



Лаборатория космических лучей
предельно высоких энергий НИИЯФ МГУ



Оптические явления в атмосфере Земли. Результаты и перспективы спутниковых наблюдений

К.Ф.-М.Н. ЗАВ. ЛАБОРАТОРИЕЙ НИИЯФ МГУ

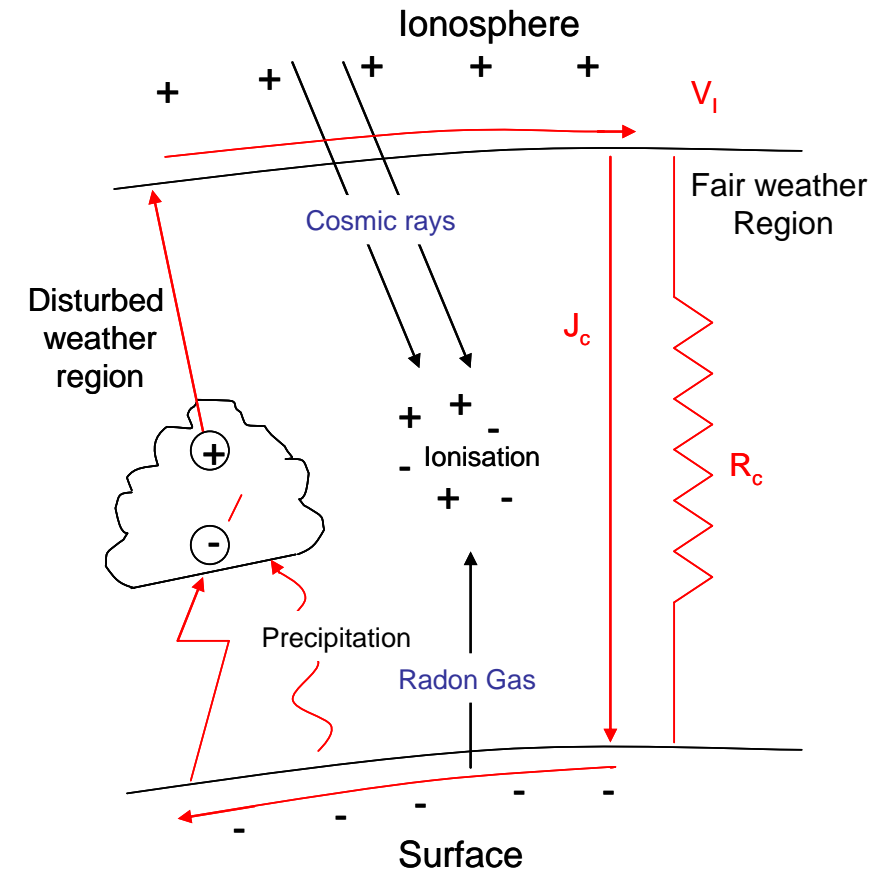
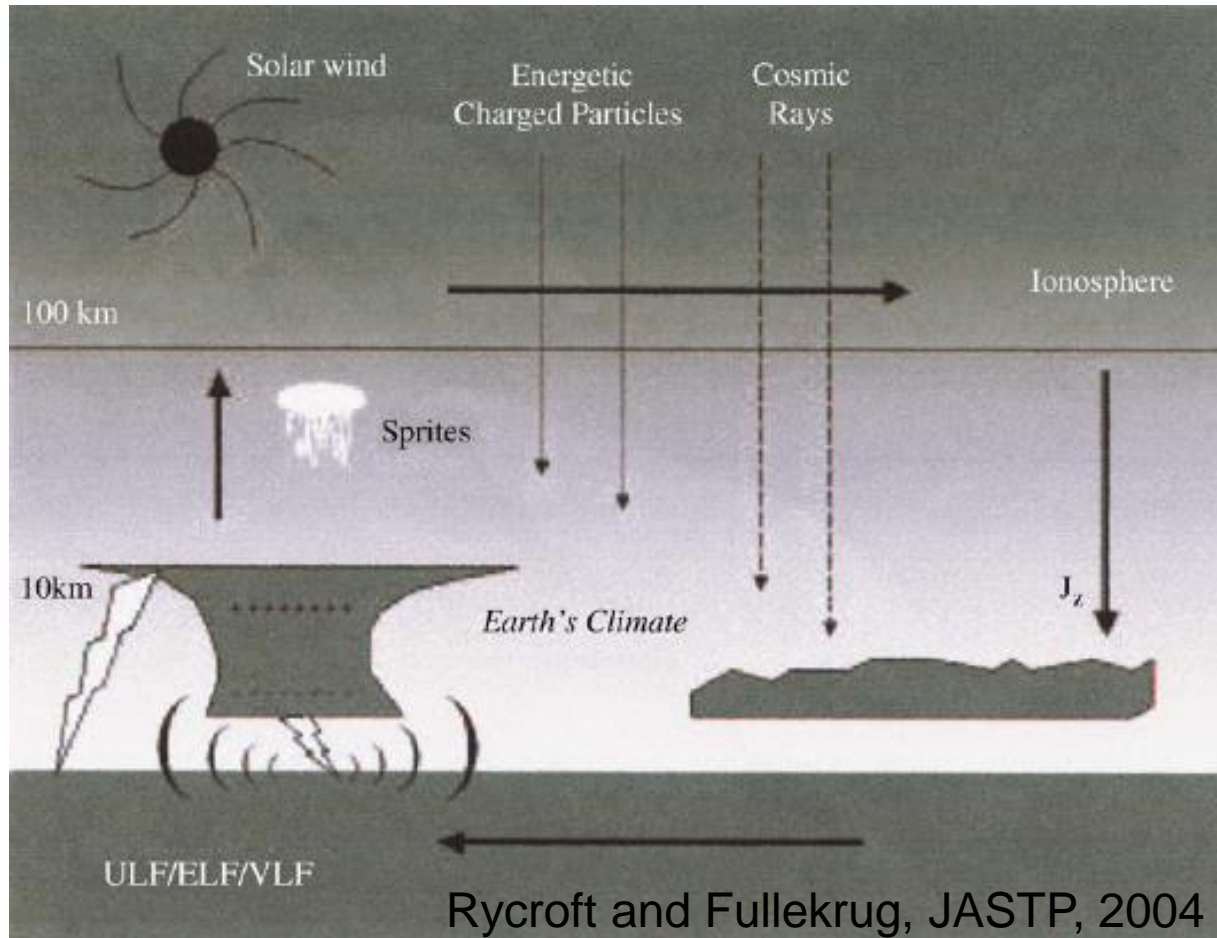
КЛИМОВ П.А.

75-летие НИИЯФ МГУ

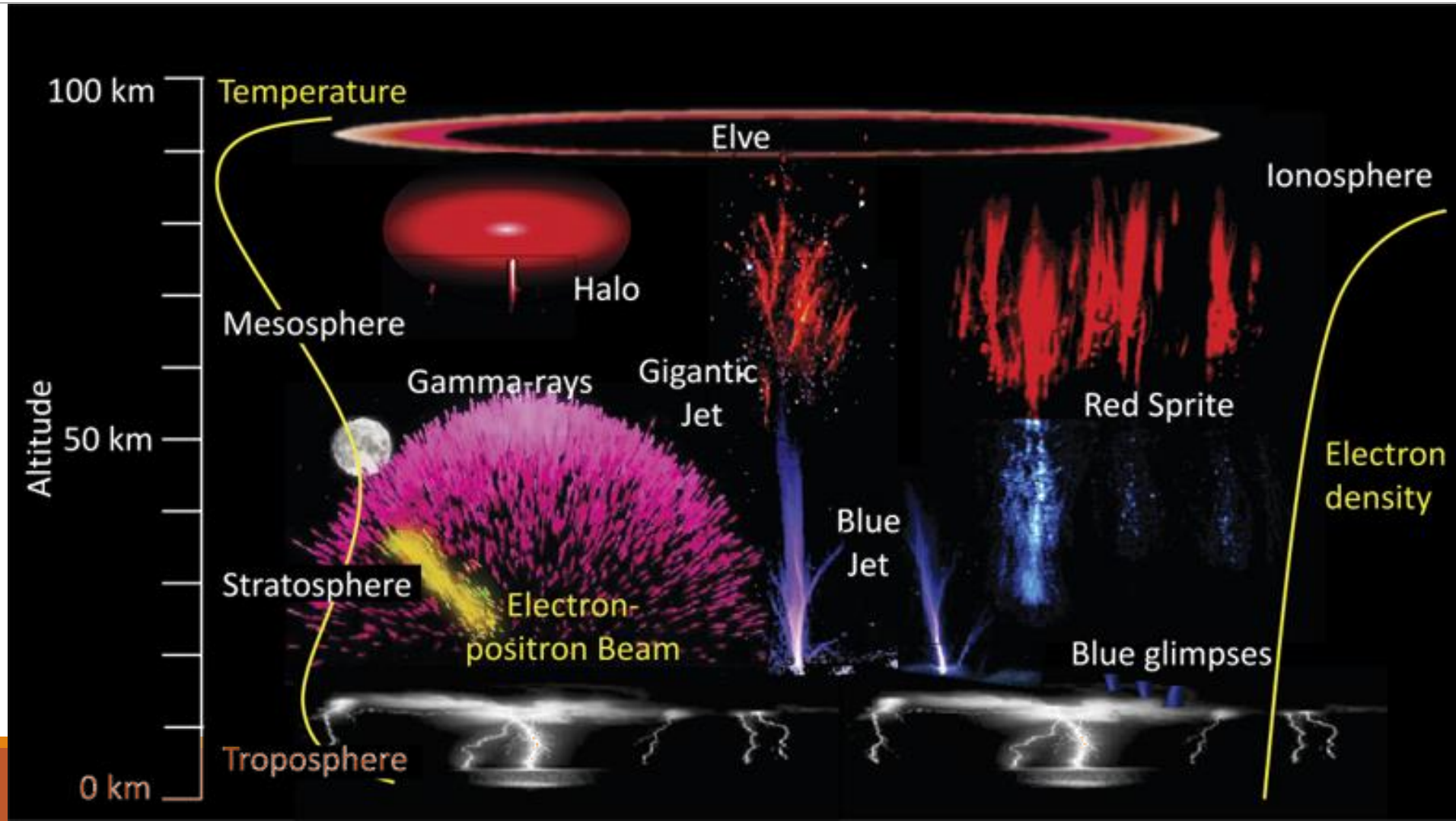
17.02.2021



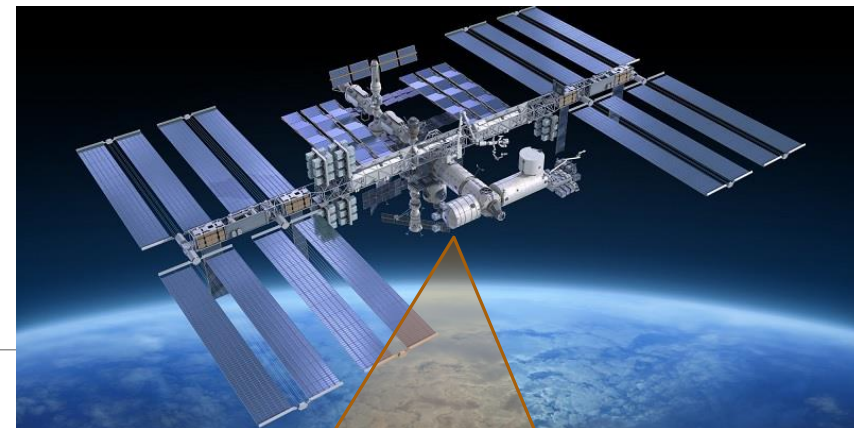
“Air and Space are one continuity”



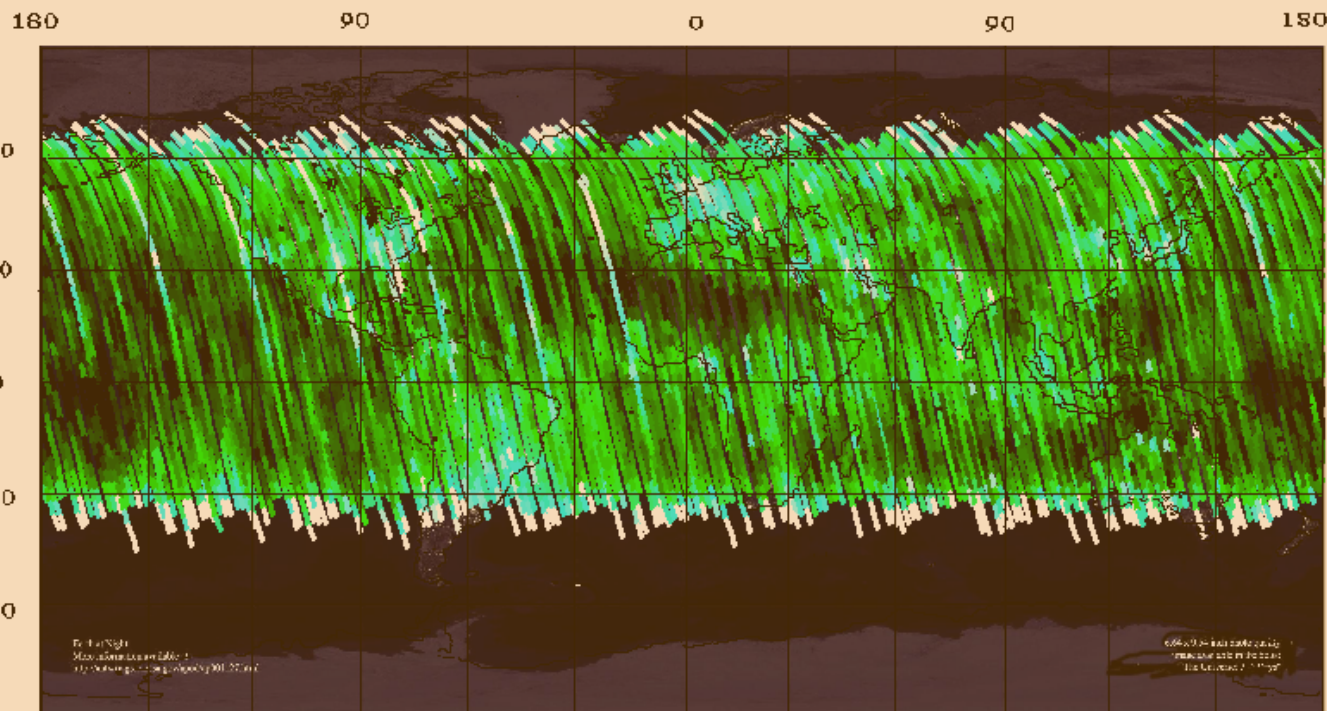
Transient luminous events – комплекс процессов в верхней атмосфере Земли



