

ЭКСПЕРИМЕНТ «УФ АТМОСФЕРА» НА МКС В КОНТЕКСТЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Суровцев Н.В.¹, Николаева В.Д.², Климов П.А.^{1,2},
Артемьев А.В.³, Сараев Р.Е.^{1,2}

¹*Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия,
surovcevnv@ty.msu.ru*

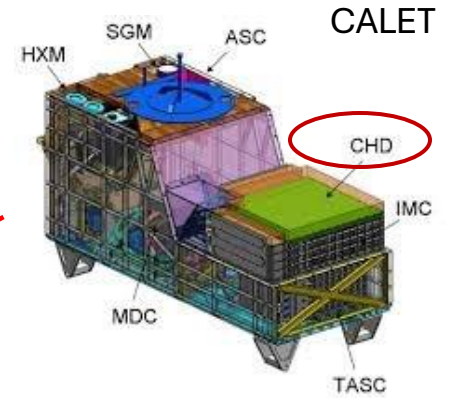
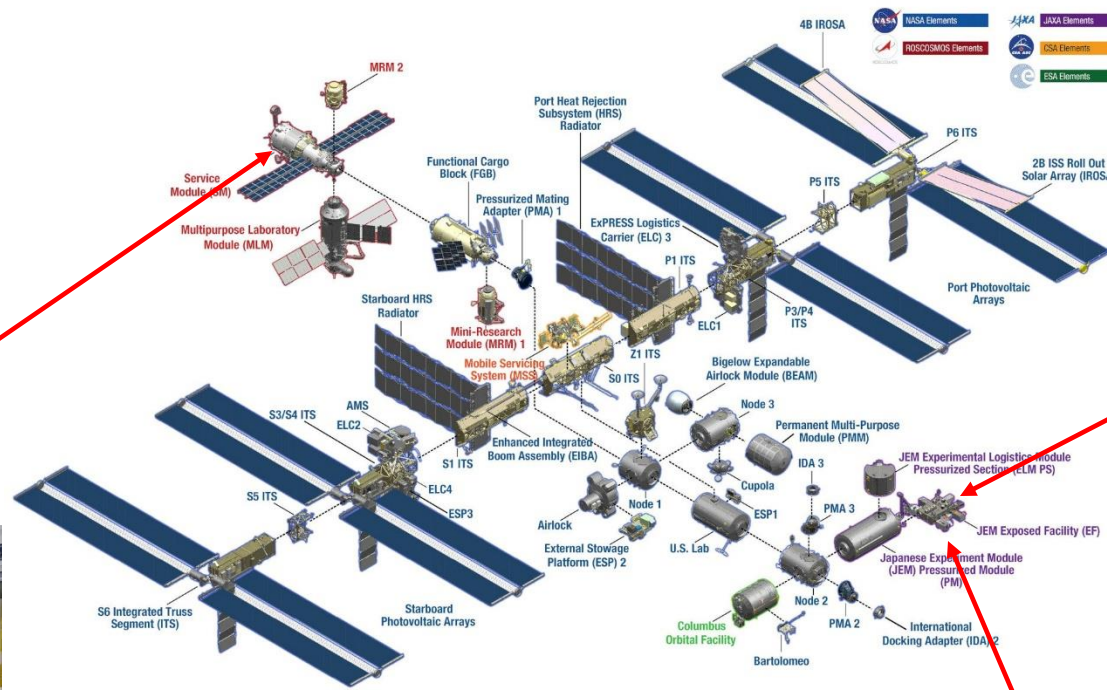
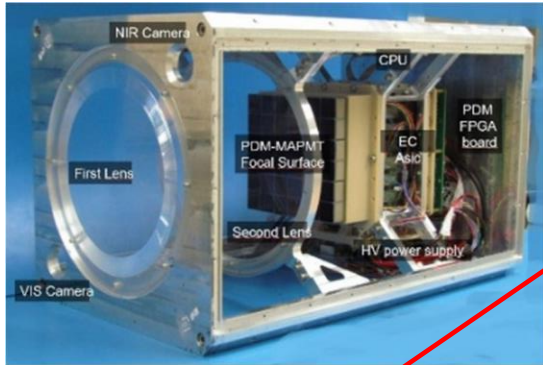
²*НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия*

