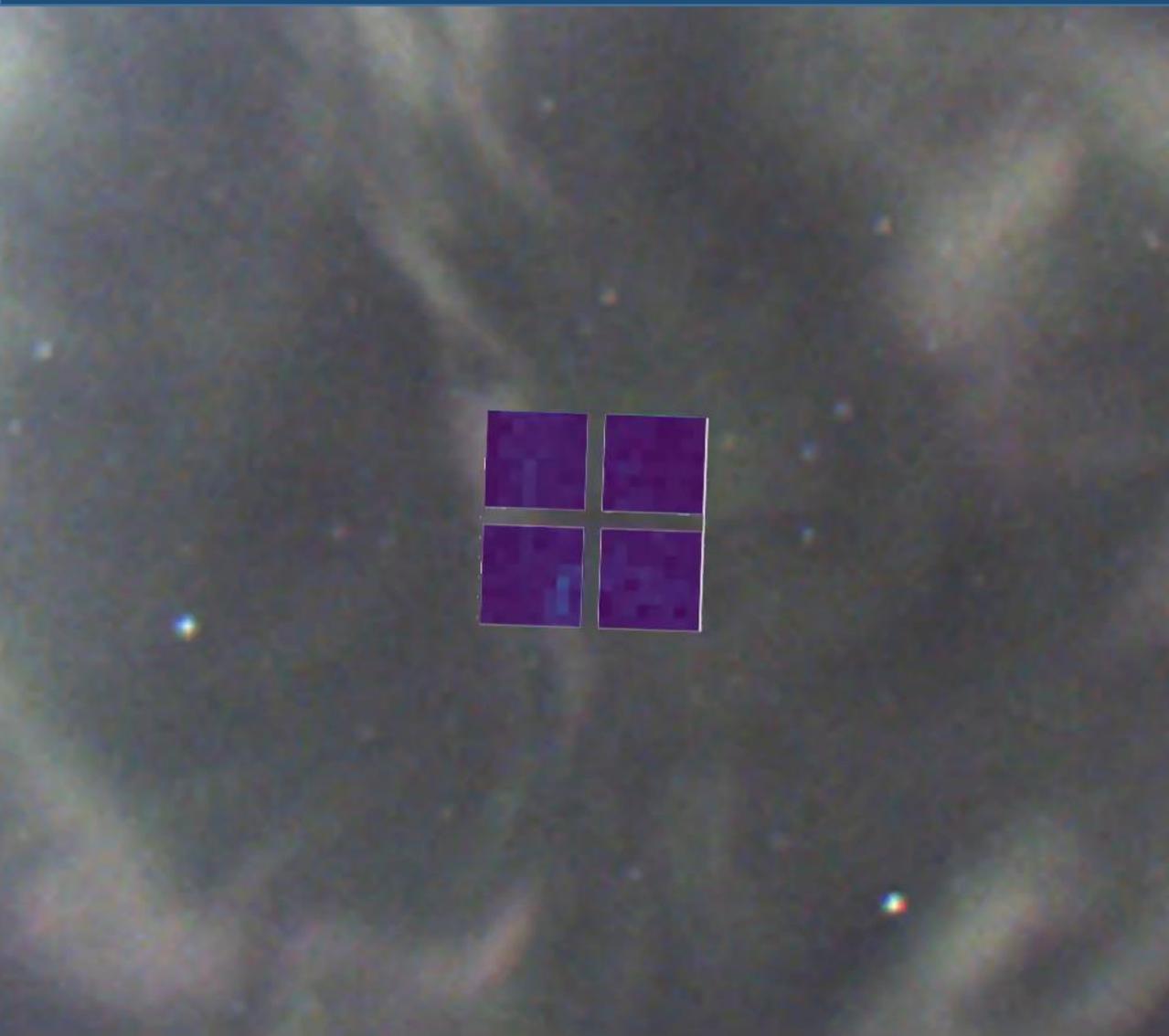
д

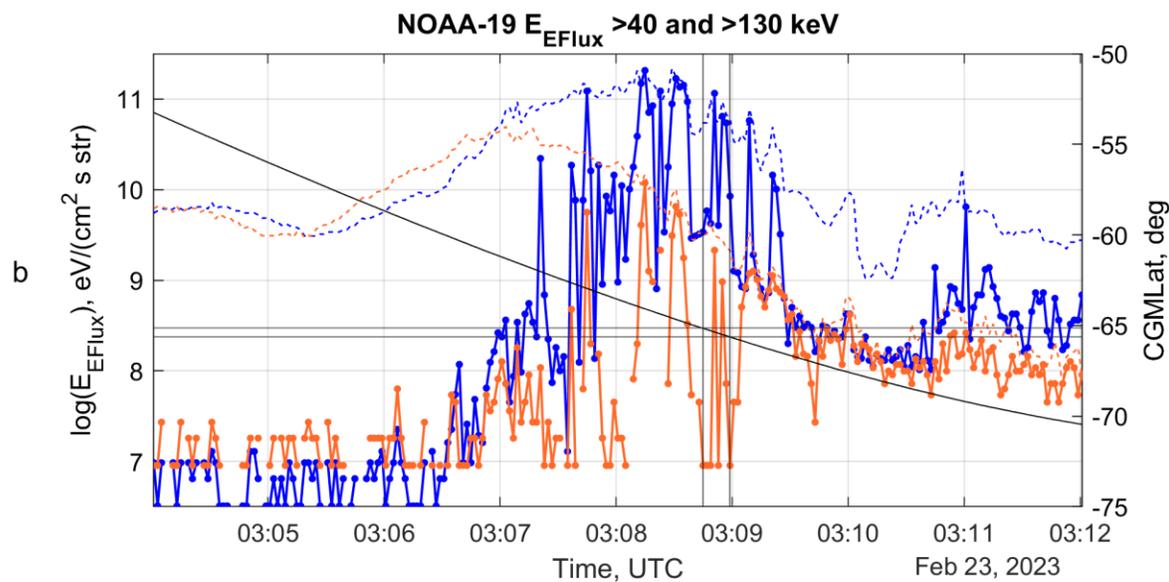
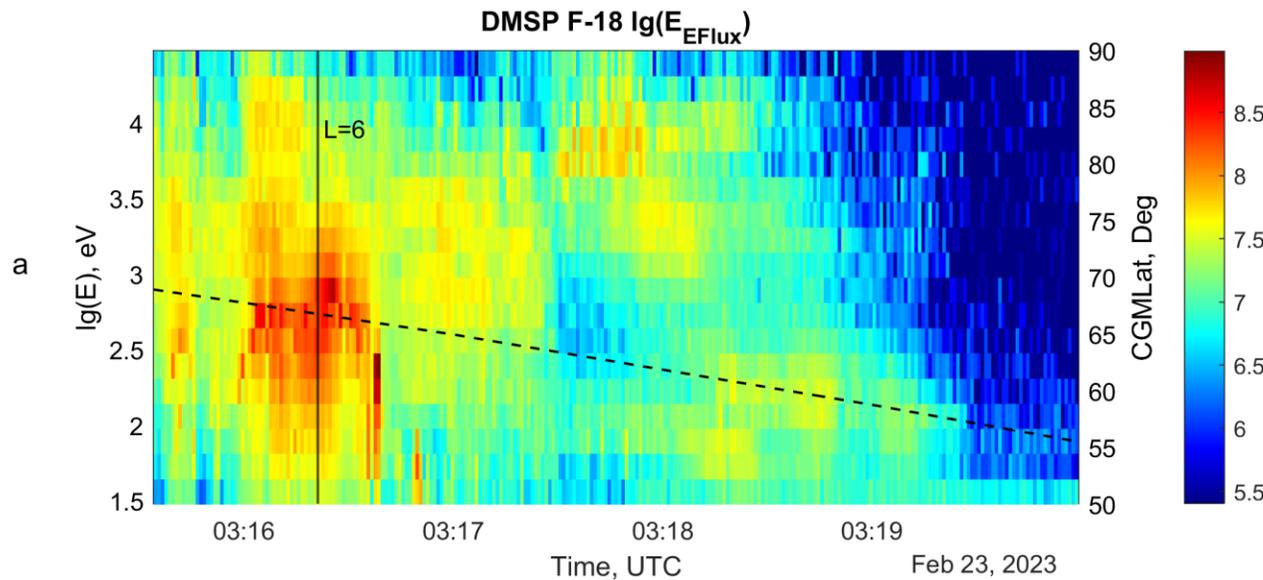
Аппроксимация двумерной функцией Гаусса распределения сигнала по матрице фотоприемника в максимуме локального микровсплеска



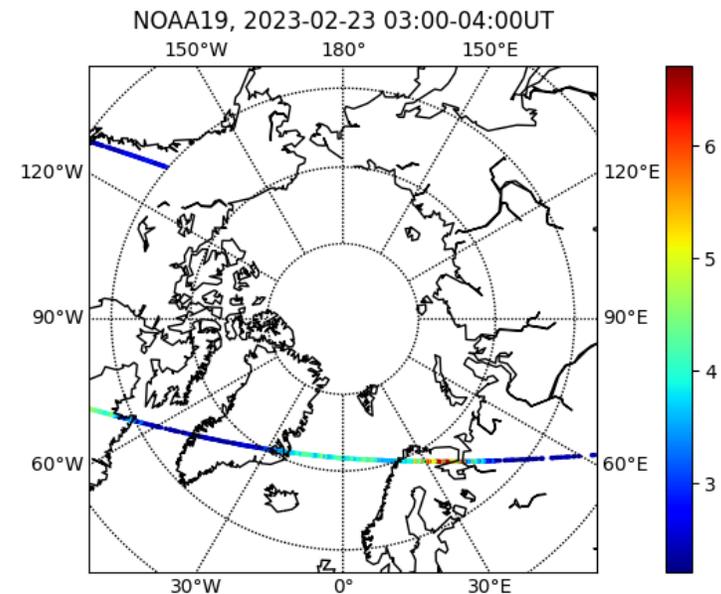
Угловой размер пятна составляет  $\sim 80$  мрад, что соответствует области  $\sim 10$  км на высоте 100 км.