Преимущества спутниковых наблюдений

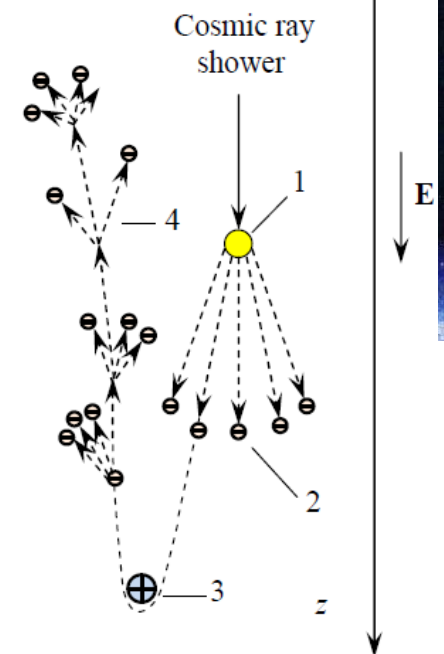
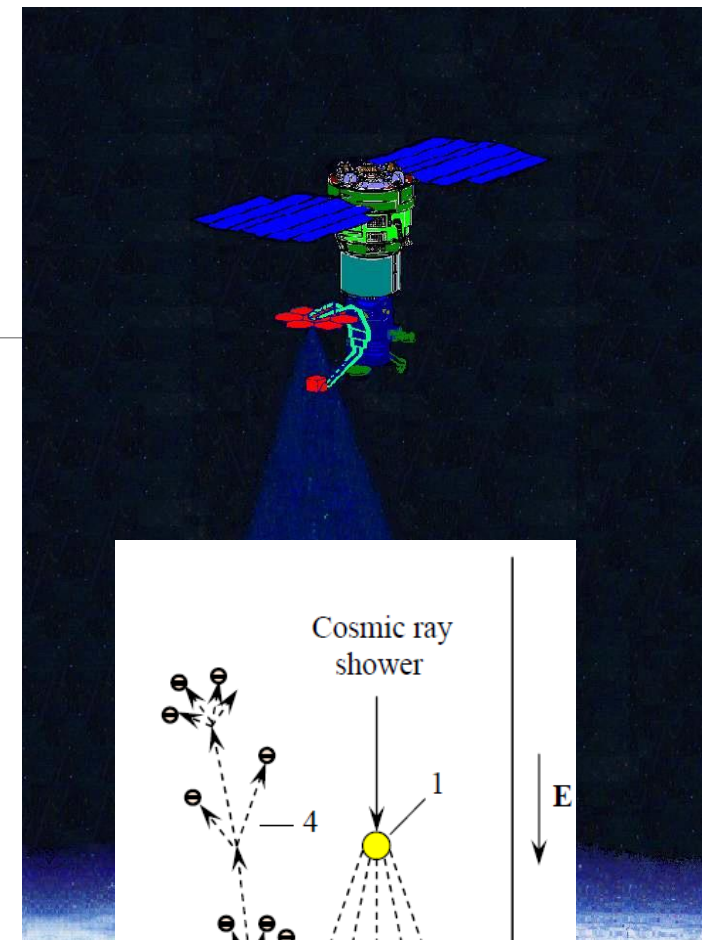
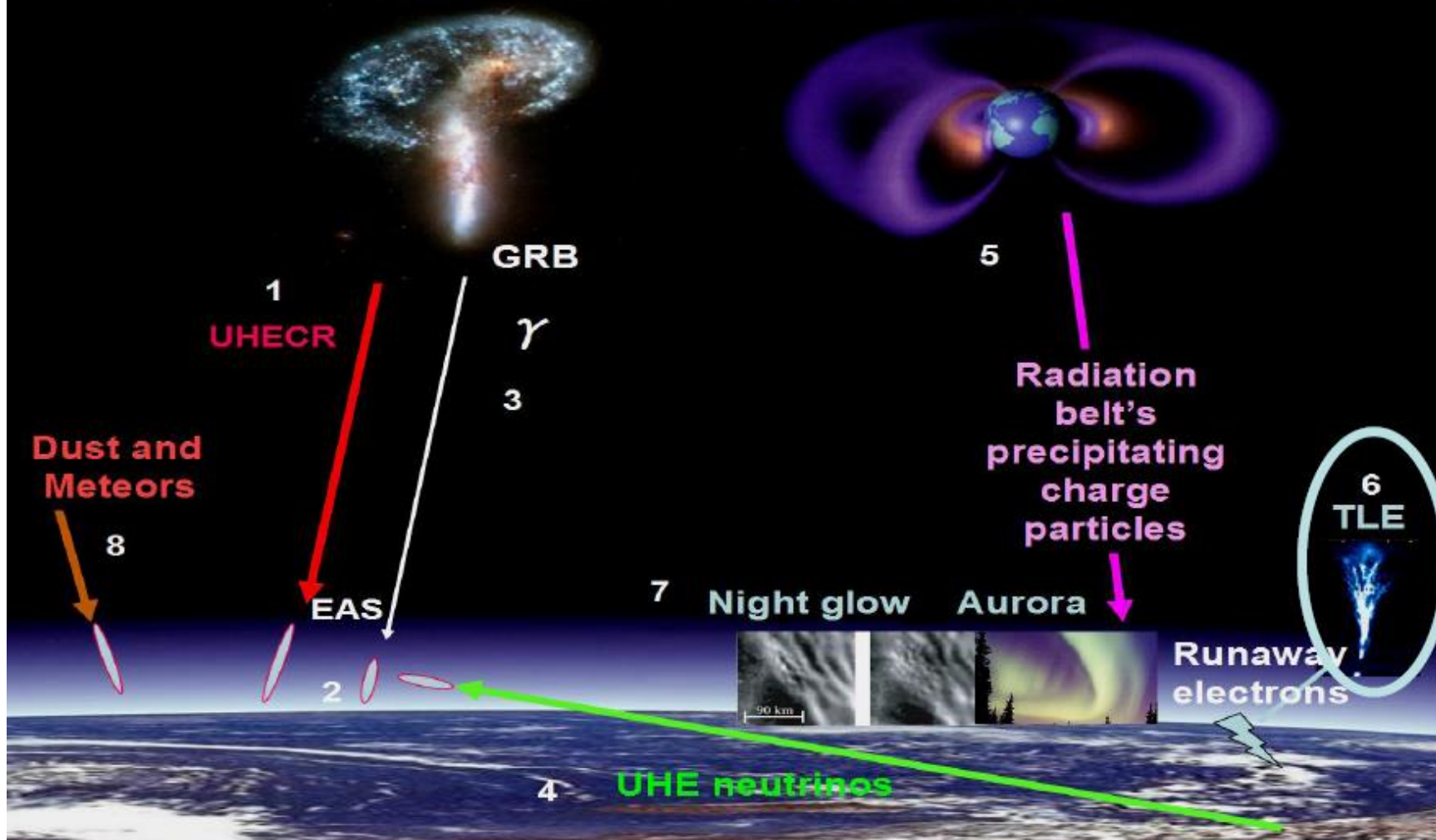


Прозрачность верхних слоев
атмосферы



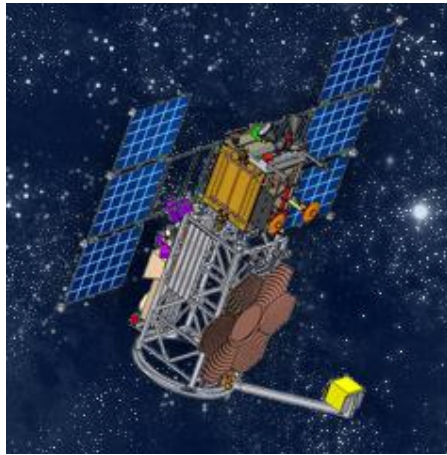
Глобальные измерения по Земному шару

Earth's atmosphere as a target for the space emissions



Проекты НИИЯФ МГУ

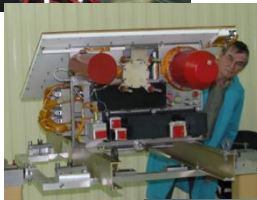
TUS
(2016)



Tatiana-1
(2005)



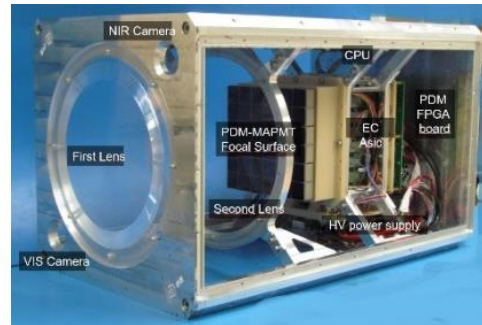
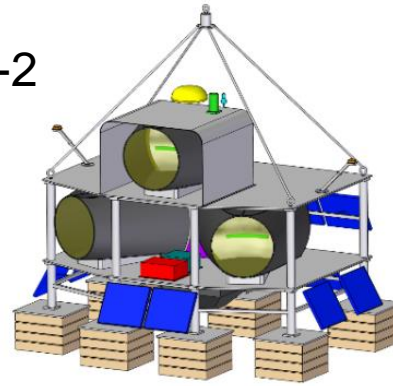
Tatiana-2
(2009)



Vernov
(2014)

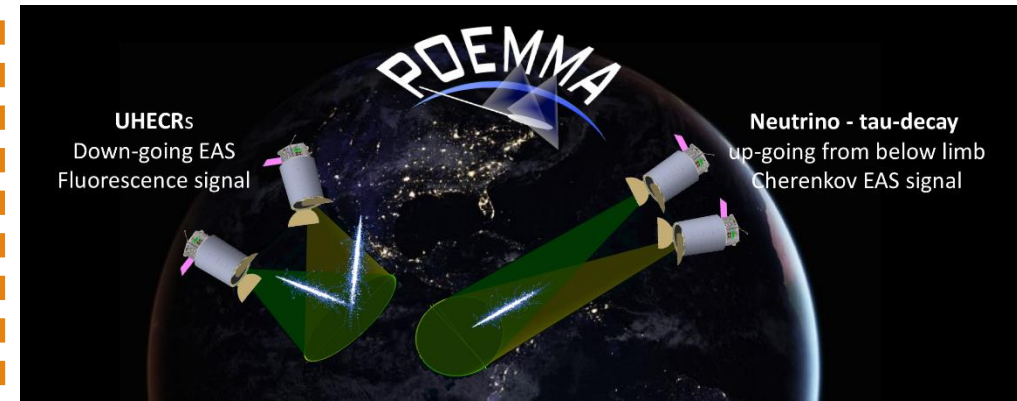


EUSO-SPB-2
2023

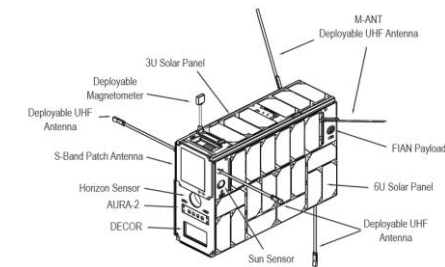


УФ атмосфера/
Mini-EUSO(2019)

ВДНХ-80 (2019)



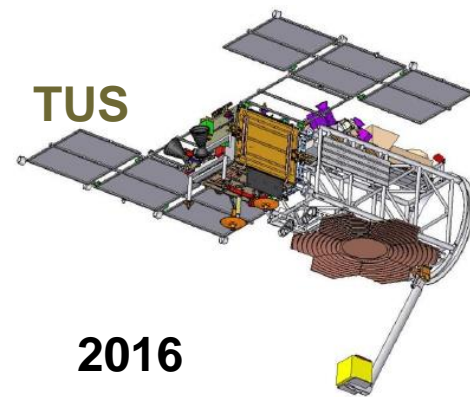
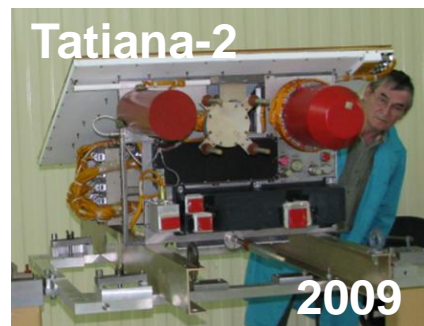
K-EUSO



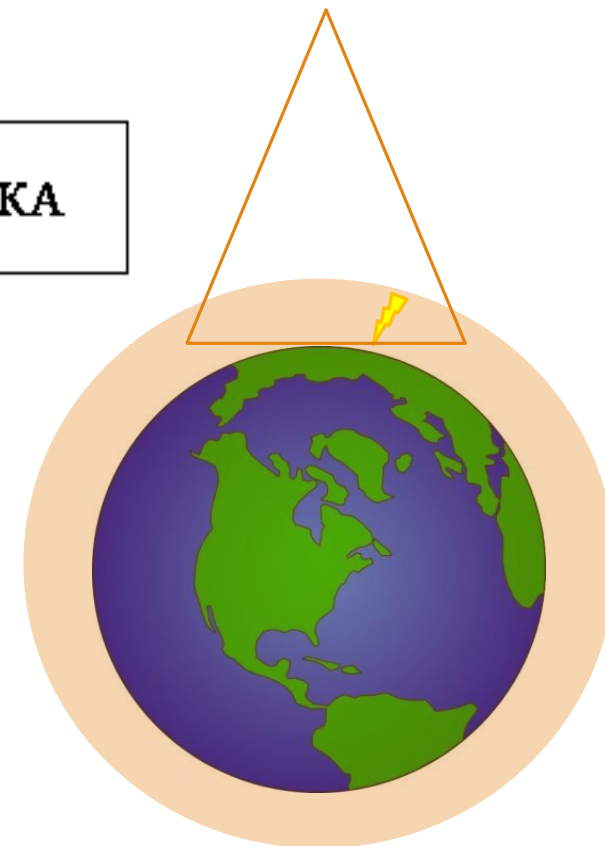
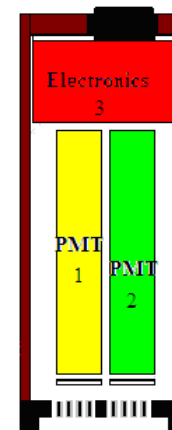
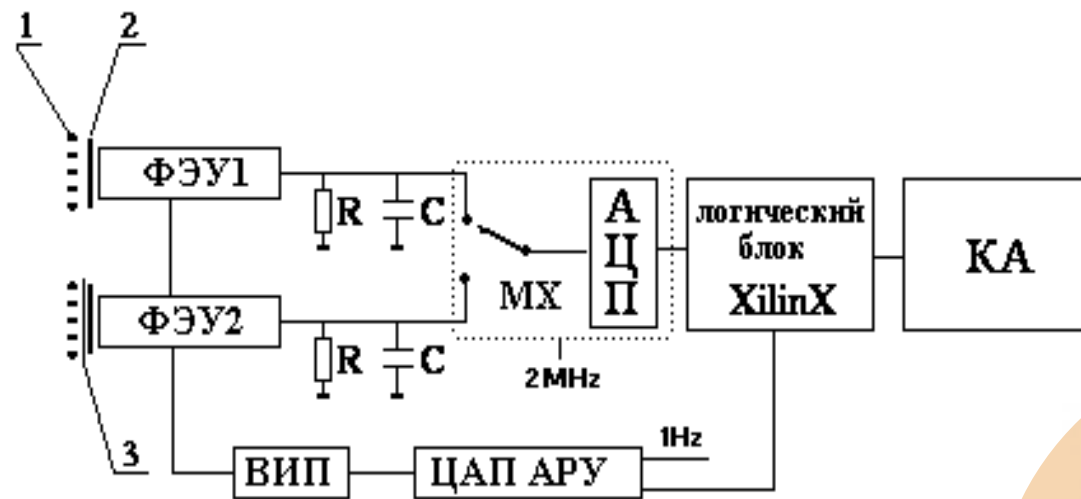
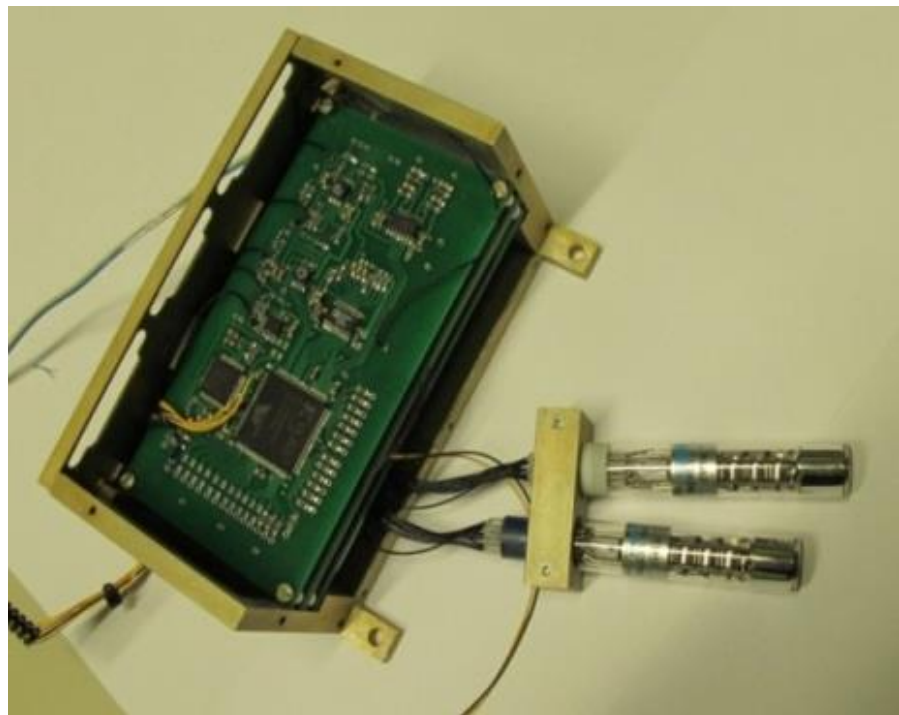
ДЕКАРТ (2020)

Детекторы УФ излучения на спутниках МГУ

	Tatiana-1	Tatiana-2	Vernov	TUS	Mini-EUSO
Временное разрешение	16 мкс & 64мкс	1 мс	0.5 мс	0.8 мкс	2.5 мкс
Пространственное разрешение	-	-	-	5 км	5 км
Диапазон длин волн	240 - 400 нм	240 - 400 нм 600 - 800 нм	240 - 400 нм 600 - 800 нм	240 - 400 нм	240 - 400 нм
Апертура	0.4 см ²	0.4 см ²	0.4 см ²	2 м ²	490 см ²
Число каналов	1	2	2	256	2304
Поле зрения	16°	16°	16°	9°	40°

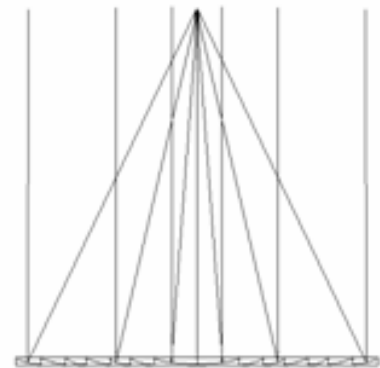
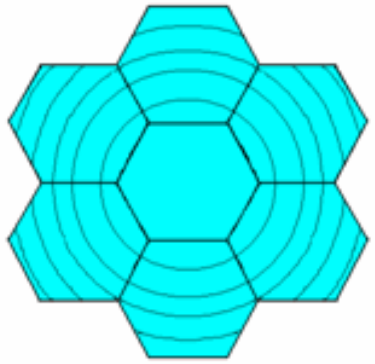


Детектор ДУФ



- ✓ Отбор событий: максимальное значение вспышки за период записи (1 виток – «Татьяна-1», 1 минута – «Татьяна-2», 4,5 с – «Вернов»).
- ✓ Отсутствует пространственное разрешение.