³*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

Полярные сияния и высыпания частиц

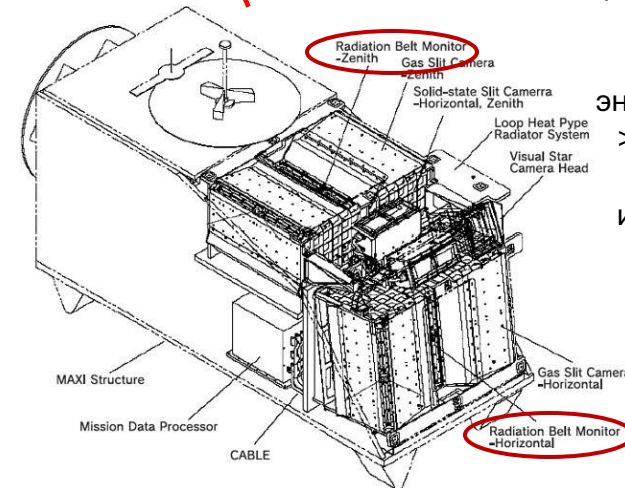
- Различные типы полярных сияний обусловлены высыпаниями частиц разного типа и энергии
- Быстрые формы сияний (ППС, ОМВ) ассоциированы с волновыми процессами в магнитосфере, которые приводят к импульсному ускорению частиц до субрелятивистских и релятивистских энергий.
- Реконструкция спектра высыпающихся частиц по спектру и высоте свечения – задача сложная, а прямые измерения свечения и спектров частиц – редкое событие (требуется совпадение наличия наземных оптических измерений и пролета спутника над станцией). Временное разрешение оптических детекторов и детекторов частиц, как правило различное.
- Поэтому, интересной задачей является одновременное измерение оптического излучения и потоков высыпающихся частиц на одном космическом аппарате. Таких экспериментов на сегодняшний день нет. Некоторый опыт был на спутнике «Ломоносов».
- МКС – низкоорбитальная космическая комплексная лаборатория: есть детекторы частиц, ближнего УФ-излучения, космических лучей в широком спектральном диапазоне.

Детектор «УФ атмосфера» и детекторы частиц на МКС



Детектор "УФ атмосфера" функционирует на российском сегменте МКС с 2019 года, за это время было произведено свыше 150 сеансов измерений. Детектор позволяет наблюдать свечение атмосферы в ближнем ультрафиолетовом диапазоне (300-400 нм). "УФ атмосфера" обладает высоким временным (2,5 мкс) и пространственным (5 км) разрешением в широком поле зрения ($\pm 18,3^\circ$), что позволяет ему регистрировать быстрые транзитные явления в атмосфере Земли. В авроральных широтах возможна регистрация пульсирующих полярных сияний и оптических микровсплесков, однако ранее подобные исследования не проводились при помощи данной аппаратуры.

MAXI



На японском модуле расположены астрофизические приборы **CALET** и **MAXI**, основными научными задачами которых является исследование ускорения космических лучей и гамма-всплесков. Однако в составе CALET расположен детектор **CHD**, который может использоваться для измерения потока электронов с энергией приблизительно $>1,6$ МэВ и $>3,6$ МэВ. В MAXI имеется монитор радиационных поясов, **RBM**, измеряющий потоки электронов с энергией $>0,3$ МэВ с временным разрешением 1 с.

Глобальная цель работы:

Оценка вклада высыпаний электронов высоких энергий в авроральное свечение. Для этого будет проведен совместный анализ данных детекторов CALET и MAXI о высыпаниях частиц и оптического отклика атмосферы, измеренного детектором "УФ атмосфера". Такой анализ способен улучшить понимание связи структуры ППС с особенностями спектра высыпающихся электронов, а также определить энергию высыпающихся частиц, вызывающих оптические микровсплески.