(а): временная структура серии УФ-микровсплесков 21.11.2021. Синие точки — вспышки вне поля зрения, красные точки — микровсплески в виде дуги; (б): временная структура фрагмента сигнала, обведенного зеленым прямоугольником на панели (а), зелеными точками обозначены микровсплески в виде пятен; (в): карта каналов для яркого пятна вне поля зрения прибора; (г): карта каналов для дуги; (д): карта каналов для локального пятна в поле зрения фотометра.

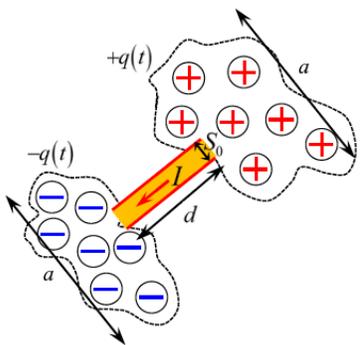
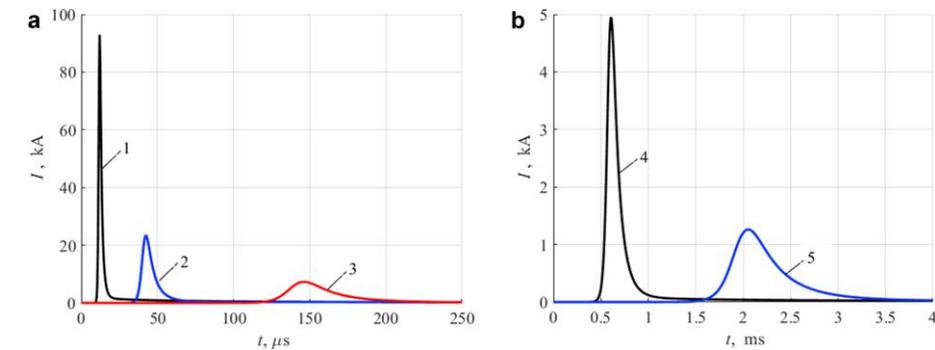
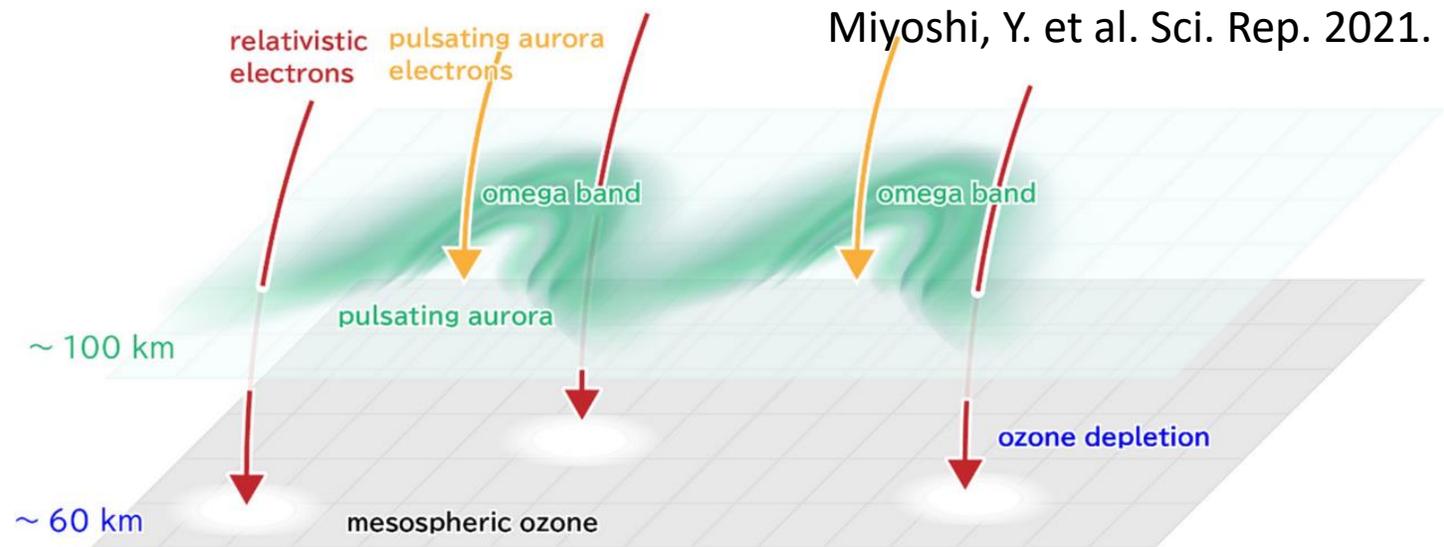




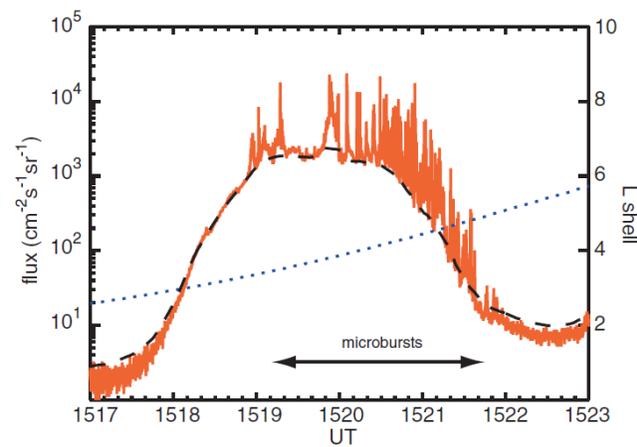
- Траектория спутника NOAA-19 пересекала те же линии геомагнитного поля, что и в VTL, но в южном полушарии.
- Повышенная интенсивность наблюдается как минимум для 3 интегральных каналов ( $>40$  кэВ,  $>130$  кэВ и  $>287$  кэВ), как в квазизахваченных, так и в высыпающих потоках электронов. Таким образом, УФ-микровсплески измеряются в области изотропизации потока высокоэнергетических электронов с интенсивным высыпанием.



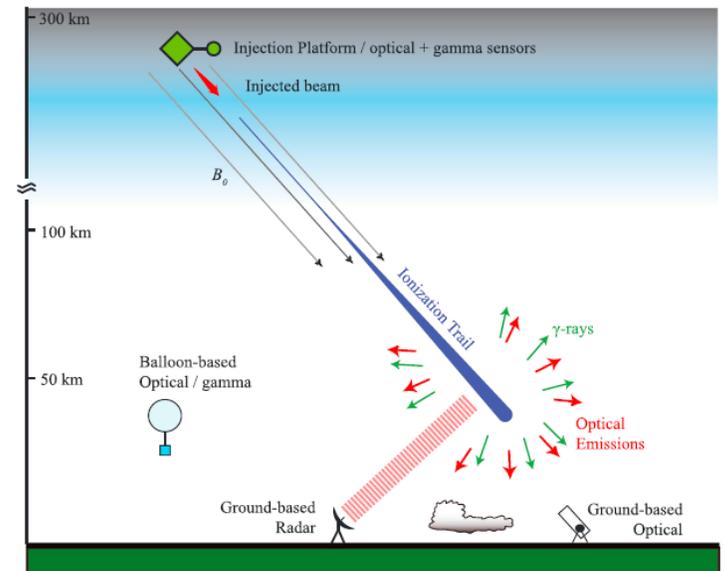
- ✘ Антропогенные вспышки.
- ✘ Вспышки, рассеяния внутри облаков.
- ? Мезосферные разряды.
- ✘ Lightning induced electron precipitation.
- ✘ Transmitter-Induced Precipitation of Electron Radiation.
- ? Relativistic electron microbursts.



Surkov V. V. JASTP. – 2020.