Детектор «ТУС» на спутнике «Ломоносов»

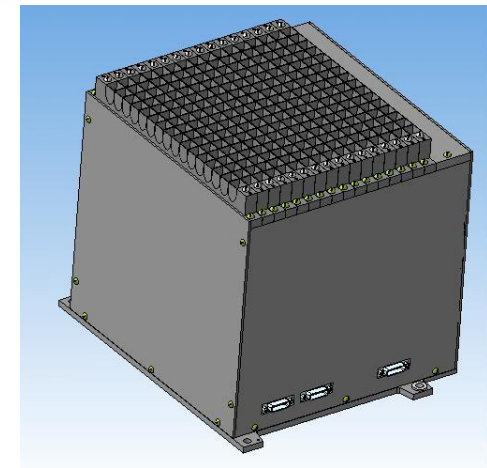
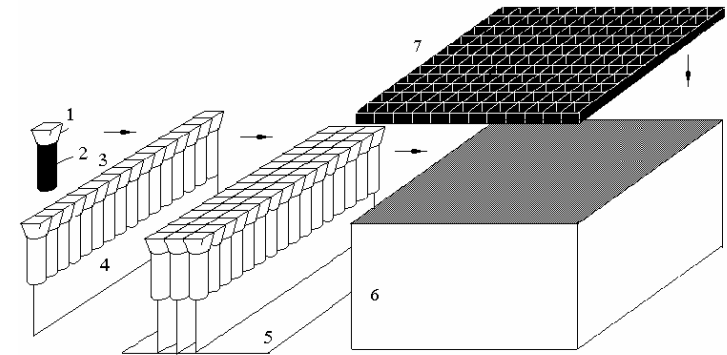


Зеркало-
концентратор
(СЗК)



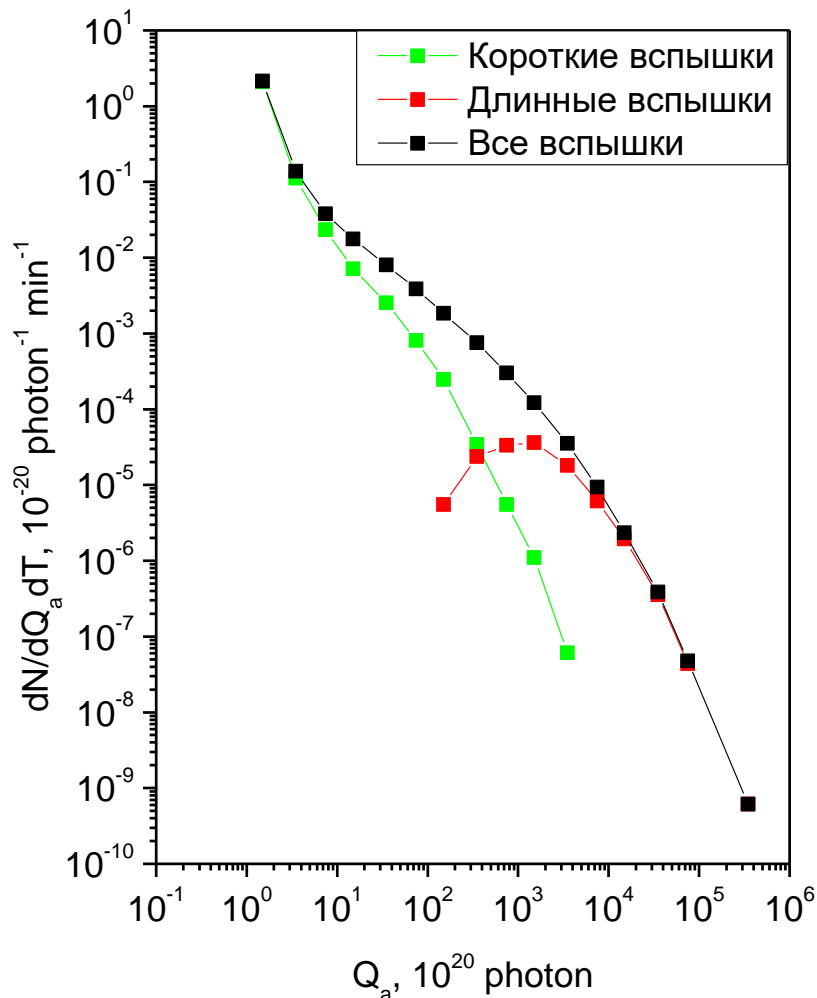
Система отвода
фотоприемника (СО ЭБФ)

Фотоприемник (ЭБФ)

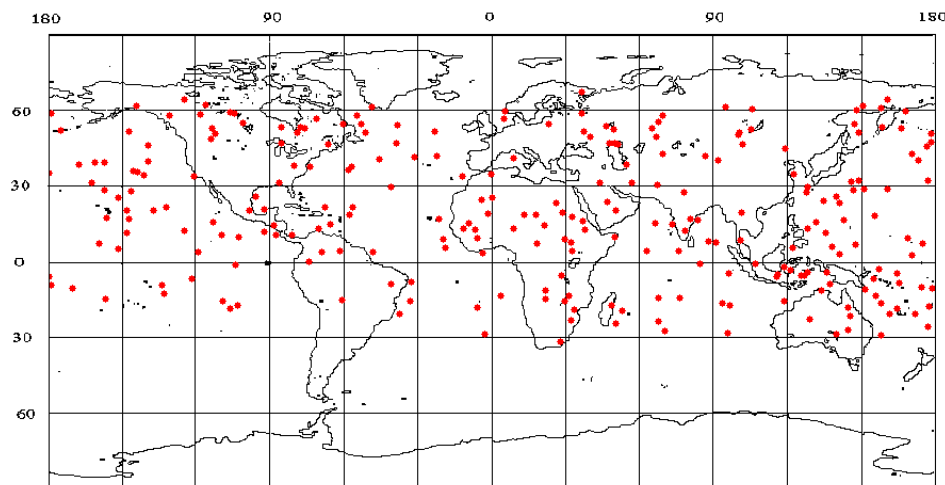




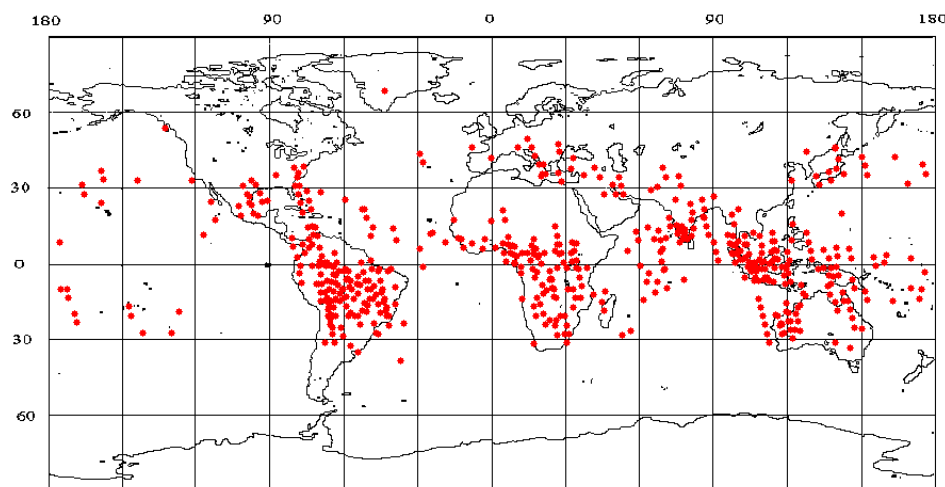
Энергетическое и географическое распределение УФ вспышек по данным спутников «Татьяна-2» и «Вернов»



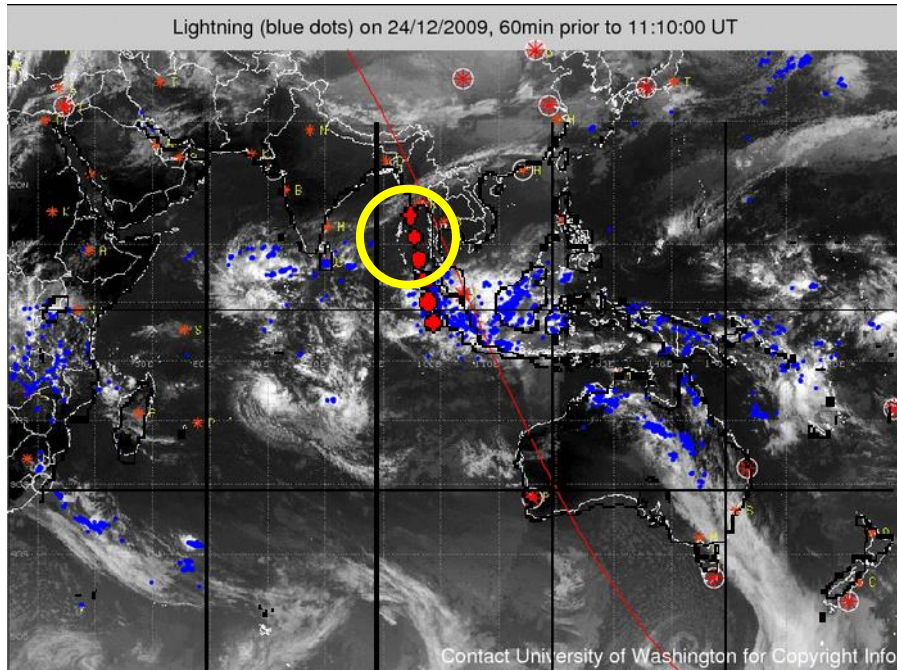
Вспышки с энергией
меньше 1 кДж за 1 мс.



Вспышки с энергией
больше 3 кДж за 1 мс.



Необычные вспышки вне грозовых областей



«Татьяна-2»

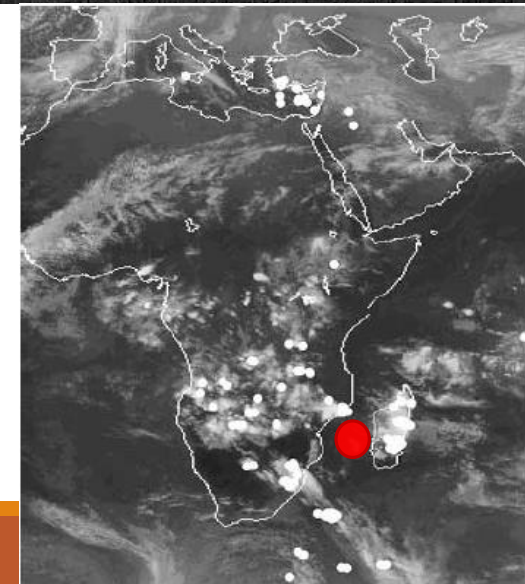
Garipov et al., JGR, 2013

doi:10.1029/2012JD017501

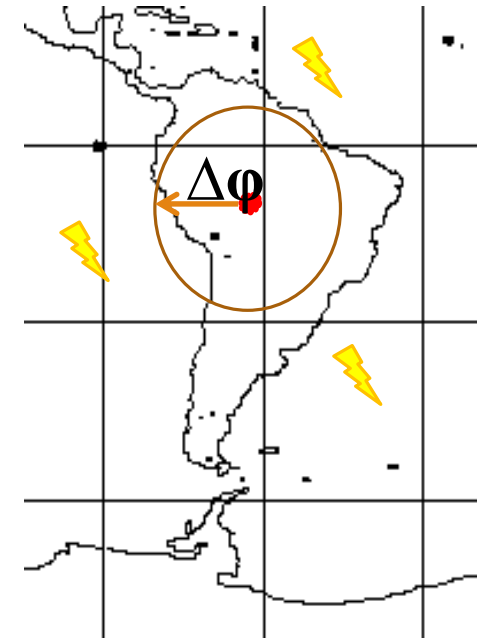


YAIR ET AL.: Space shuttle observation of an unusual transient atmospheric emission GRL, VOL. 32, L02801, doi:10.1029/2004GL021551, 2005

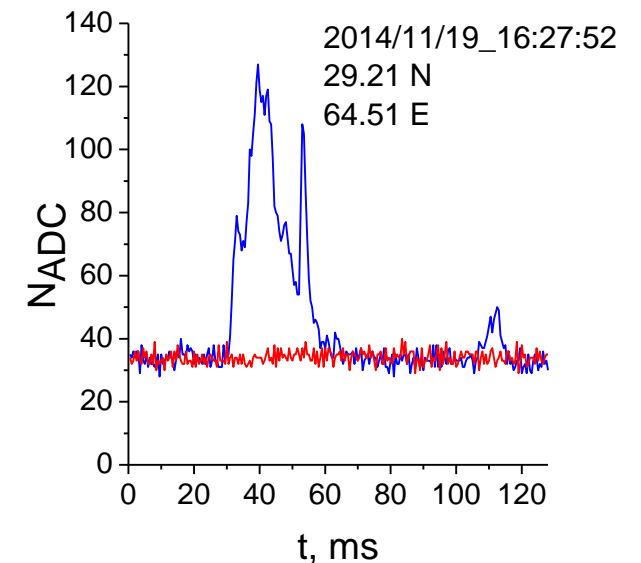
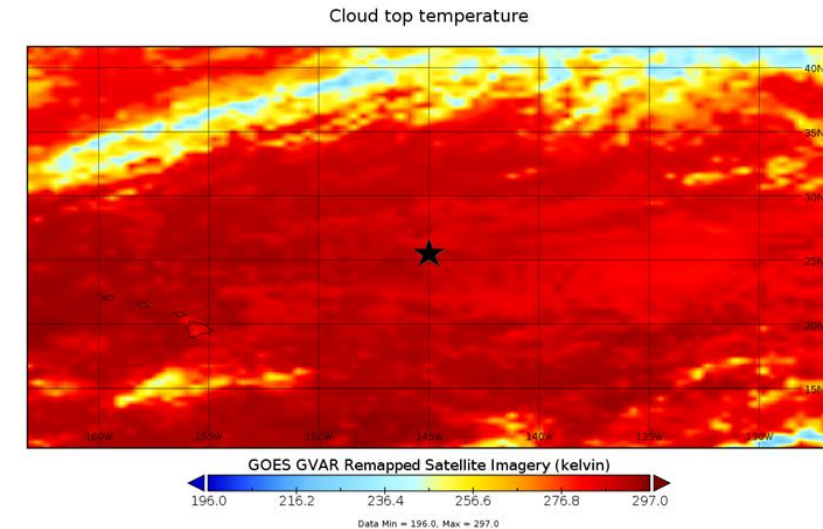
MEIDEX sprite Campaign, 2003) unusual transient event above Indian ocean – TIGER (Transient Ionospheric Glow Emission in Red). Nearest lightning – 0.23s before the event, distance > 1000 km



Внегрозовые вспышки в данных спутника «Вернов»



1. Анализ грозовой активности: сравнение с наземными сетями регистрации молний WWLLN, Vaisala GLD360
 - ✓ $\Delta\phi = 10^\circ$ (~1000 км!)
 - ✓ $\Delta t = \pm 30$ мин.
2. Анализ облачного покрова в поле зрения детектора
3. Анализ спектрального состава излучения (с целью исключить события с большой долей сигнала в красном канале (молнии))
4. Анализ временной структуры сигнала (с целью исключить приборные эффекты)

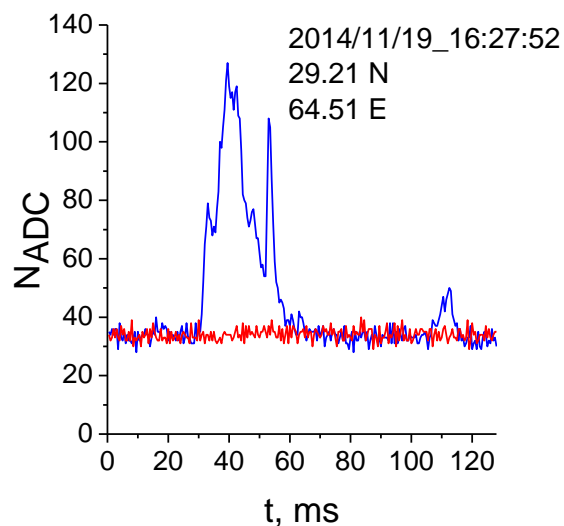
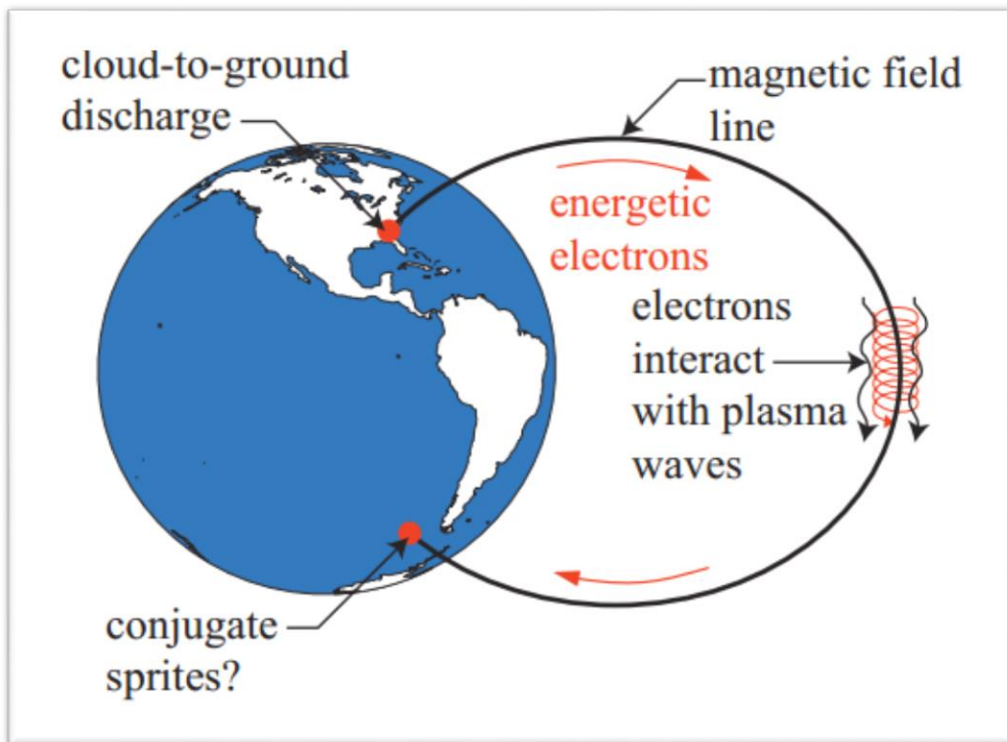


P. A. Klimov *et al.*, "UV Transient Atmospheric Events Observed Far From Thunderstorms by the Vernov Satellite," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 15, no. 8, pp. 1139-1143, Aug. 2018. doi: 10.1109/LGRS.2018.2830656

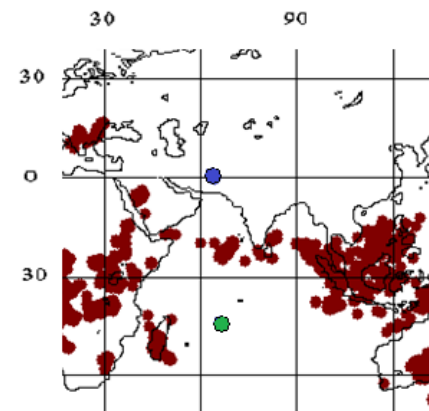
Проверка грозовой активности в сопряженной точке геомагнитного поля

Гипотеза связи TLE и молнии в
магнитосопряженных точках [Lehtinen, 2001]

Нет молний и в сопряженной
точке для УФ вспышек на
спутнике «Вернов»!



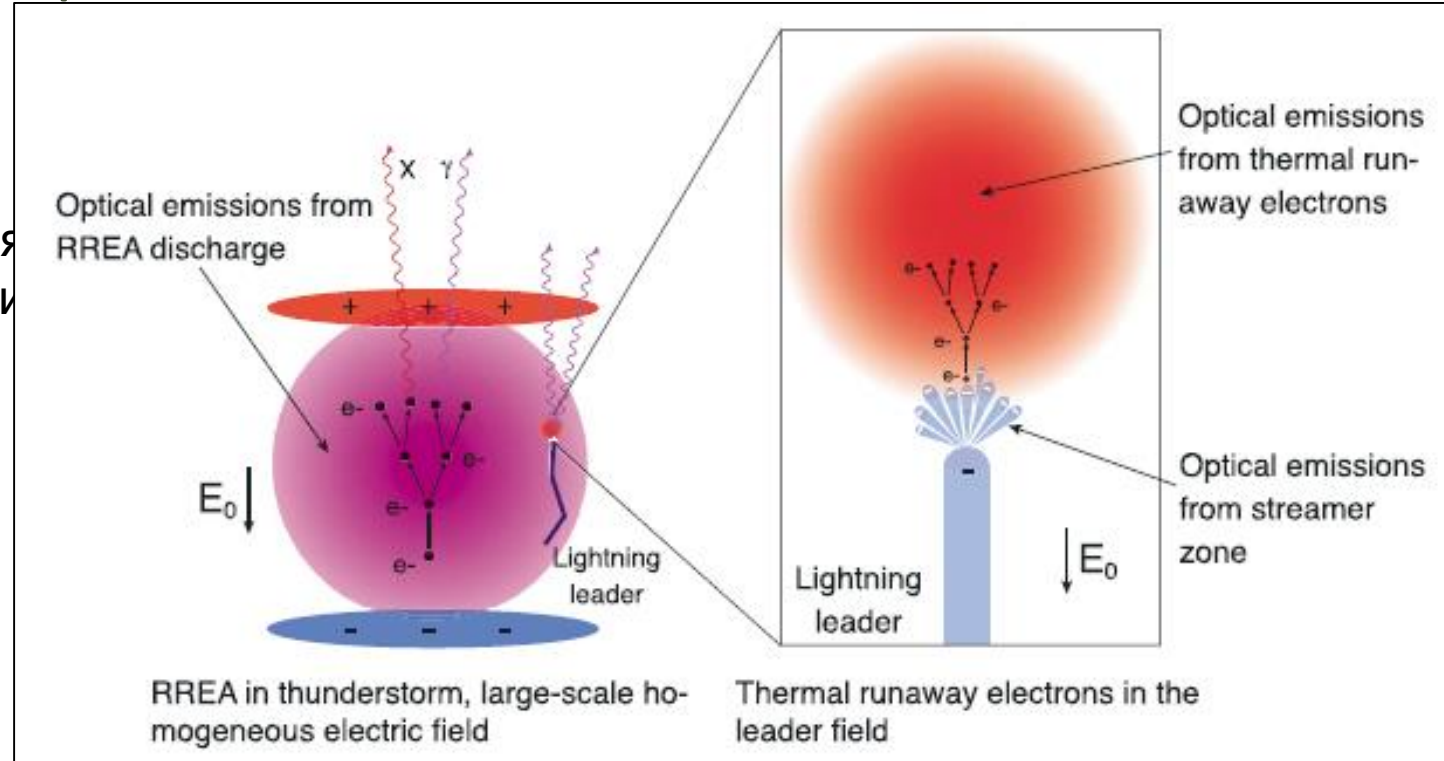
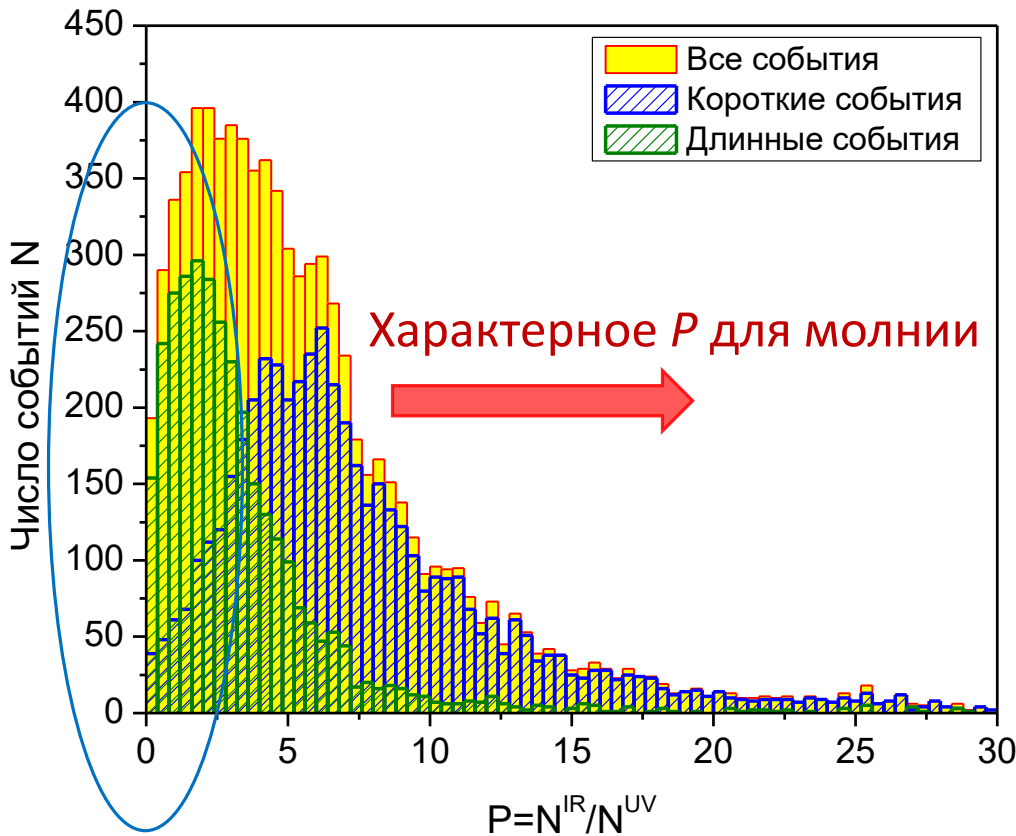
- УФ вспышка
- Сопряженная точка



Спектральные характеристики

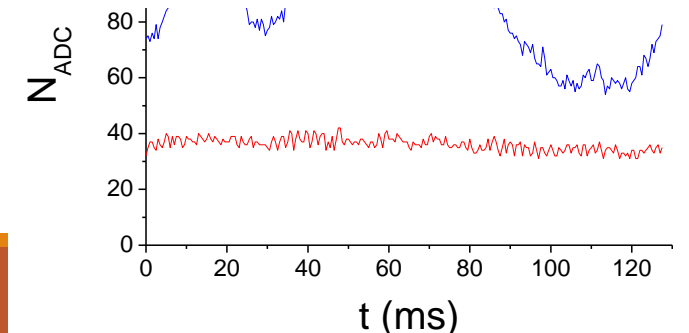
ВСПЫШЕК

Различие в спектрах излучения молний и ТАЯ 1984 (верхний рис.) и Milikh et al. 1998) позволя...



Xu, W., S. Celestin, and V. P. Pasko (2015), Optical emissions associated with terrestrial gamma ray flashes, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, 1355–1370.

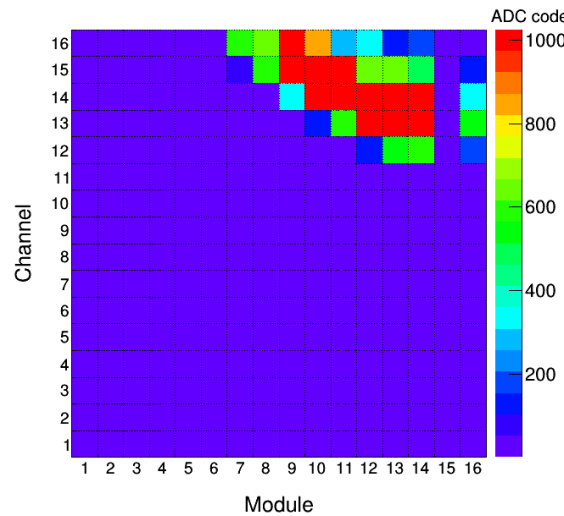
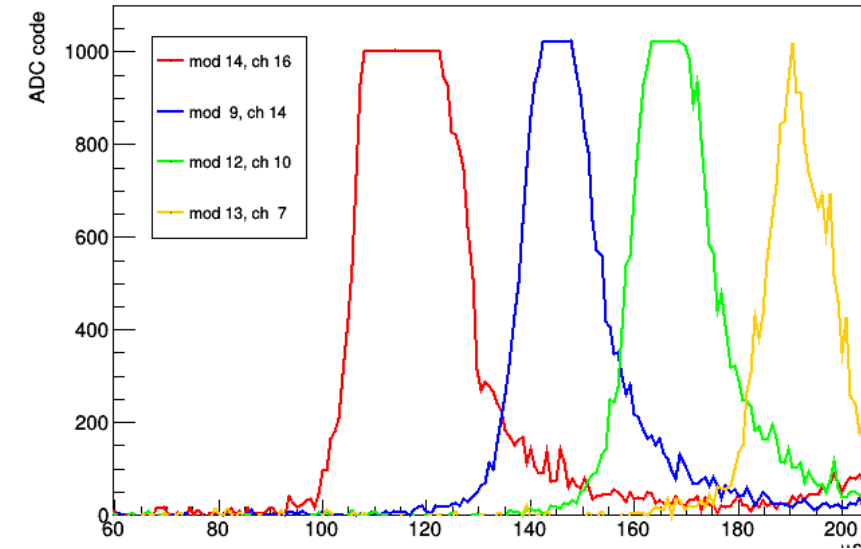
Относ. красном и УФ каналах детектора на спутнике «Вернов»



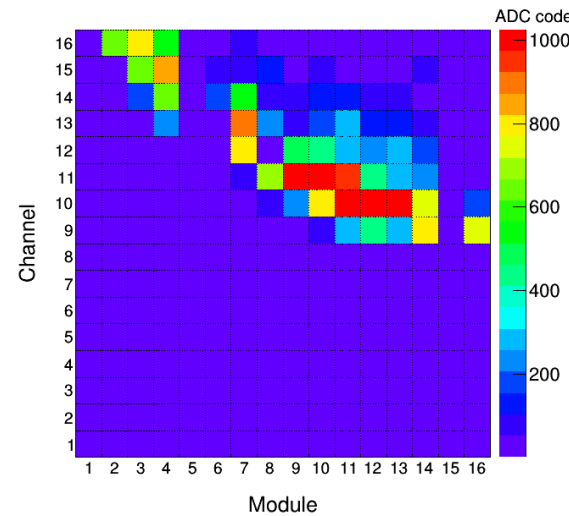
Пример события типа ELVE зарегистрированного детектором «ТУС»

Осциллограмма четырех каналов фотоприемника

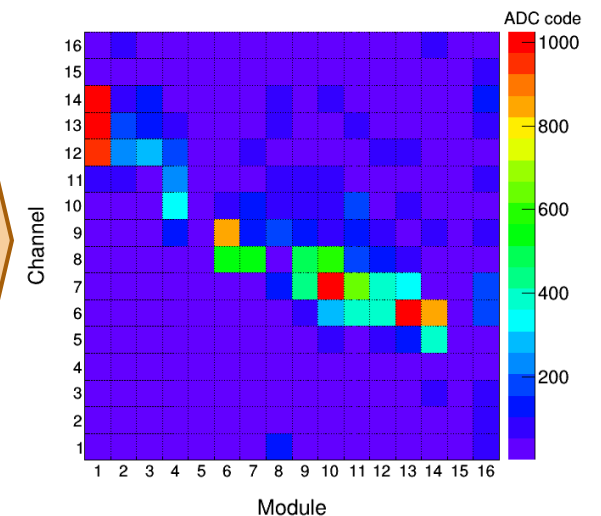
*Карты каналов (изображения объекта) в разные
моменты времени*



136 μ s

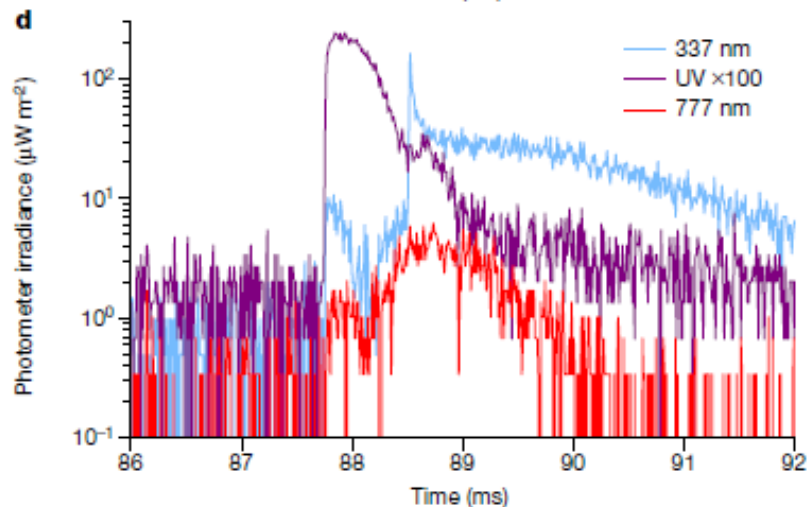
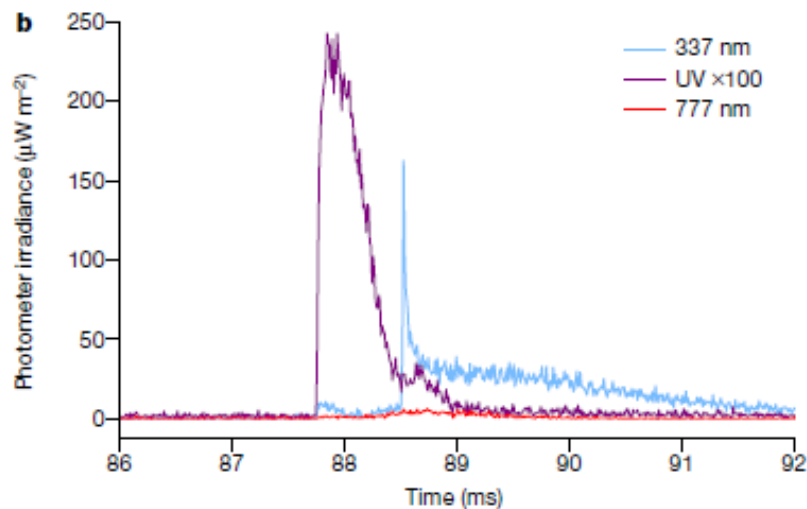


168 μ s



200 μ s

ELVES (Emissions of Light and VLF perturbations due to EMP Sources [Fukunishi et al., 1995])



GLD360. A second pulse of UV emissions is seen following the blue flash after approximately 150 μ s. This second UV pulse is interpreted as emissions from an elve powered by the flash current. The UV and blue signals remain above the background, with a signal ratio UV/blue of approximately 2×10^{-3} , suggesting that the flash streamers reach higher altitudes in the stratosphere. The same data are given on linear (b) and logarithmic (d) scales, $t = 0$ ms corresponds to 15:11:04:000 UTC.