Lorentzen, et al. GRL. 2001.



Marshall, R.A. et al. Front. Astron. Space Sci. 2019.

ТЕРА-2010

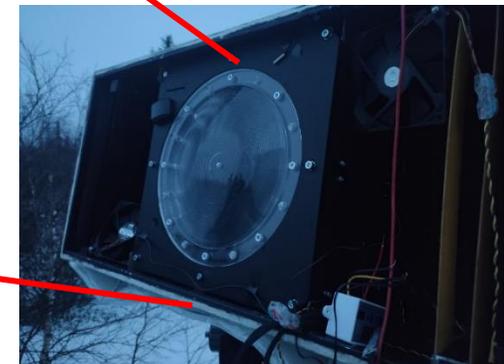
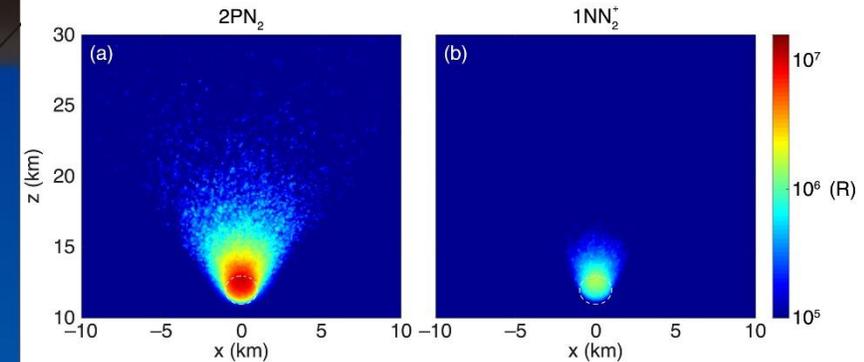
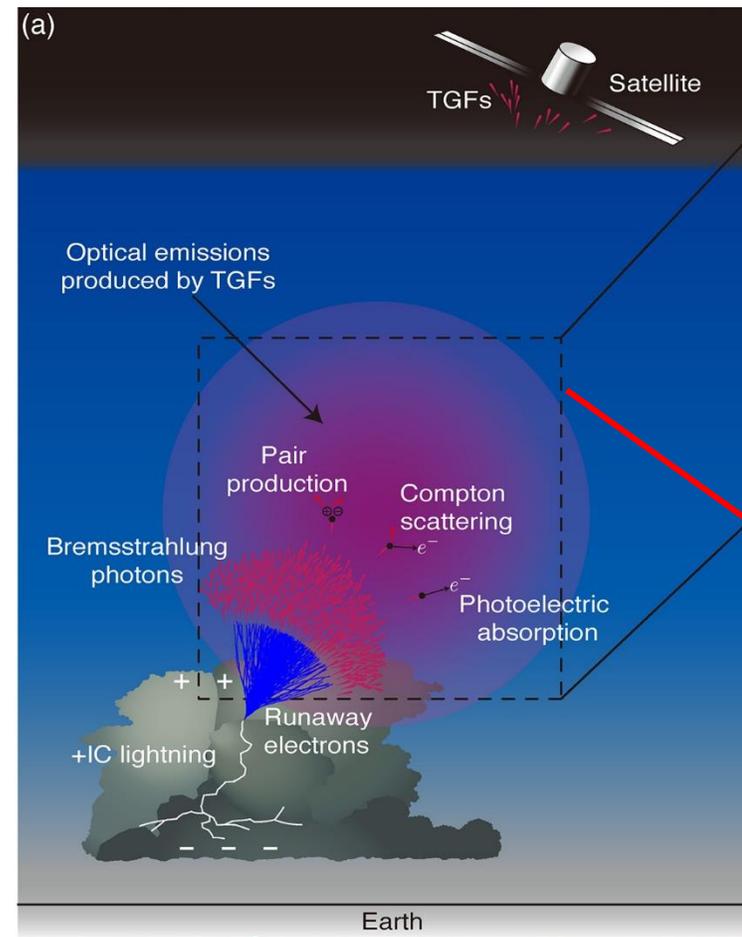


Июнь 2024

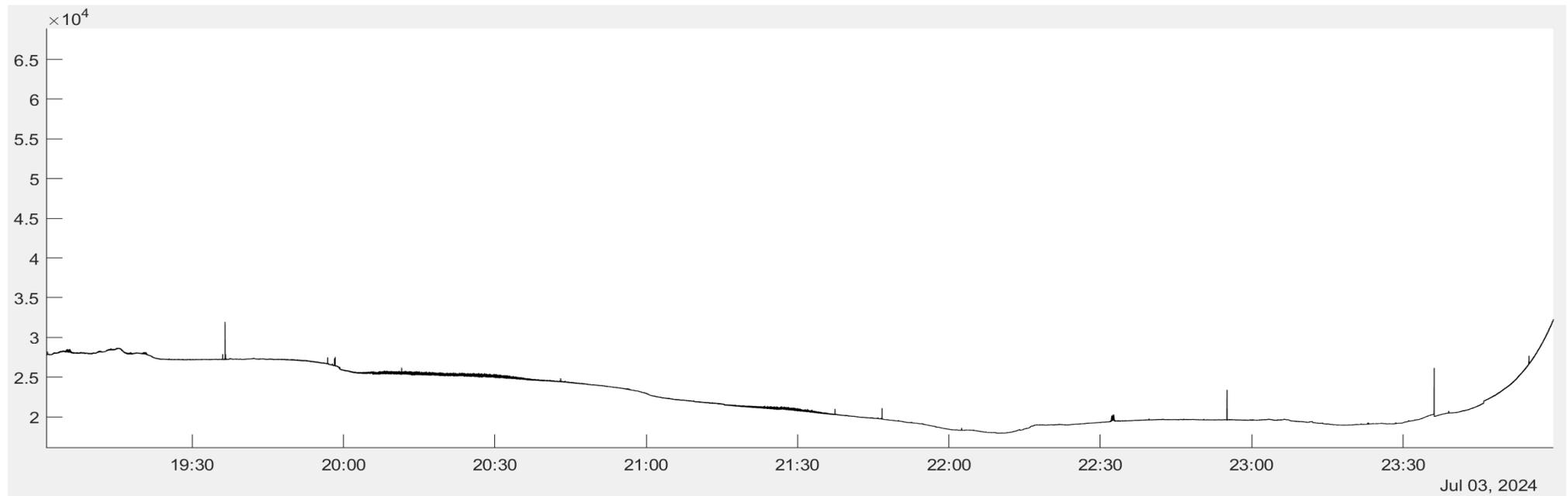
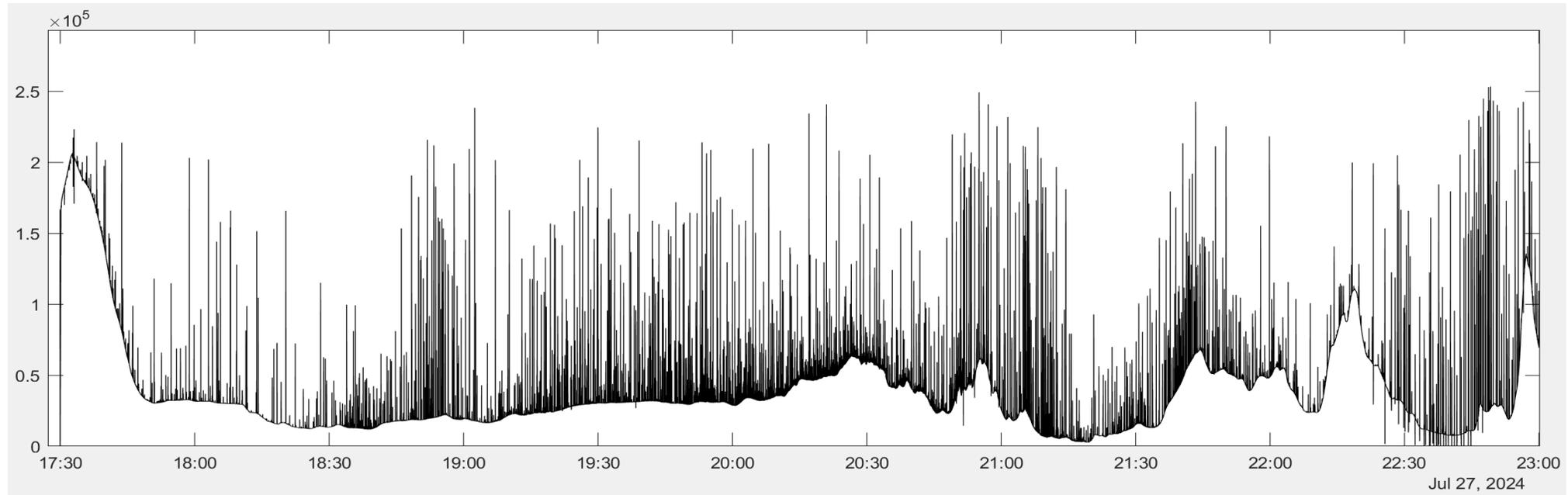
# Measurements of near-UV emission of TGF, EAS and intra-cloud discharges