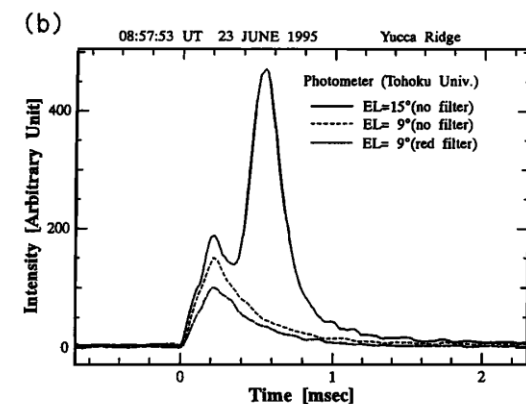
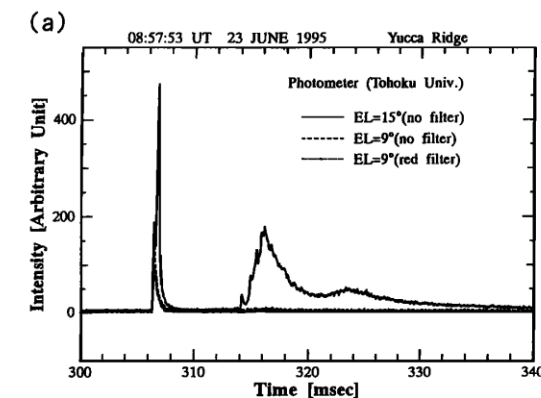
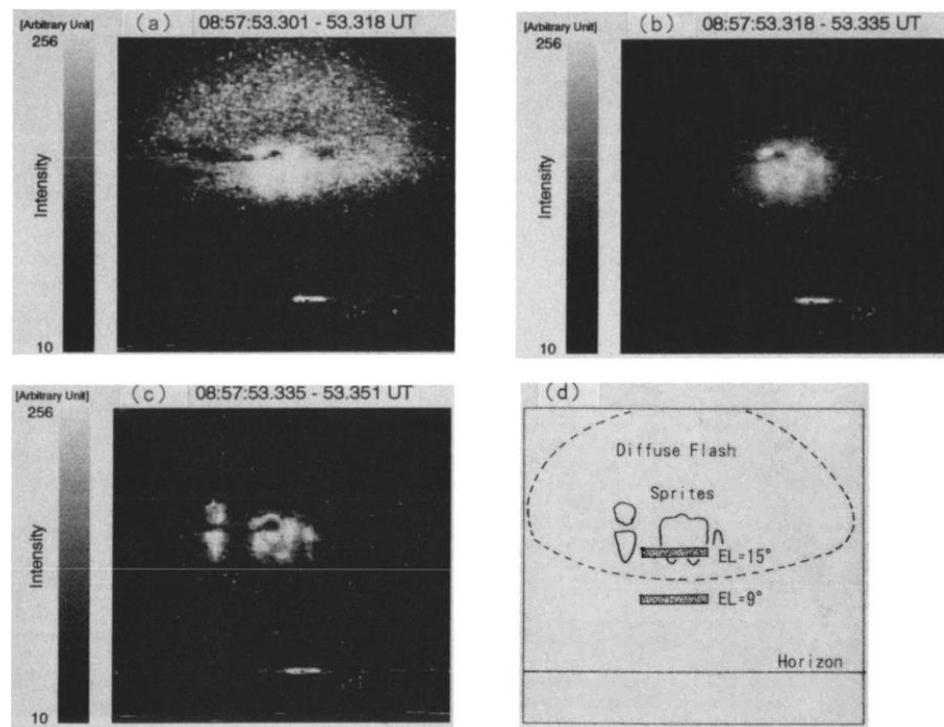


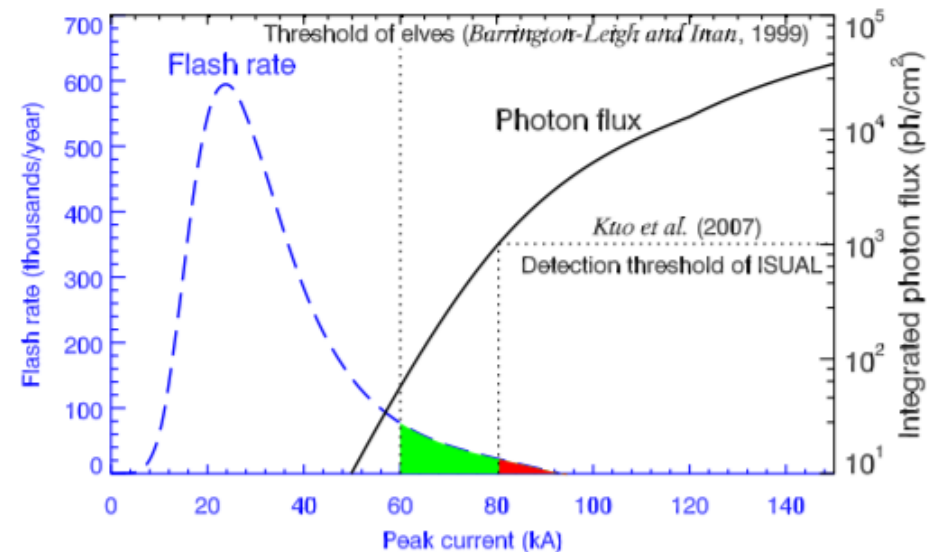
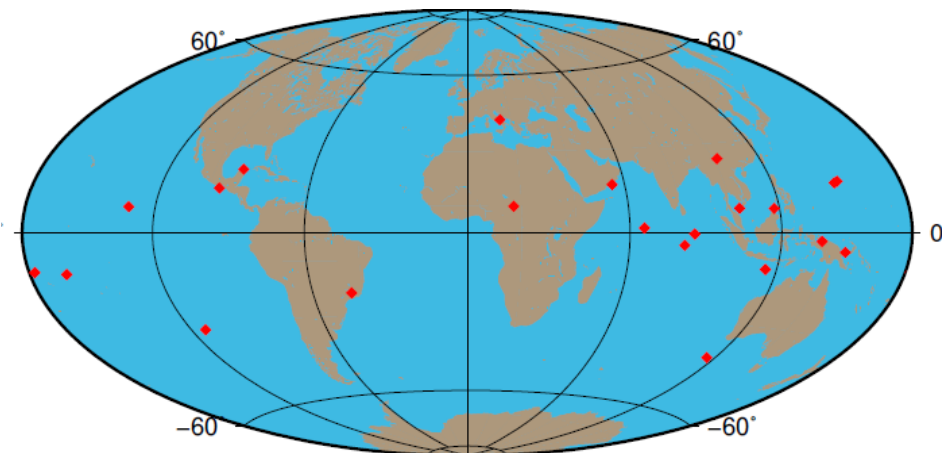
Figure 1. An example of lightning-induced transient luminous events observed at Yucca Ridge Field Station, Colorado. (a) Luminosity variations observed by a four-channel photometer during the 40 ms interval between 08h 57m 53.300s and 53.340s UT on June 23, 1995. (b) Enlarged display of photometer signals for the initial 3 ms interval.

Neubert, T., Chanrion, O., Heumesser, M. *et al.* Observation of the onset of a blue jet into the stratosphere. *Nature* **589**, 371–375 (2021).

Пороговый эффект?

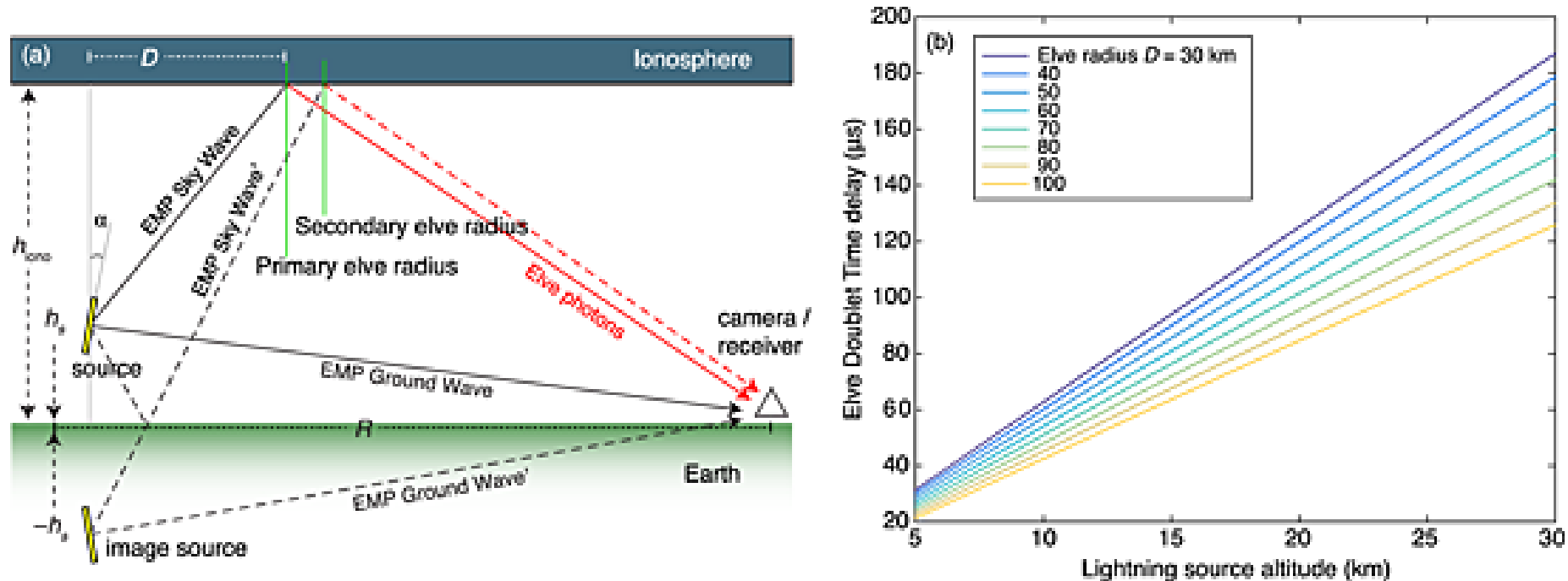
№	Date	Time (UTC)	Geographical coordinates (lat; long)	N_i	d , km	Polarity and peak current, kA
1	07.09.2016	09:51:35	-11.62; -161.69	8	163.6	+64.5
2	18.09.2016	22:06:48	9.66; 17.14	19	125.2	-135.1
3	18.10.2016	13:20:11	15.07; 149.26	1	218.3	-327.4
4	12.12.2016	15:20:20	-11.74; 115.30	9	137.2	+101.3
5	14.12.2016	01:55:08	-21.60; -44.78	5	217.3	-210.3
6	10.04.2017	13:06:59	-5.68; 148.404	20	90.7	-161.7
7	05.05.2017	17:23:10	-0.462; 84.791	9	243.5	-217.1
8	07.06.2017	19:29:38	17.181; 55.166	2	248	-171.7
9	14.06.2017	22:27:38	42.033; 14.909	7	165	-192.5
10	07.07.2017	15:13:12	7.794; 117.74	20	175.1	+132.4
11	04.08.2017	16:26:20	24.747; 101.527	5	96.6	-286.1
12	10.08.2017	10:42:09	-10.47; -177.163	7	275	+43.2
13	15.08.2017	14:49:24	-41.464; 115.897	1	92.4	-10.5
14	19.08.2017	17:31:58	-4.255; 81.087	4	389.2	-204.2
15	22.08.2017	05:03:24	21.698; -88.373	10	235.1	-120.2

Географическое распределение событий



Chen et al. 2008

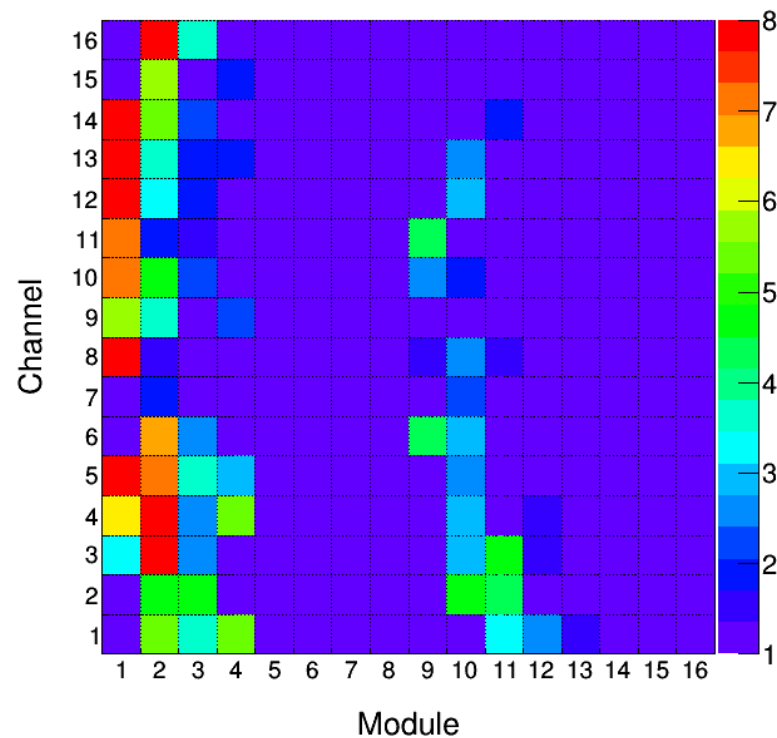
Elve doublets



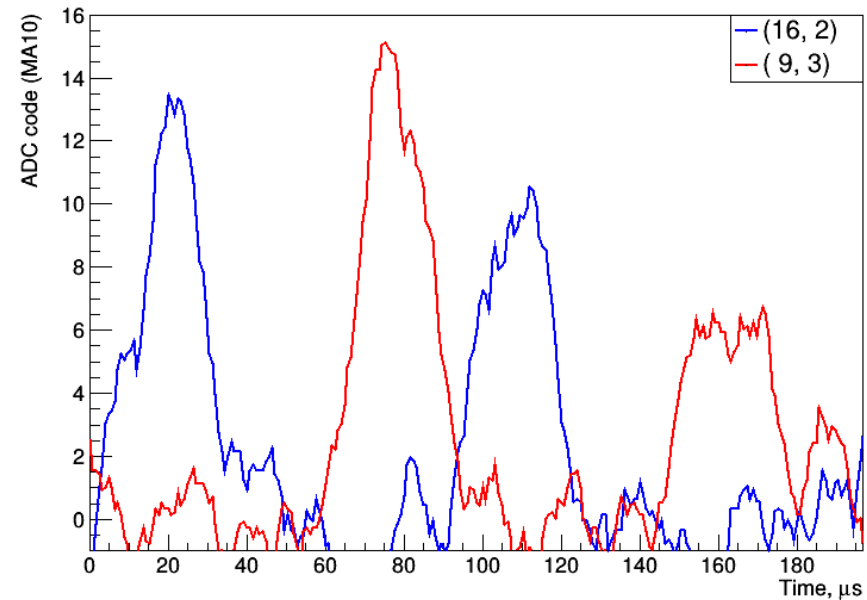
Marshall, R. A., C. L. da Silva, and V. P. Pasko (2015),
Elve doublets and compact intracloud discharges, Geophys. Res. Lett., 42

Elve doublets в данных детектора ТУС

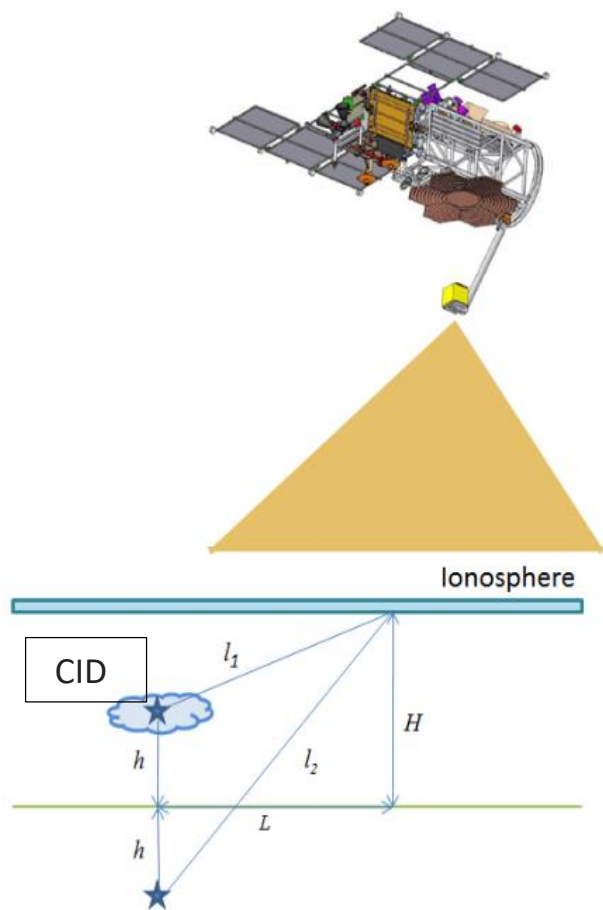
EAS-20170410_130659_ticks: 186 - 193



osc-eas_170410_130659

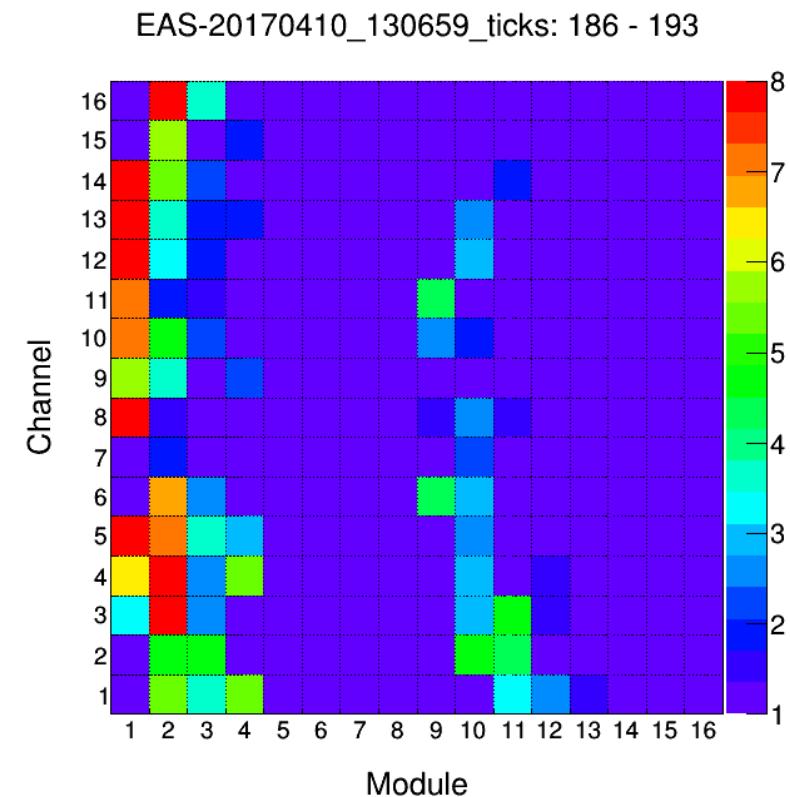
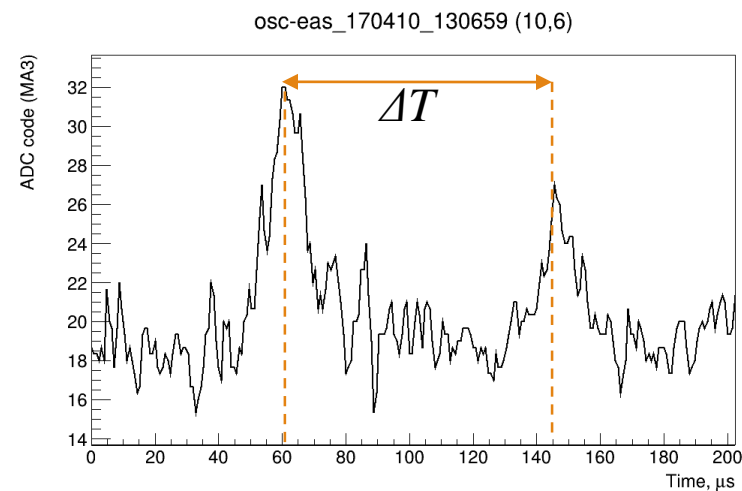


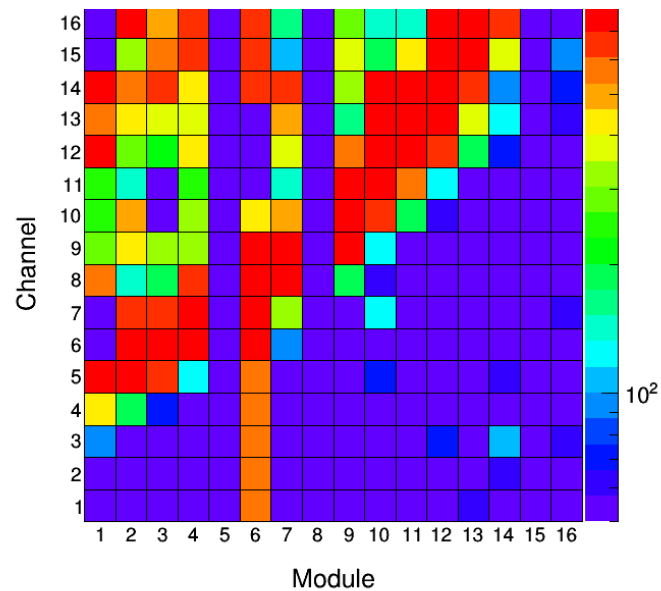
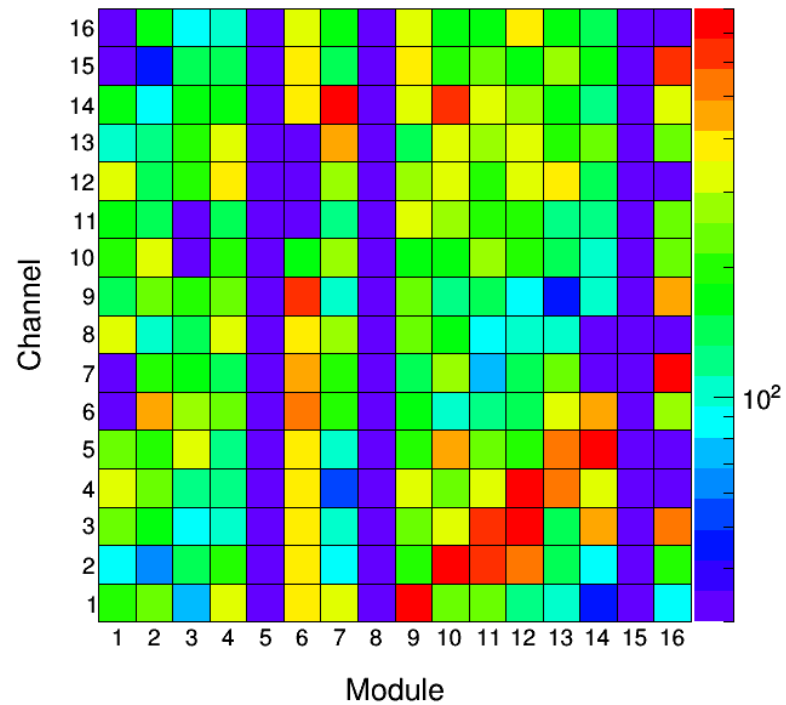
Определение высоты источника



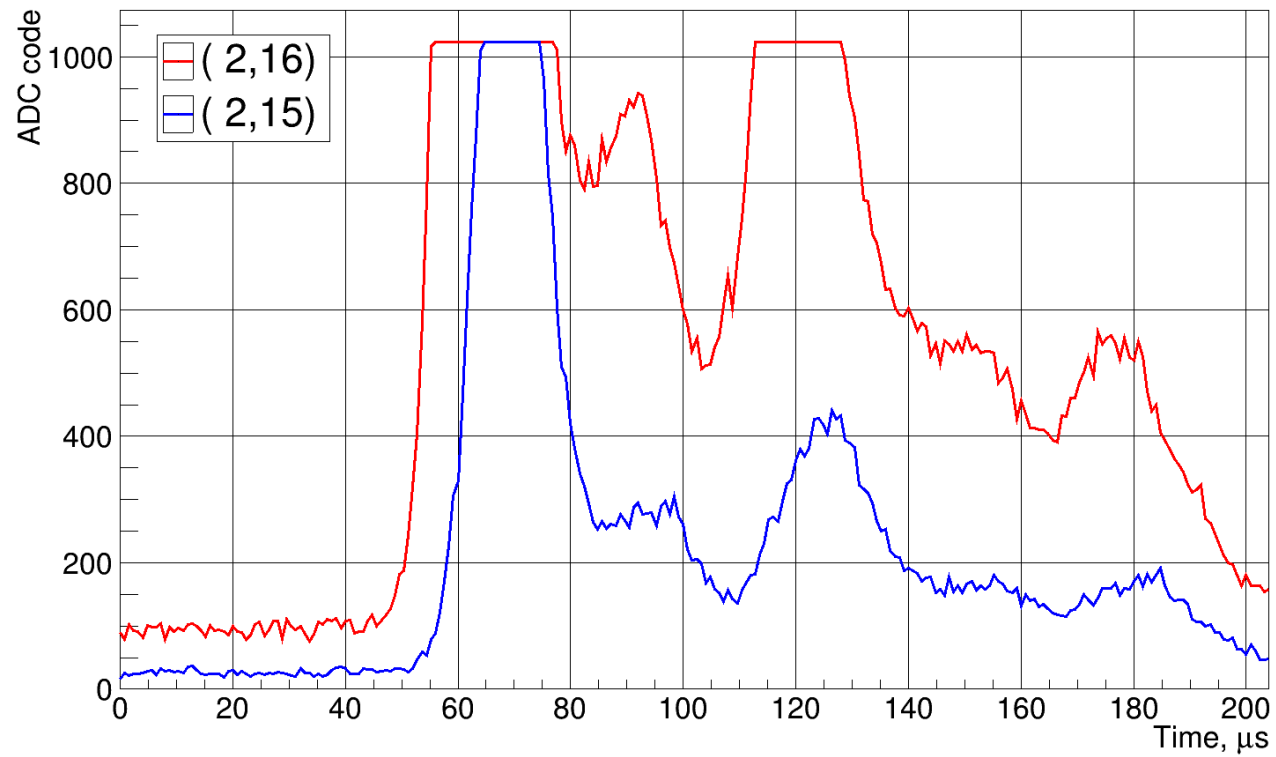
$$\Delta t = \frac{1}{c} \left(\sqrt{(H+h)^2 + L^2} - \sqrt{(H-h)^2 + L^2} \right)$$

$$L = L(lat, lon)$$

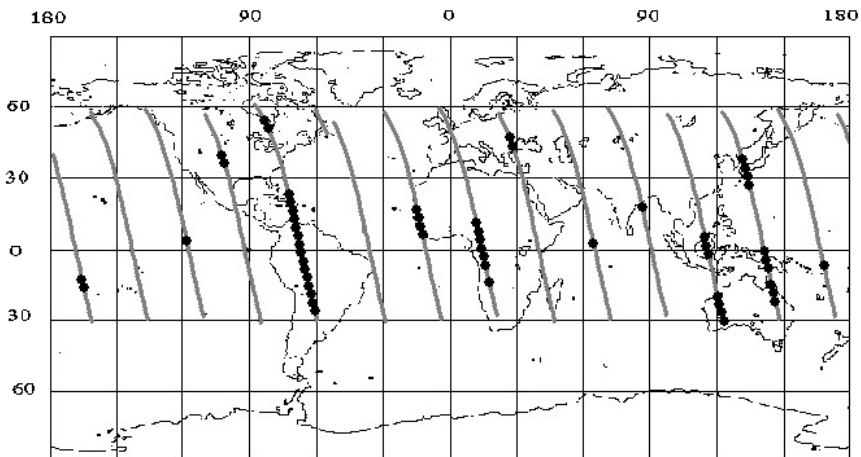




Экзотические вспышки: Множественный эльф

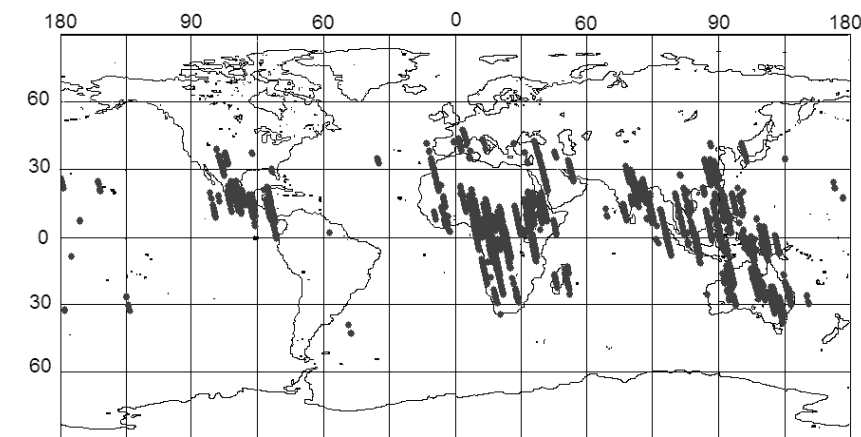


Серии вспышек на спутниках МГУ

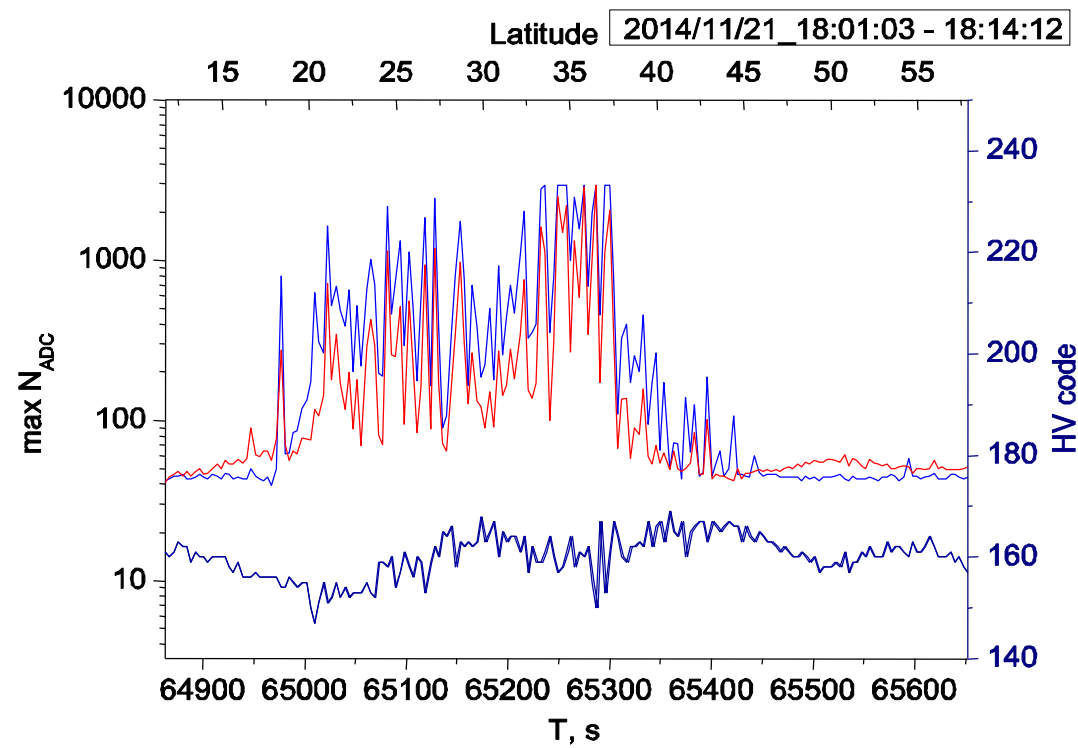


Пример данных измерения
за 1 день на спутнике
«Татьяна-2»

Серия УФ вспышек длительностью
более 400 с (>3000 км!)
Данные спутника «Вернов»

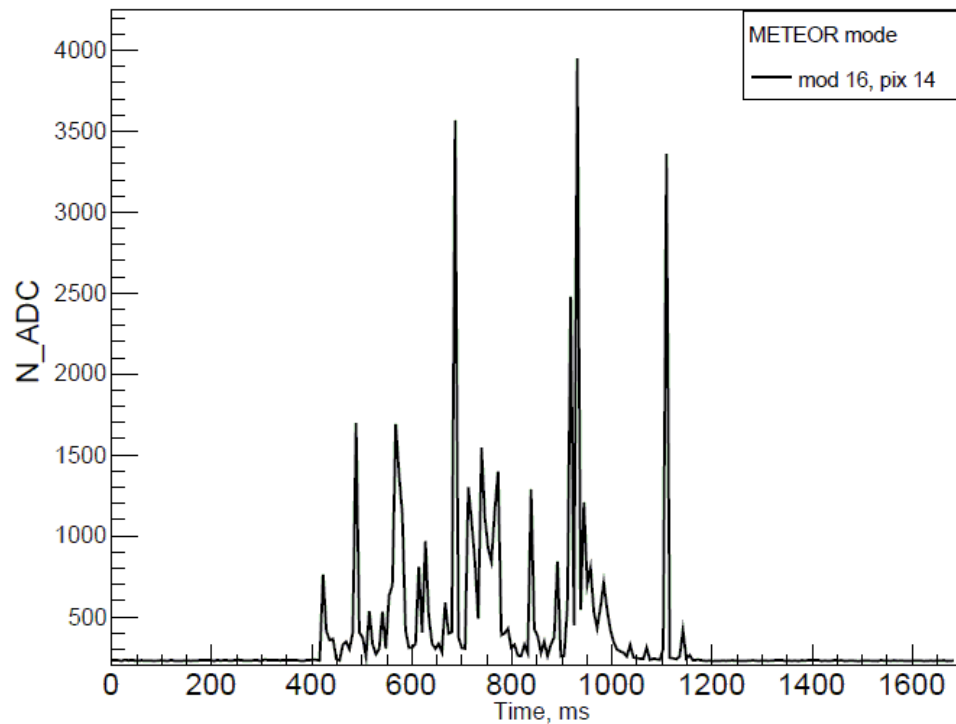


Серии вспышек измеренных
спутников «Вернов»



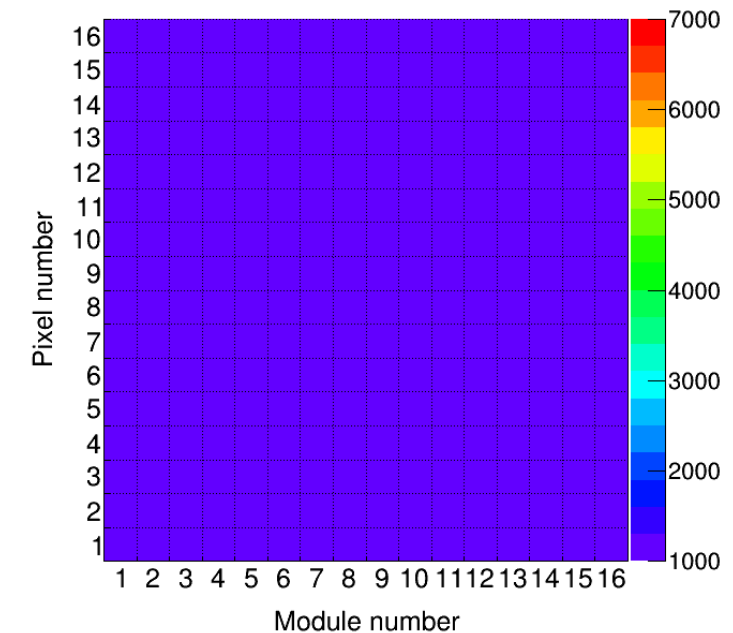
Измерение грозовой области детектором ТУС (временное разрешение 6.6 мс)