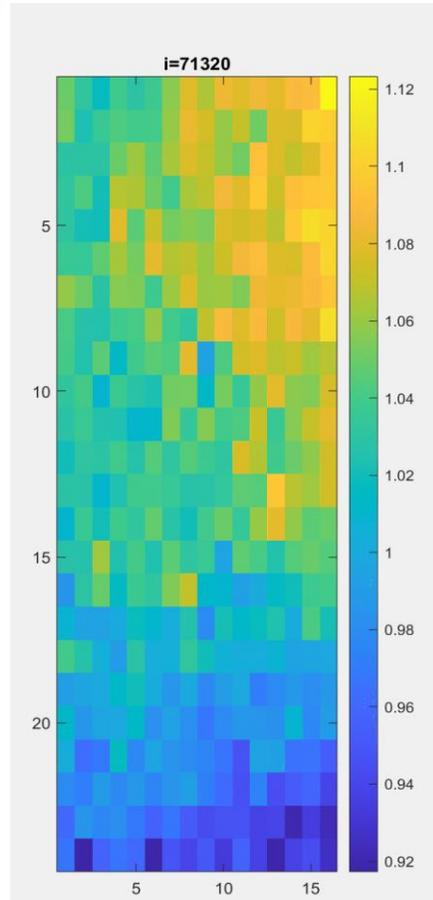
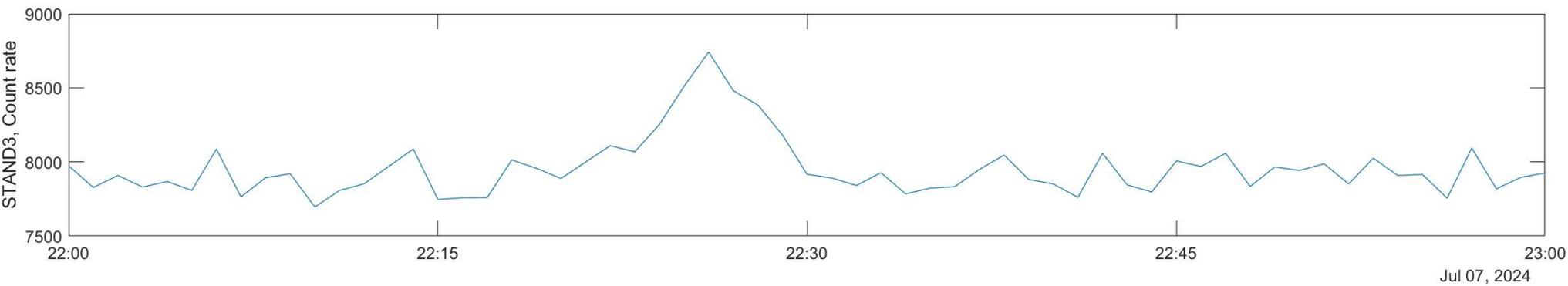
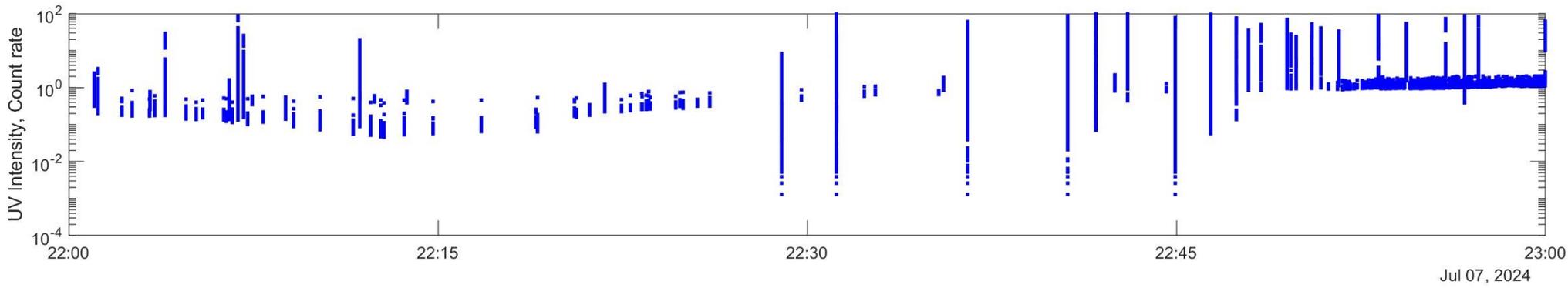
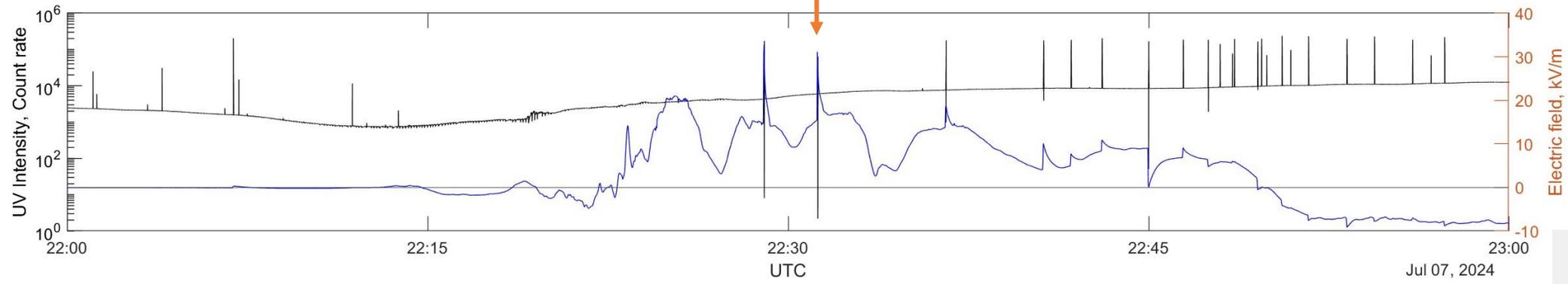
## Scientific tasks

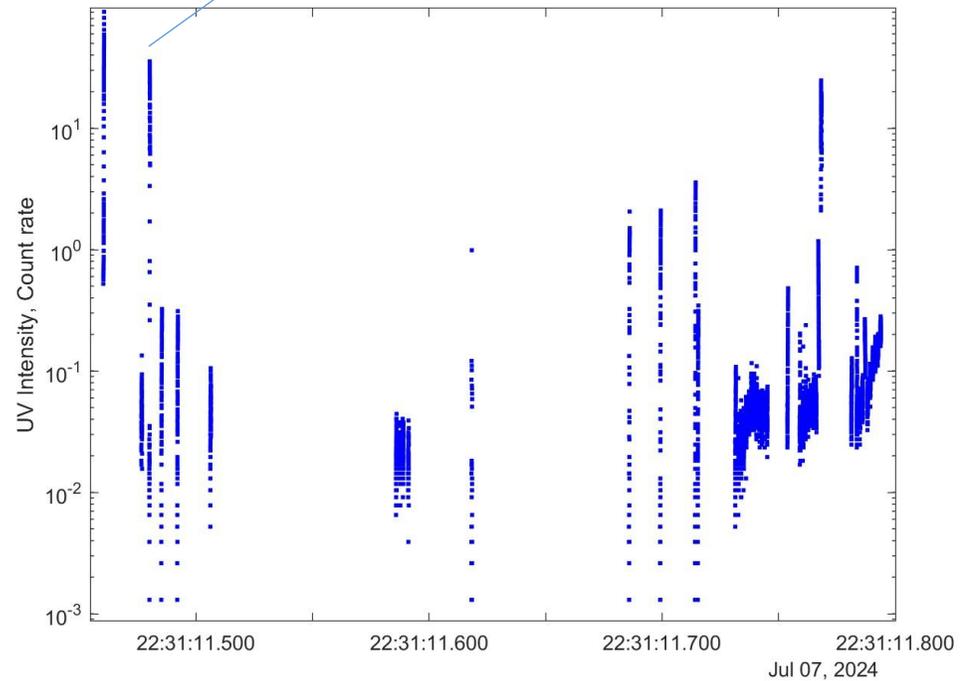
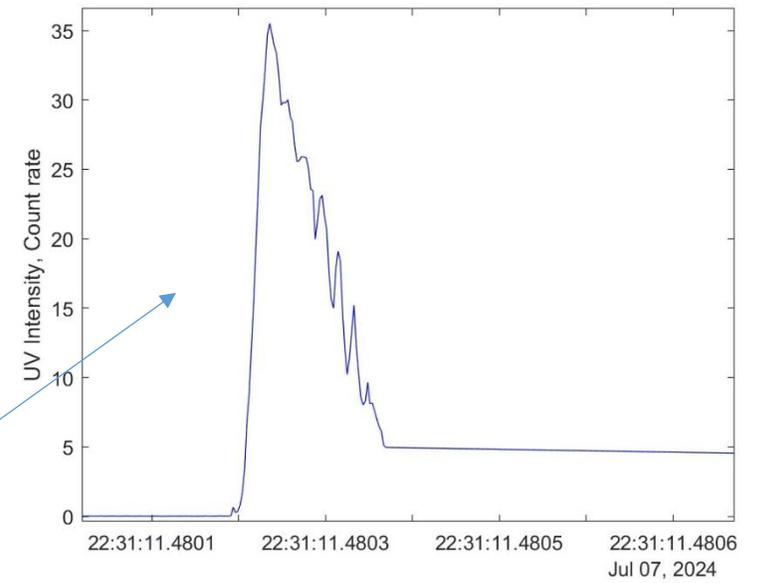
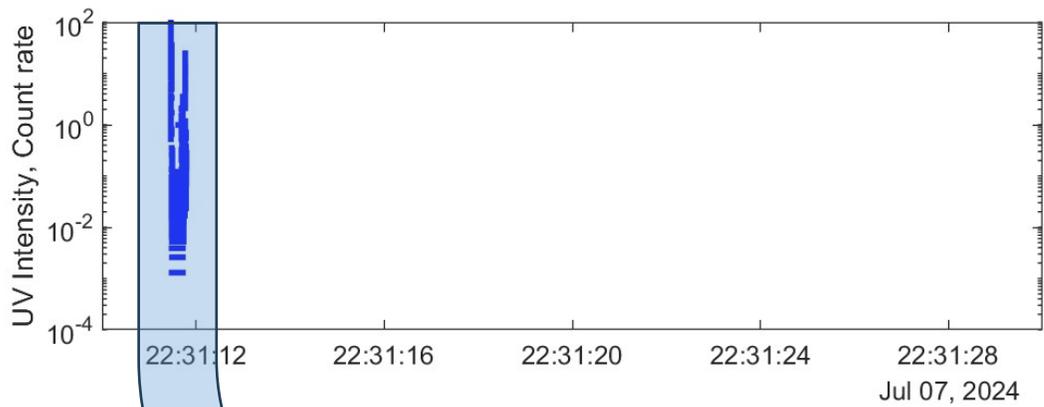
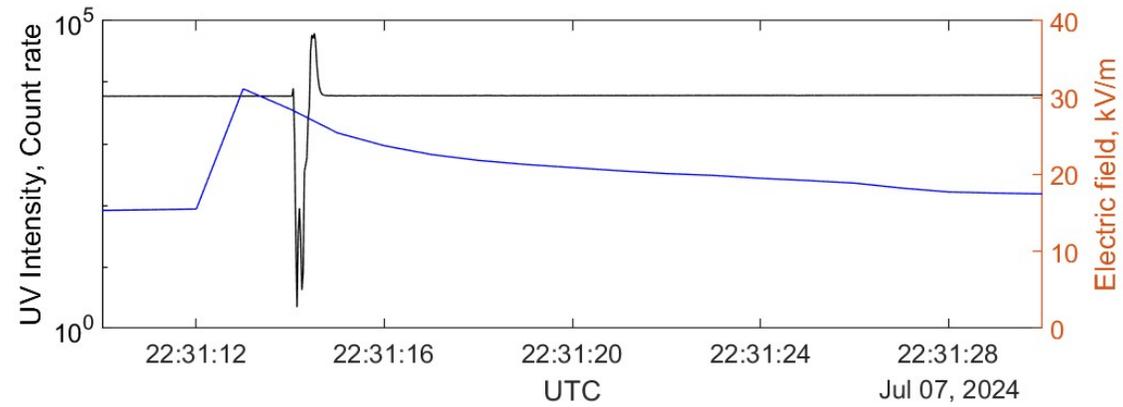
- Study of the near-UV emission related to thunderstorm ground enhancements (TGEs) and terrestrial gamma-ray flashes (TGF) in a wide temporal scale.
- Testing of lens photometer capabilities for registering fluorescence radiation from extensive air showers (EASs).
- Measurements of near-UV background conditions on the Aragats mountain
- Probing of the possible EAS and lightning relations
- Measurements of fluorescent TGF emission
- Study the EAS fluorescent signal in a thunderstorm region characteristics and peculiarities
- Search for a possible EAS from relativistic dust grains (TUS-like events)

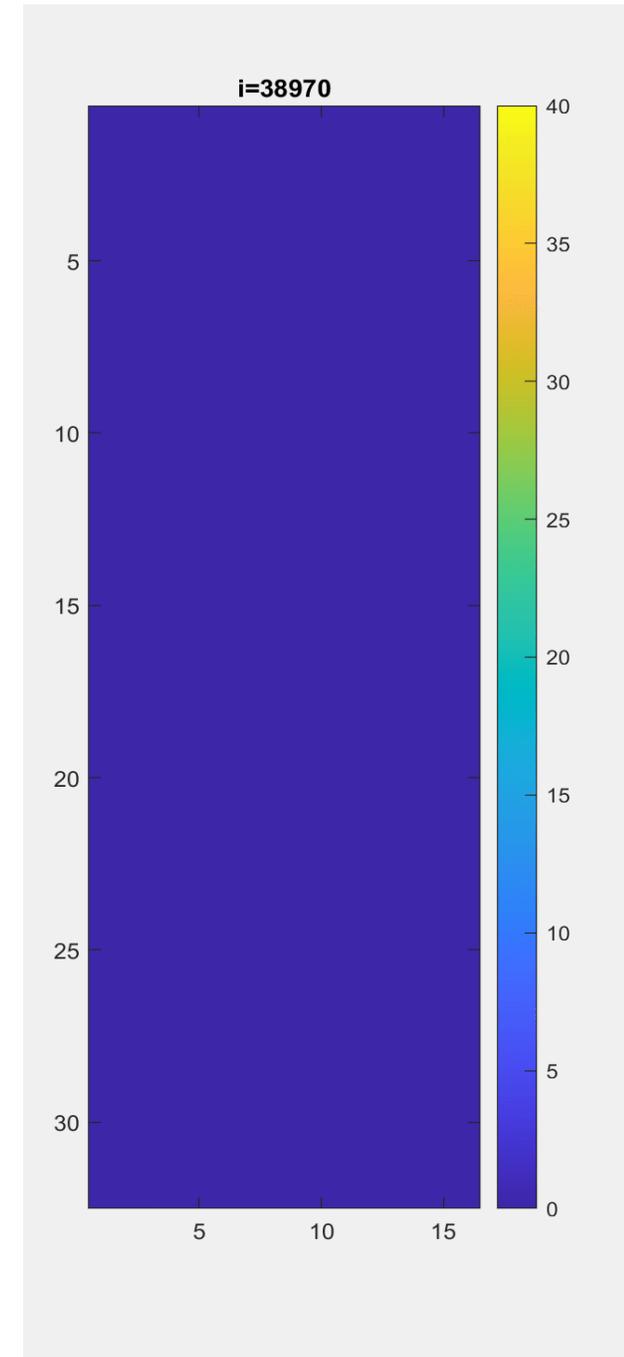
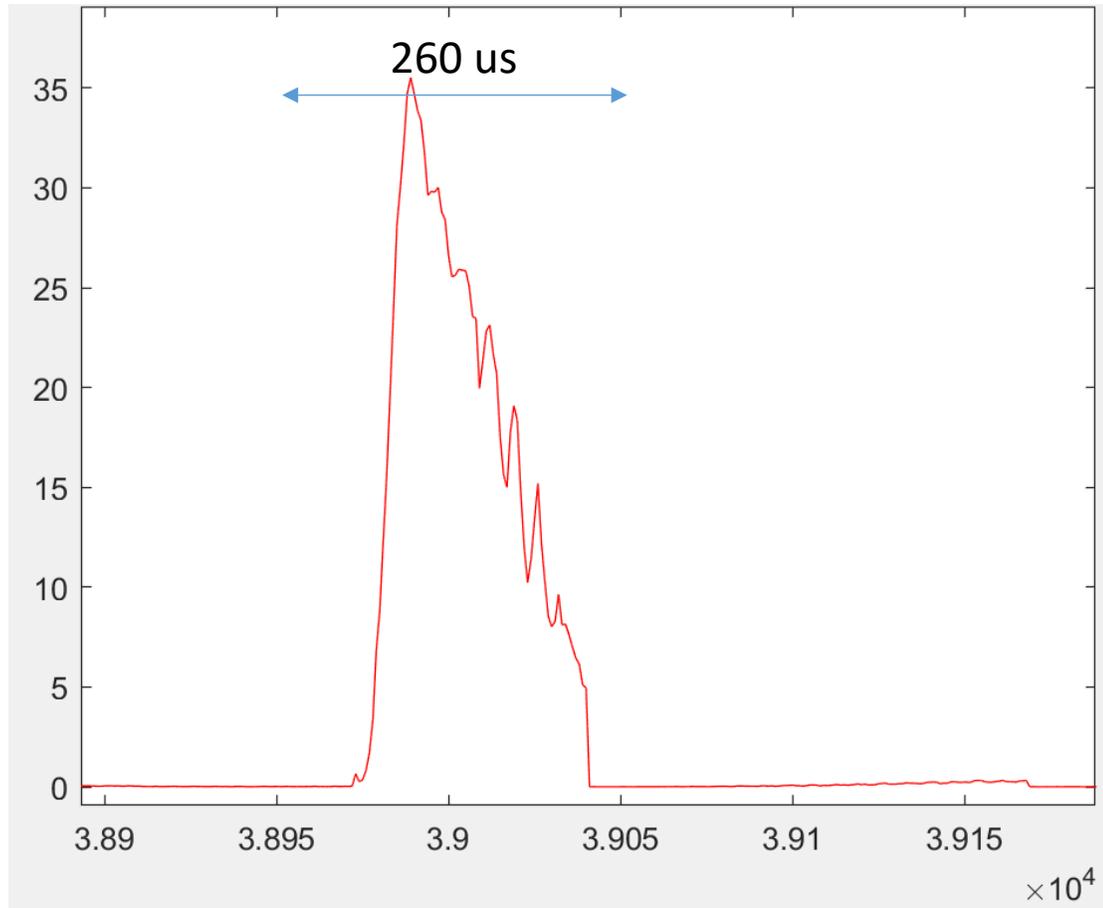