Digital Oscillogram

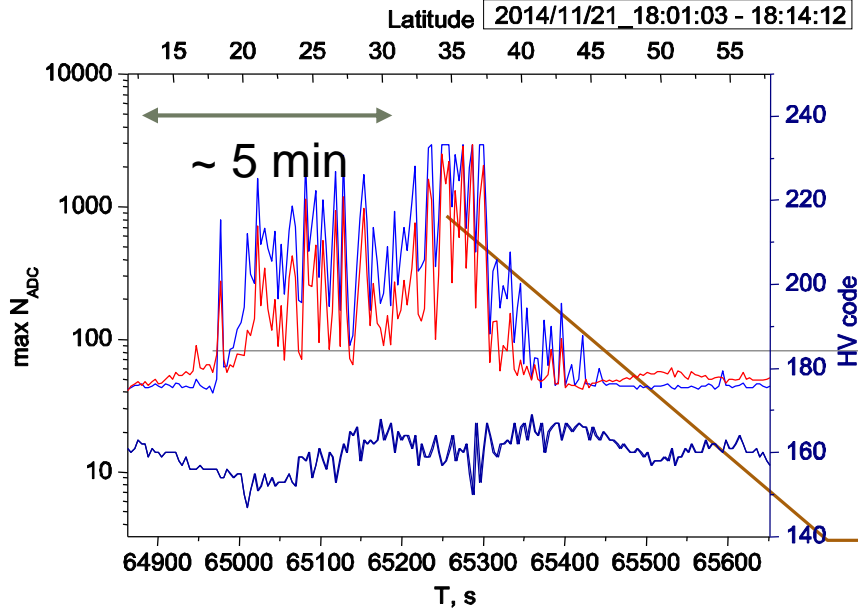


Короткие импульсы –
обратные удары молний*

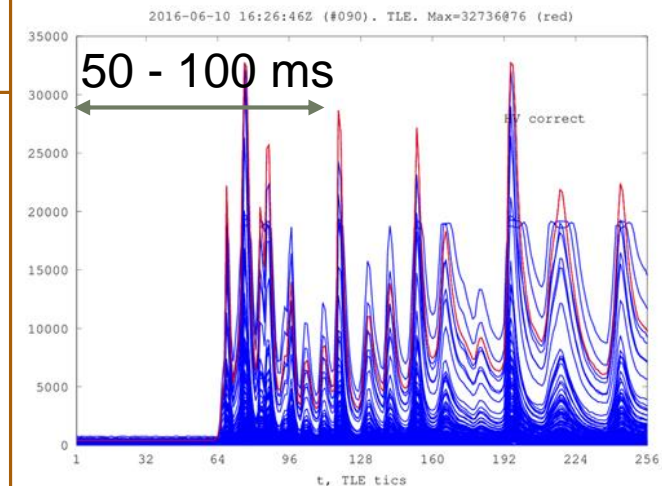
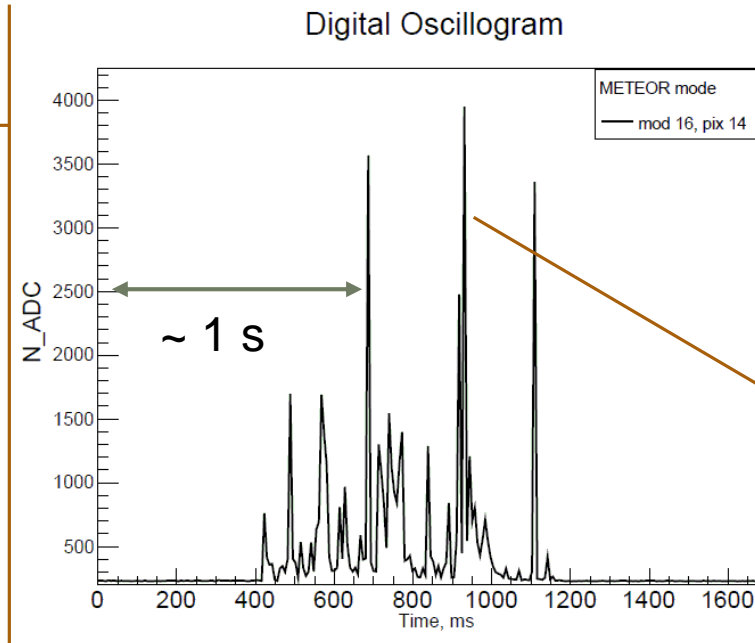
eas-20170102_023937_frame: 177



* Результат сравнения с данными сети Vaisala GLD360



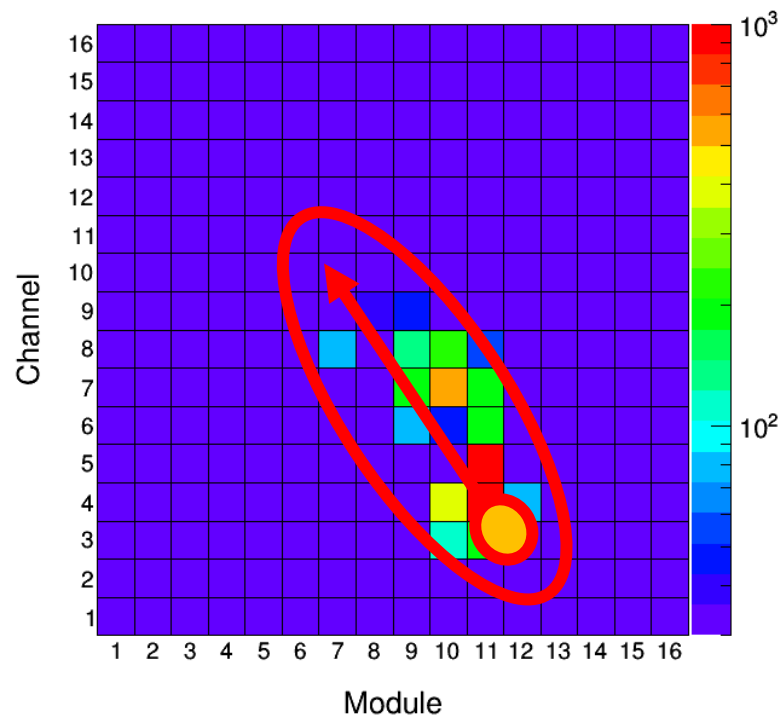
Серии вспышек в разных временных масштабах



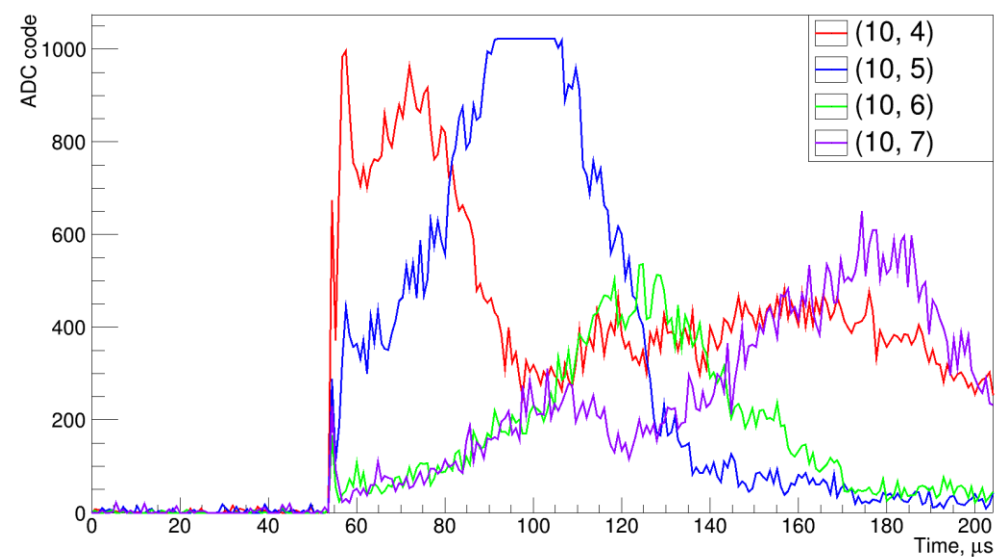
Важно провести непрерывные наблюдения вдоль траектории спутника с высоким временным разрешением.

Примеры «загадок» в данных спутника Ломоносов

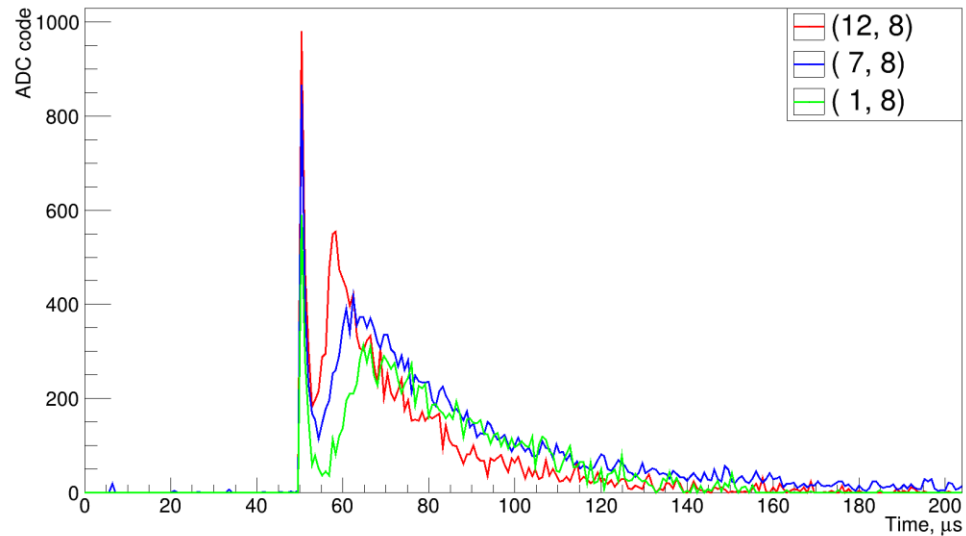
EAS-20160905_230528_tick: 217



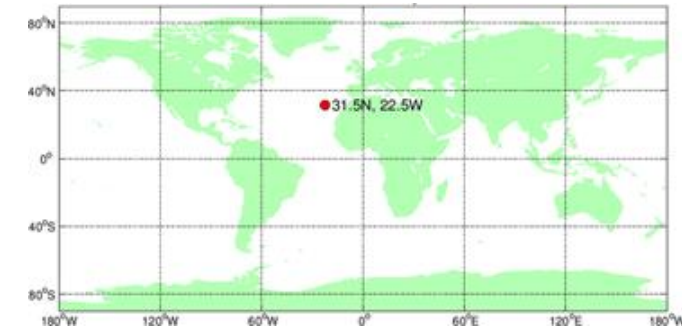
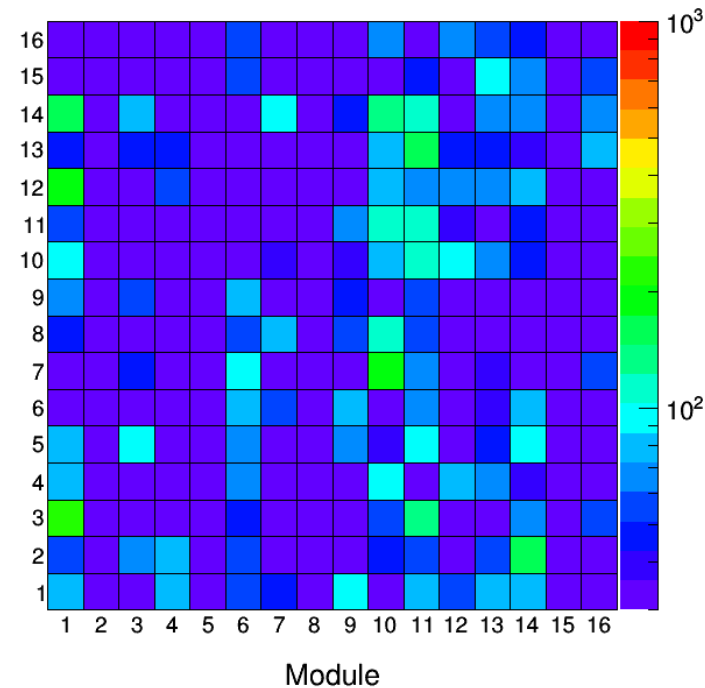
Мощная вспышка над Средиземным морем в отсутствие грозовой активности



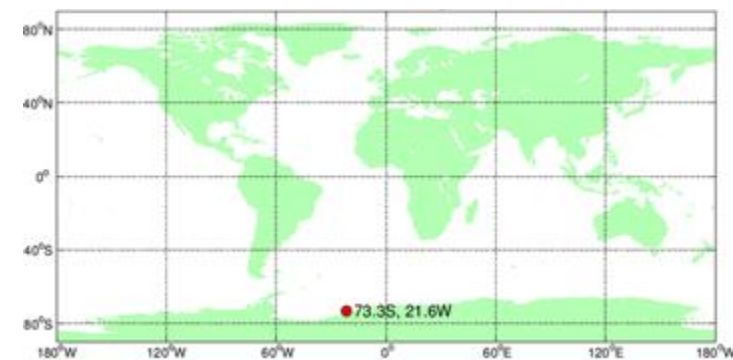
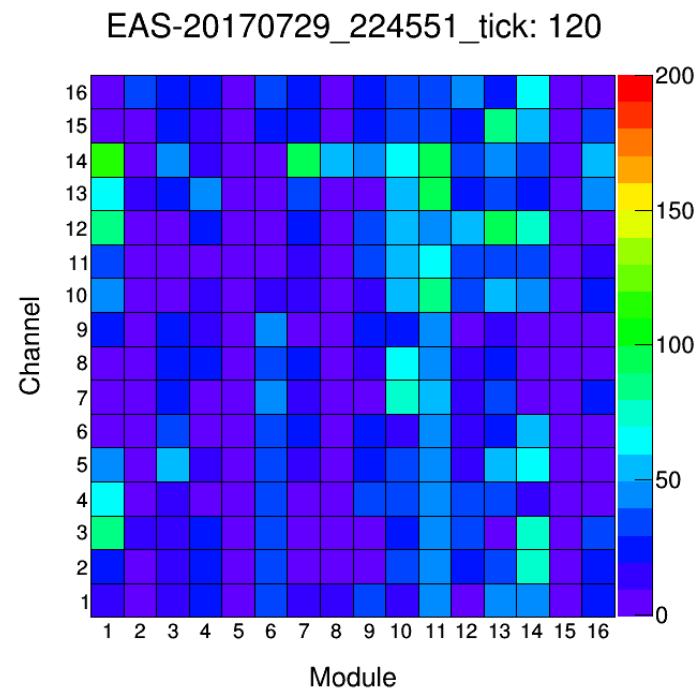
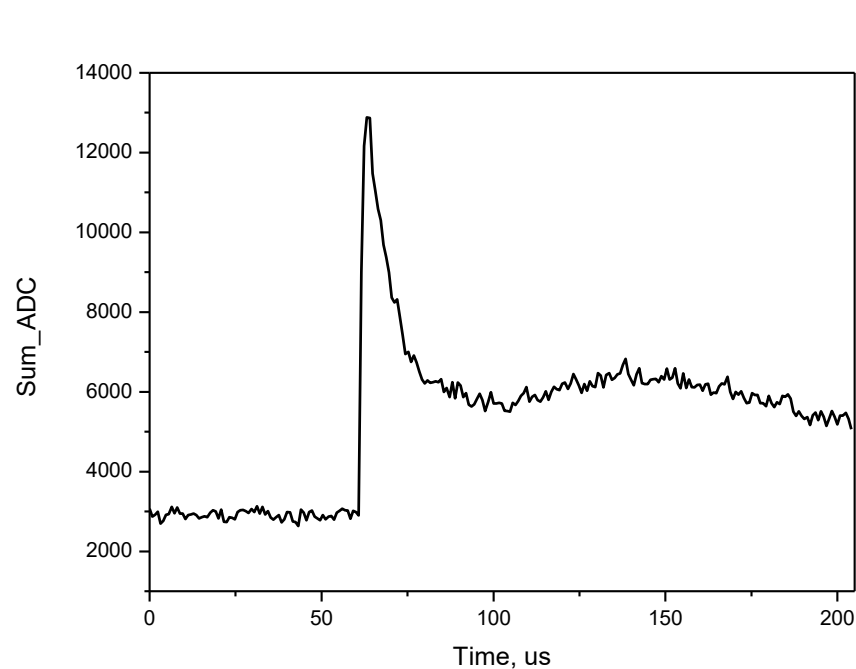
Внегрозовое событие над Атлантическим океаном



EAS-20170728_004707_tick: 150



Вспышка над Антарктидой



Есть молния в сопряженной точке
геомагнитного поля (данные
Vaisala GLD360)!

Космический эксперимент «УФ атмосфера» (Mini-EUSO)

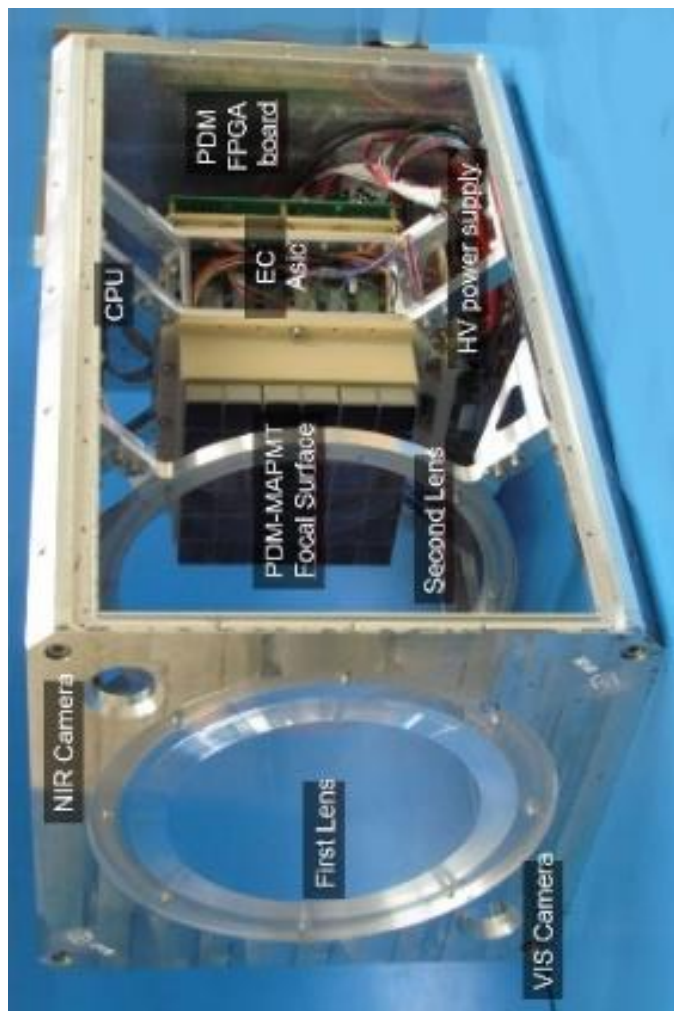


岩澤 駿
SHUN IWASAWA

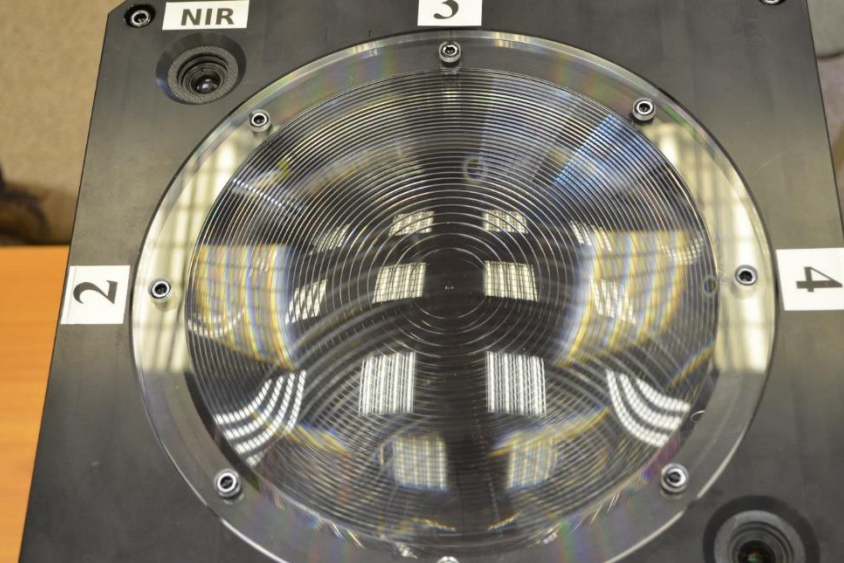


Основные технические параметры НА

НА «УФ атмосфера» – линзовый телескоп



Габаритные размеры	370×370×620 мм
Диапазон длин волн наблюдения	УФ: 300 – 450 нм
Поле зрения	36°× 36° = 0.42 ср
Входной зрачок Диаметр Площадь	25 см 490 см ²
Фокусное расстояние	25 – 27 см
Размер ячейки	3 мм
Число ячеек число 64-канальных МАФЭУ	2304 36
Разрешение изображения объекта в атмосфере	4.5 – 5 км
Площадь обзора атмосферы	260 км × 260 км = 6.8·10 ⁴ км ²
Временное разрешение	2.5 мкс, 320 мкс, 40 мс