Xu, W., S. Celestin, V. P. Pasko, and R. A. Marshall (2017), A novel type of transient luminous event produced by terrestrial gamma-ray flashes, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 2571–2578, doi:[10.1002/2016GL072400](https://doi.org/10.1002/2016GL072400).

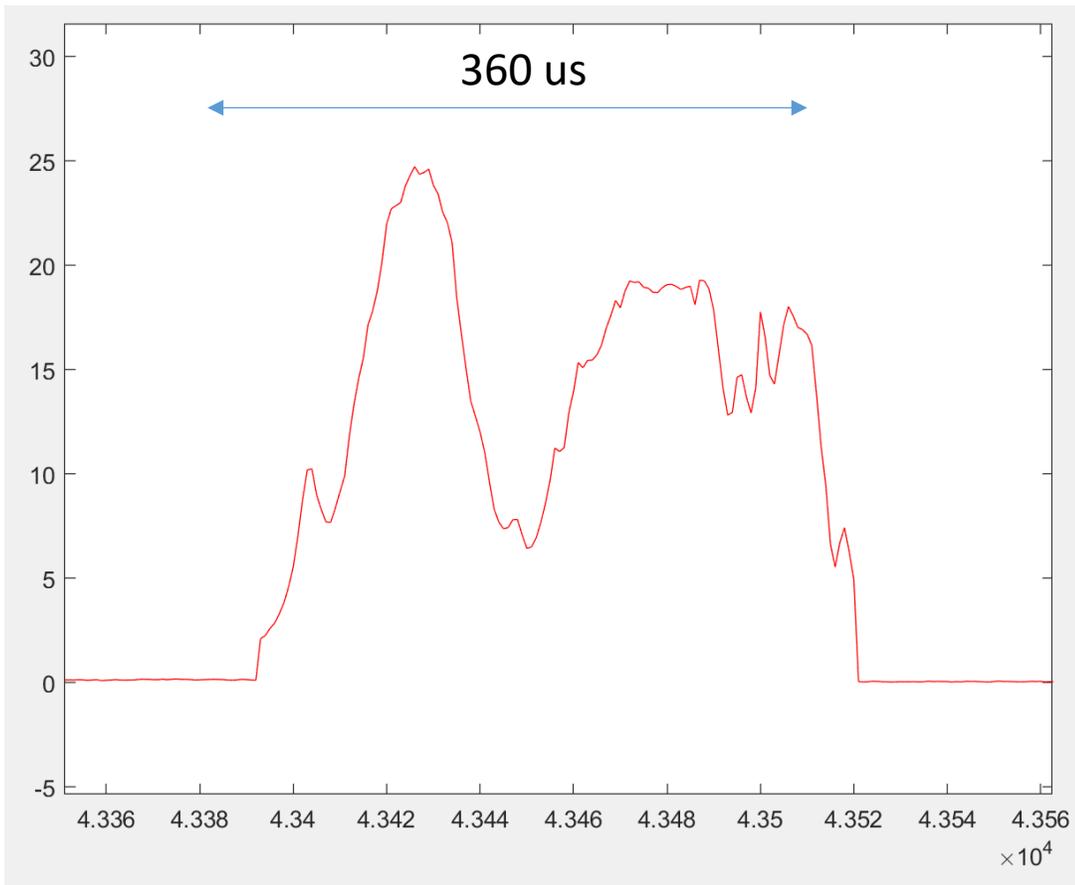




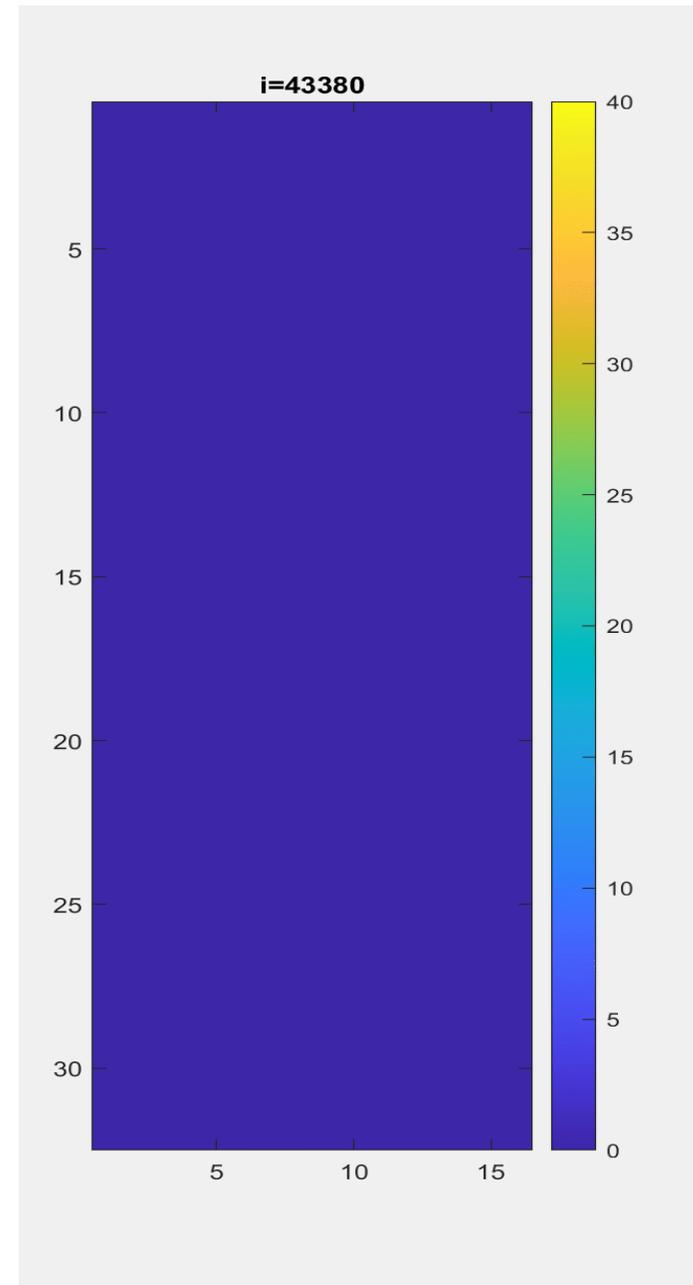




2024-07-07 22:31:11.480235576



2024-07-07 22:31:11.768187284





## Цель КЭ

Получение карты свечения ночной атмосферы Земли в полосе длин волн ближнего ультрафиолета (300–400 нм) в пределах широт, доступных для наблюдения с орбиты МКС.

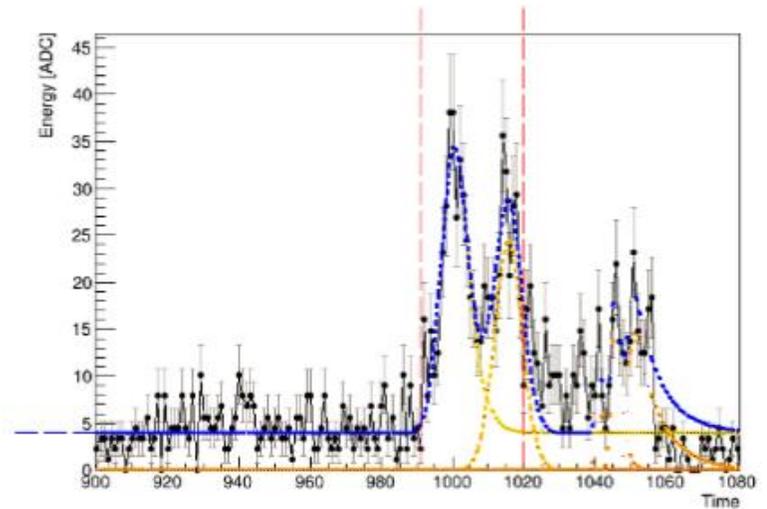
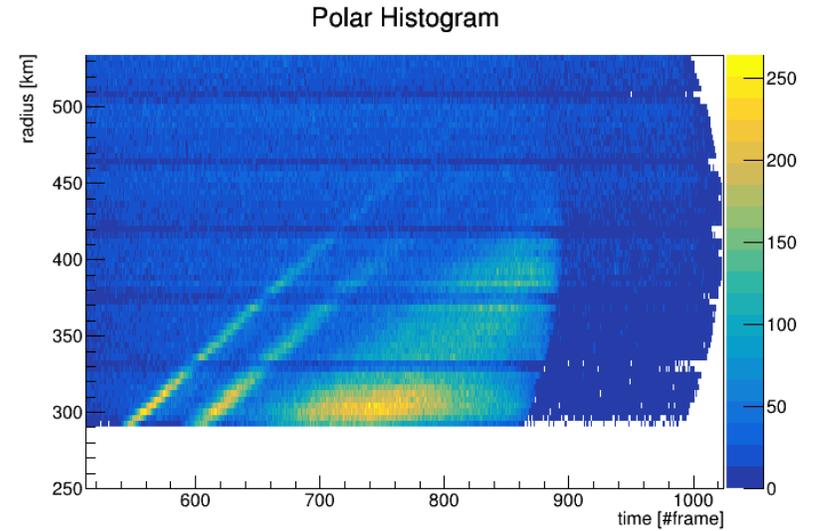
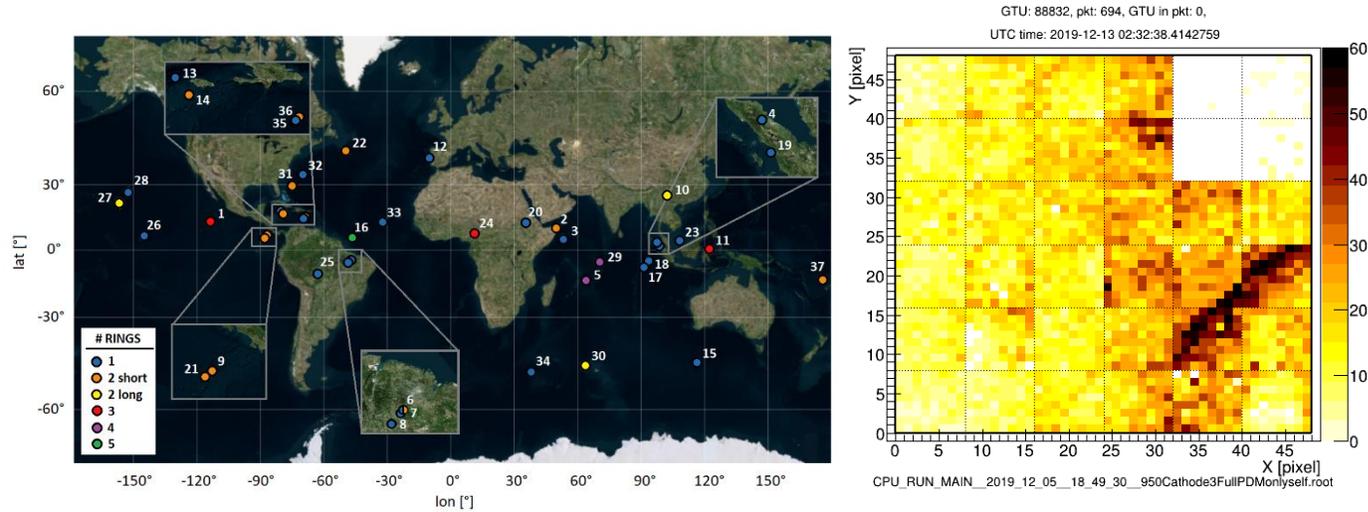
## Задачи КЭ

- измерение пространственно-временной структуры свечения ночной атмосферы в области «ближнего» ультрафиолета (УФ, длины волн 300–400 нм) с высоким временным (2,5 мкс) и пространственным (5 км) разрешением в широком поле зрения ( $\pm 18,3^\circ$ );
- 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).



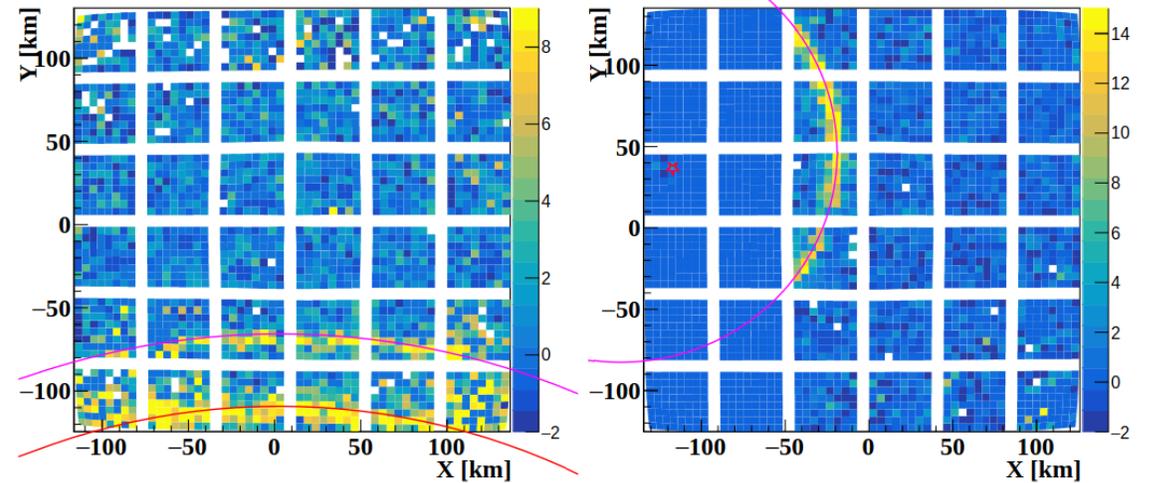
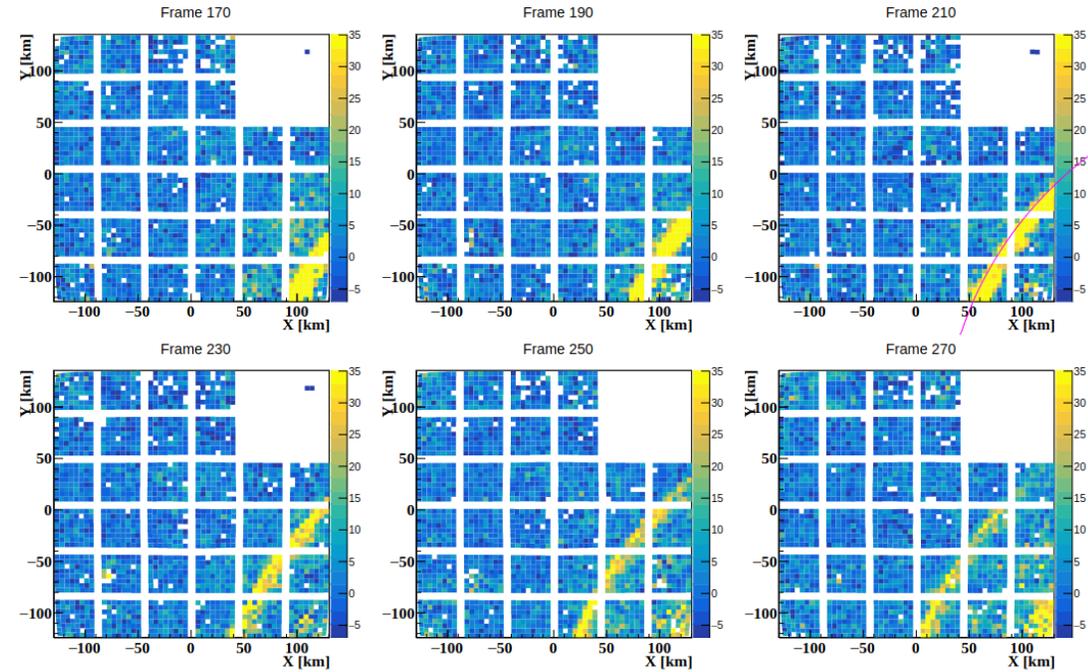
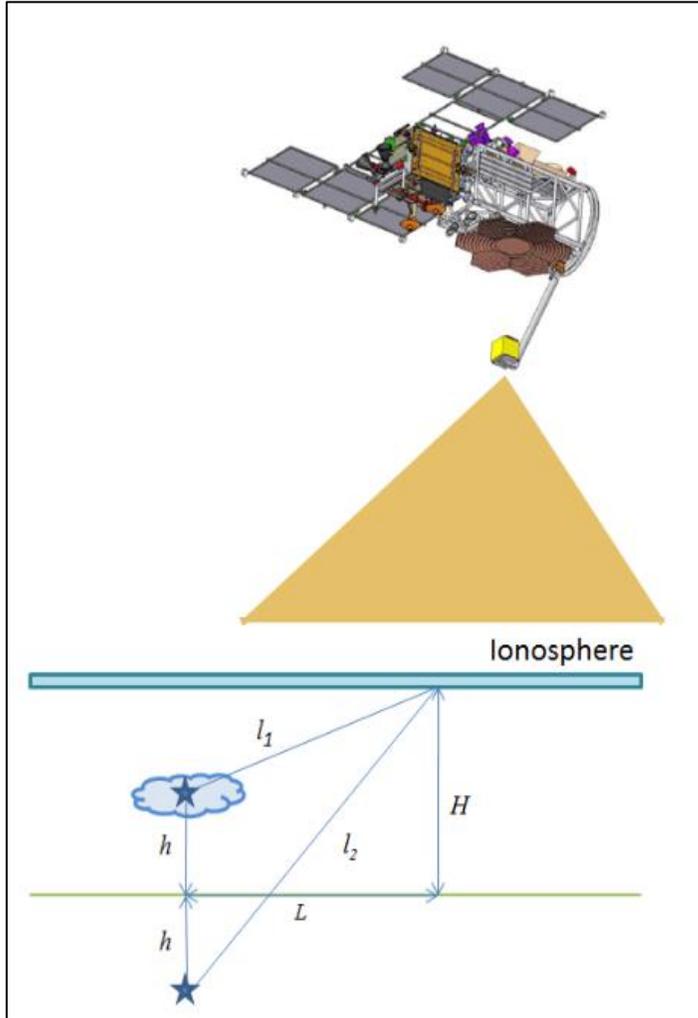
НА «УФ атмосфера» работает на борту МКС с 2019 г. по н.в., проведено более 120 сеансов