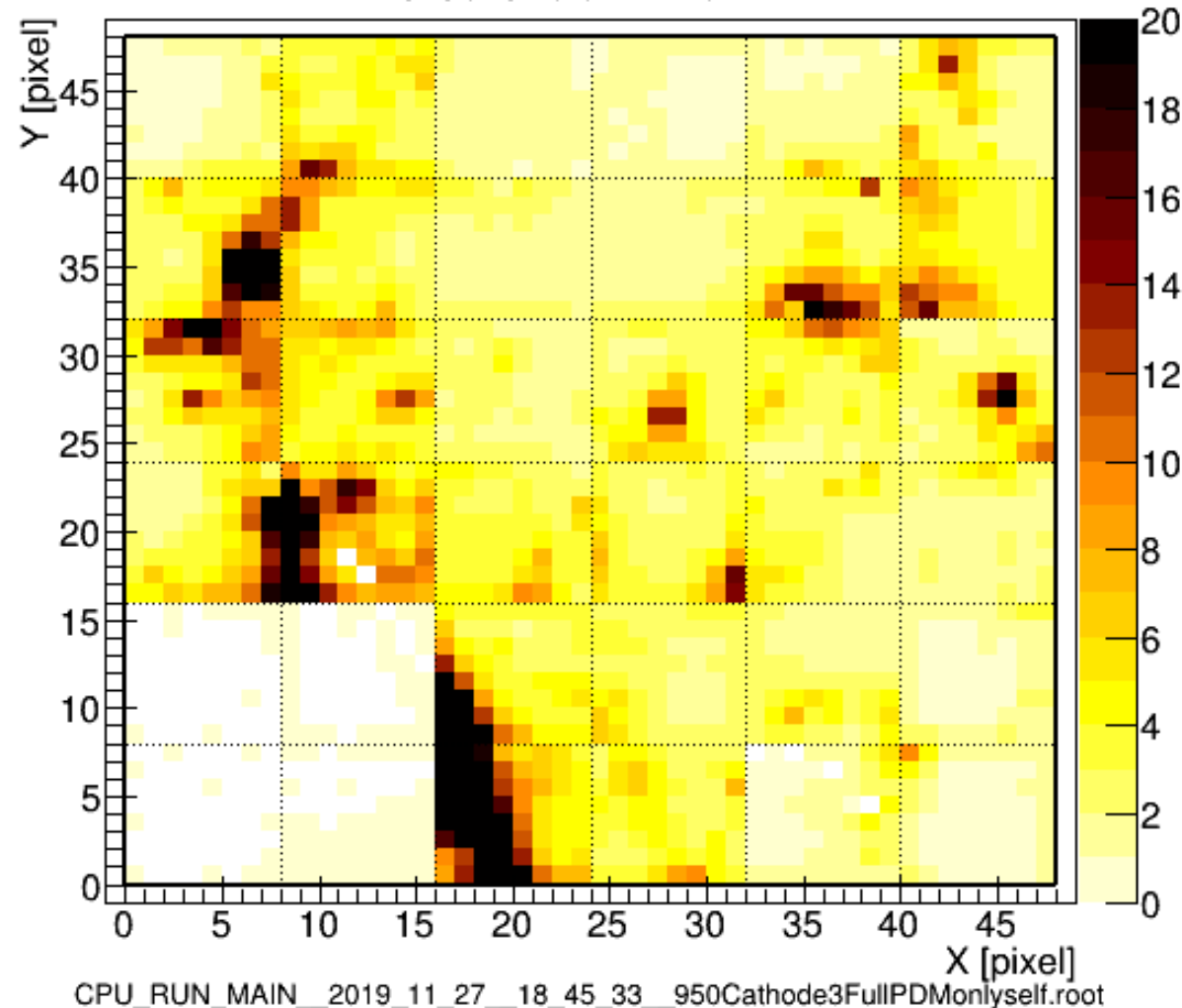
УФ атмосфера на борту МКС



Свечение Земли в поле зрения детектора: антропогенные источники и грозовые облака

GTU: 28008, pkt: 218, GTU in pkt: 104,

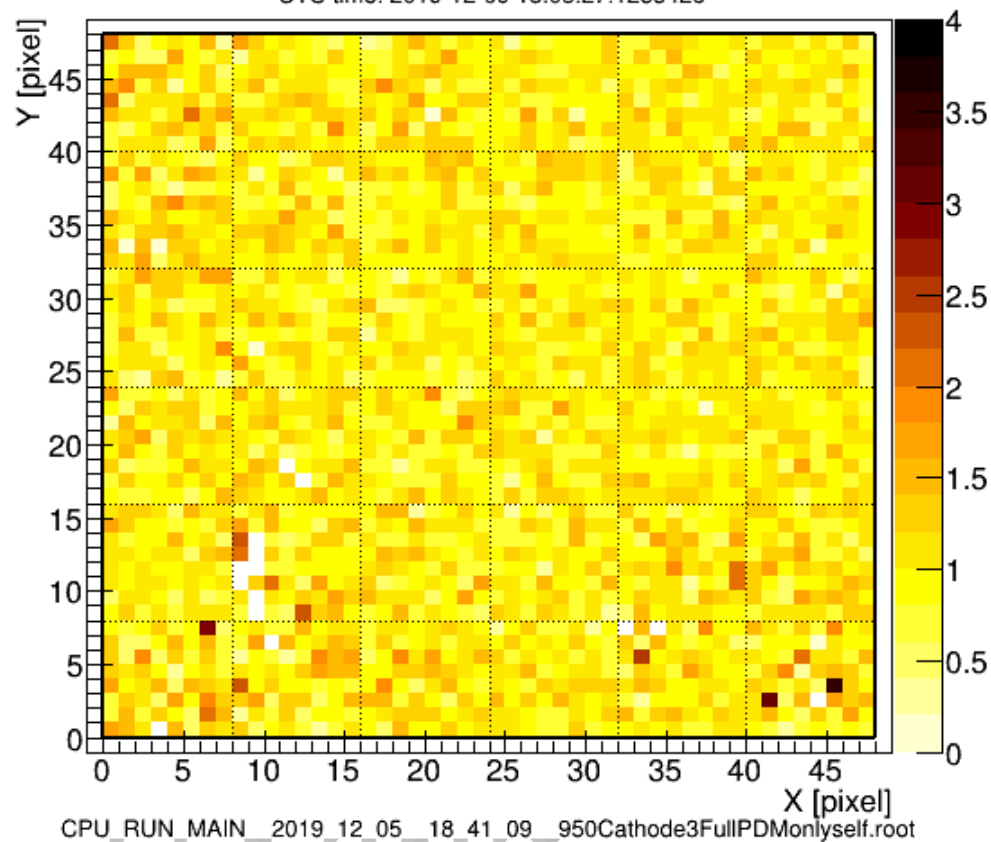
UTC time: 2019-11-27 18:47:11



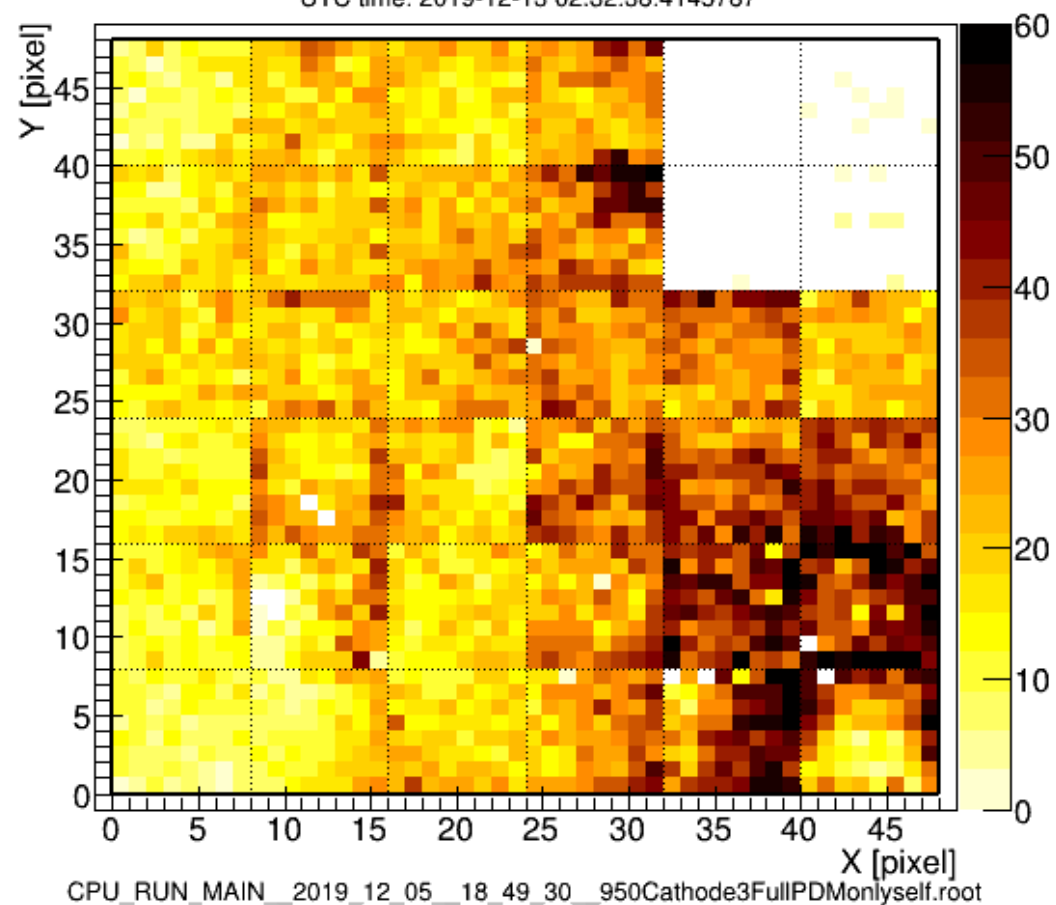
V_{MKC}

Транзиентные явления «эльф»

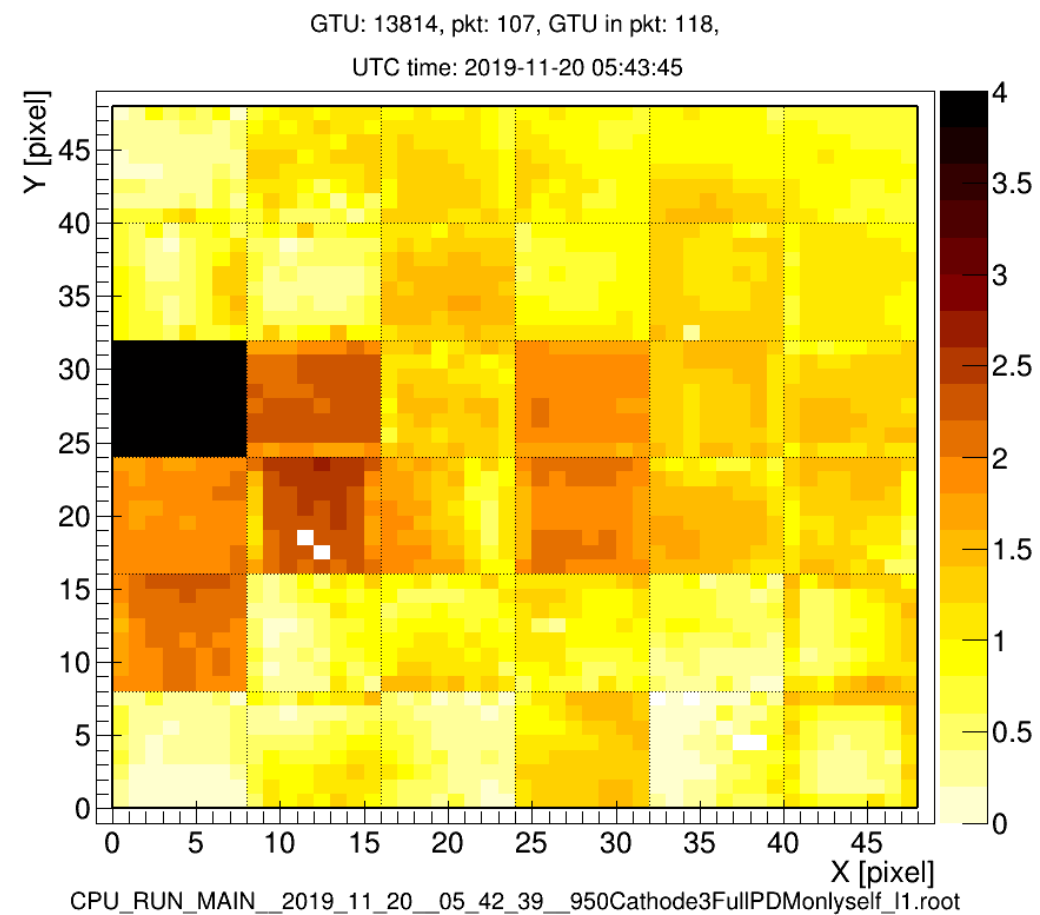
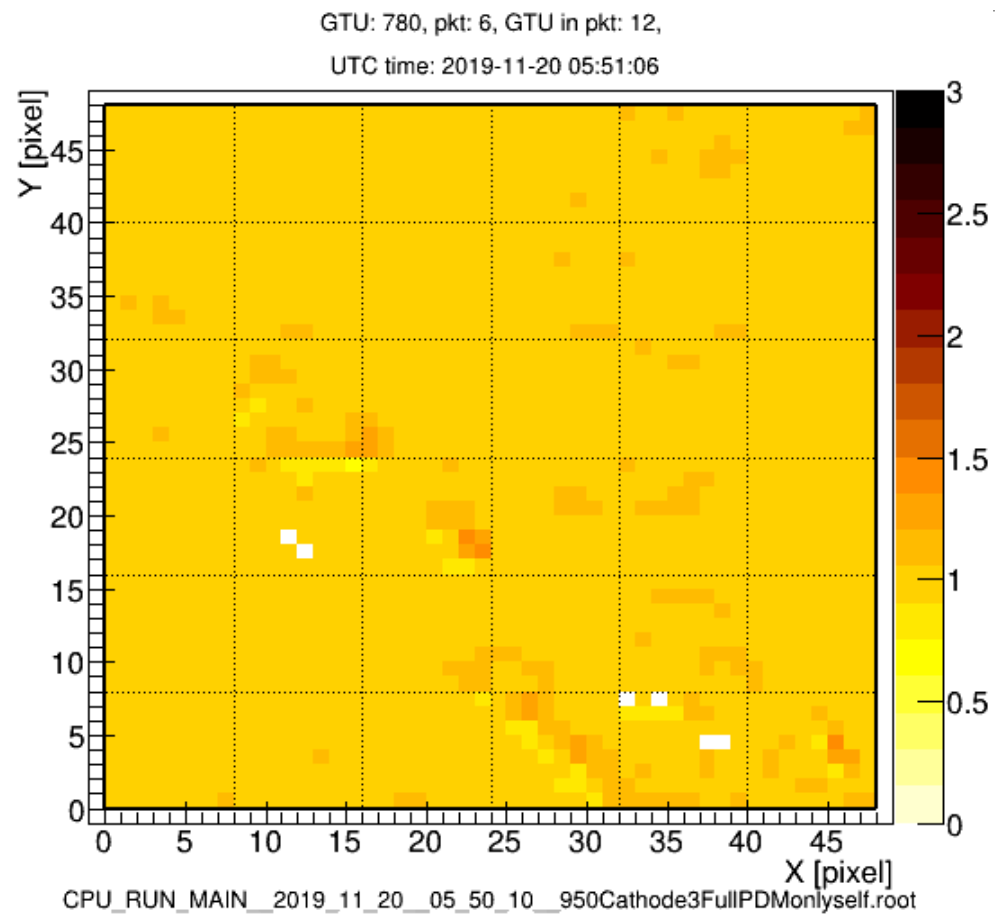
GTU: 57469, pkt: 448, GTU in pkt: 125,
UTC time: 2019-12-09 15:03:27.1283426



GTU: 88959, pkt: 694, GTU in pkt: 127,
UTC time: 2019-12-13 02:32:38.4145787



Метеоры



Что дальше?

1. Обработка данных эксперимента Mini-EUSO.
2. Аппаратура эксперимента Mini-EUSO-2, вне МКС для увеличения времени экспозиции.
3. Разработка компактных УФ телескопов для наноспутников.
4. Природа внегрозовых вспышек в атмосфере Земли.
5. Источник многократных эльфов.
6. Взаимосвязь TLE и TGF, измерения спектров излучений и анализ механизмов возникновения гамма-излучения и развития разряда.
7. Взаимосвязь ШАЛ и оптических транзиентов.
8. Взаимосвязь оптических явлений в атмосфере и магнитосферных процессов.