События типа ELVES. Карта событий и пример анимации



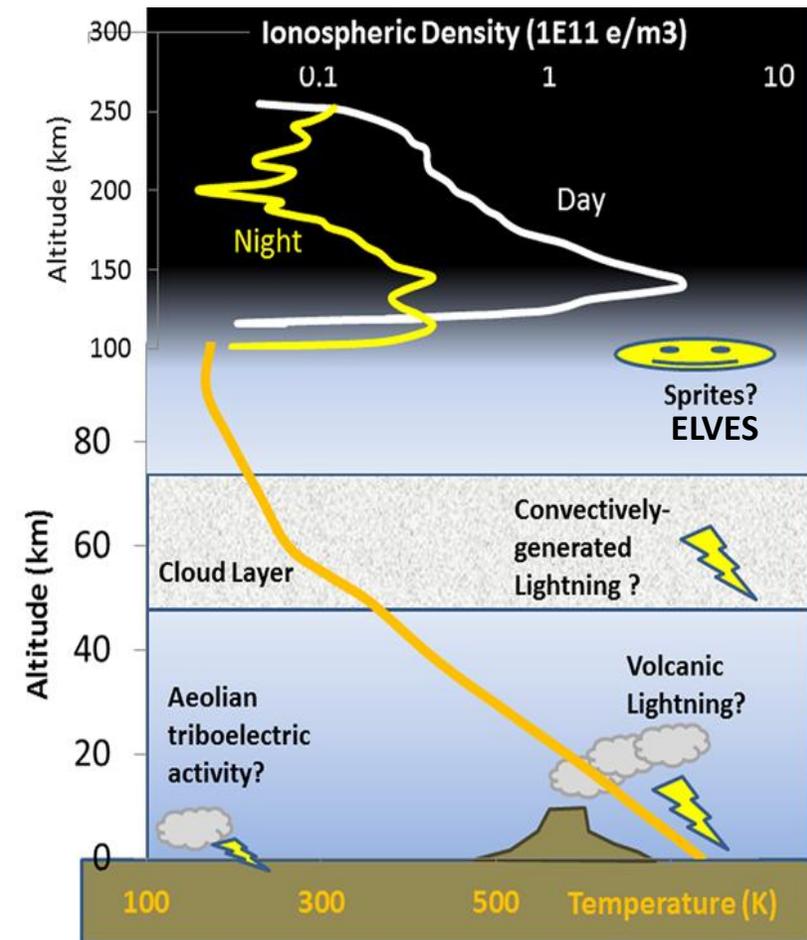
Эксперимент	Частота регистрации событий типа ELVES
ISUAL	3.23/мин
JEM-GLIMS	~ 14/мин
УФ атмосфера	15.3/мин
Auger	1.3/мин
Eurosprite	0.2/мин

Уникальные измерения тонкой пространственно-временной структуры событий типа ELVES, позволяющие зондировать внутриоблачные процессы



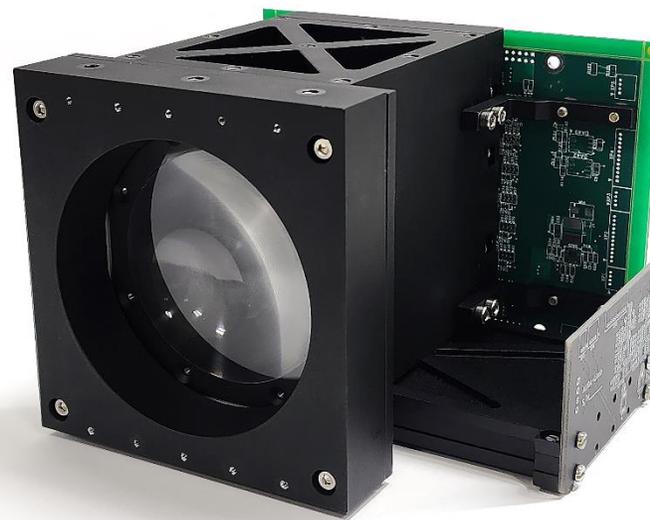
Sharakin, S., et al. *Cosmic Research*, 62(4), 330-338, 2024.

Построена вероятностная модель реконструкции эльфов, реализованная методами вероятностного программирования в PyMC. На нескольких примерах событий, зарегистрированных Mini-EUSO, показано применение байесовской



R.D. Lorenz Lightning detection on Venus: a critical review. PEPS, (2018)  
5:34

- На сегодняшний день нет однозначного ответа на вопрос о существовании молний и механизмах их возникновения на Венере.
- Прямая регистрация оптического излучения молниевых разрядов на Венере затруднена плотным облачным покровом из серной кислоты.
- Для проекта «Венера-Д» предложена методика обнаружения и локализации молниевых разрядов по ионосферному отклику (транзиентные явления в ионосфере: ELVES, sprites).
- Разрабатывается аппаратура СОНЭТ-В (Система оптических наблюдений энергичных транзиентов для проекта Венера-Д) – изображающий фотометр и спектрометр.
- Прототипы аппаратуры проходят летные испытания в составе космических аппаратов «Созвездие-270».



- Входное окно  $D \sim 5$  см
- Оптическая система – линза френеля
- Матрица фотоприемника телескопа – SiPM, 3 мм (MicroFJ-30035-TSV-A2)
- Угловое разрешение  $\sim 40$  мрад.
- Временное разрешение  $\sim 1$  мкс.
- Спектрометр – 4 канала. 337 нм, 391 нм, 777 нм, 260 нм (557 нм)

- В измерениях на Кольском полуострове обнаружены микровсплески аврорального излучения. Микровсплески измеряются сериями длительностью от 10 с до ~2 часов. Временной интервал между импульсами не постоянен и варьируется в диапазоне от 100 мс до 5 с. Пространственная структура событий представлена различными формами, среди которых выделены широкие пятна, узкие дуги, пересекающие поле зрения фотометра и локальные пятна. Эти формы существуют одновременно и появляются независимо друг от друга. Угловой размер пятен может быть менее 0,1 рад.
- Рассматриваются различные гипотезы происхождения событий. Одна из основных – высыпания в виде микровсплесков релятивистских электронов.
- На высокогорной станции Арагац в 2024 году проведены первые измерения пространственно-временной структуры свечения в ближнем УФ-диапазоне во время событий типа TGE. Проводится анализ полученных данных фотометров и комплекса аппаратуры станции.
- Детектор «УФ атмосфера» работает на борту МКС в течение 5 лет. Получены уникальные данные о пространственно-временной структуре событий типа ELVES. Разработаны алгоритмы реконструкции динамики событий и определения положения родительской молнии.

Спасибо за внимание!