Задачами данной работы являются:

1. Знакомство с аппаратурой и освоение программных средств анализа и визуализации данных.
2. Оценка возможности измерений ППС детектором «УФ атмосфера» и выявление оптимальных условий наблюдений.
3. Анализ геомагнитной активности для всех сеансов «УФ атмосфера».
4. Поиск примера регистрации полярных сияний для “хорошего” сеанса.

Отбор сеансов «УФ атмосфера», подходящих для исследования полярных сияний

Орбита МКС не превышает 52 градуса северной широты, из-за чего приходится искать сияния в западном полушарии (в области Канады), где авроральный овал опускается ниже по географической широте из-за различия в углах оси вращения Земли и ее геомагнитного поля. Это делает возможным наблюдения полярных сияний в условиях **высокой геомагнитной активности**.

За время одного сеанса детектора «УФ атмосфера» МКС совершает 6-10 полных витков вокруг Земли. При этом необходимо прохождение в достаточно широких высотах Северной Америки в **ночное время**.

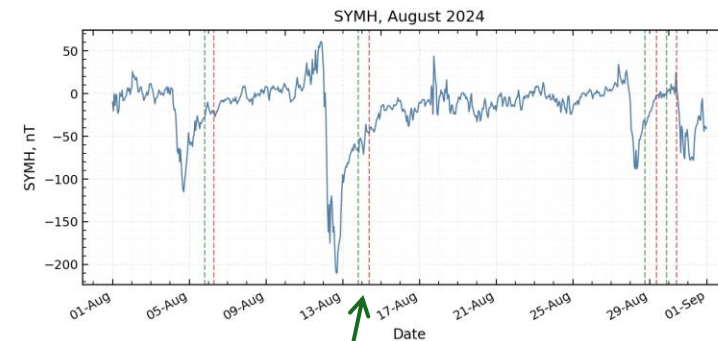
Инфраструктура Канады (широкая сеть наземных меридиональных цепочек магнетометров и камер всего неба (all-sky imagers)) является дополнительным преимуществом поиска в этой области.

Несмотря на более чем 150 проведённых сеансов УФ-атмосферы, данные с корректно обработанным временем пока доступны только с первых 44 сеансов.

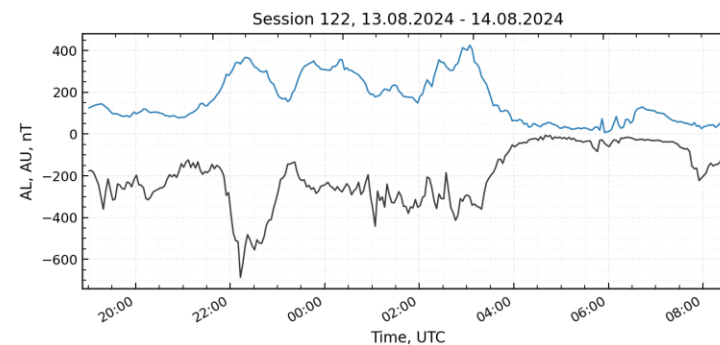
Анализ геомагнитной обстановки во время сеансов «УФ атмосфера»

Произведен анализ геомагнитной обстановки во время сеансов «УФ атмосфера» и составлена база данных на сайте лаборатории КЛПВЭ, в которой приведены временные промежутки сеансов, максимальные значения SYM-H-индекса (характеризующего интенсивность геомагнитной бури), AU-, AL-, AE-индексов (характеризующих интенсивность авроральных суббурь). Также показано наличие и определена фаза геомагнитной бури и суббурь во время сеансов с их максимальными амплитудами.

Session Number	Session start date	Session start time, UT	Session end date	Session end time, UT	Geomagnetic Storm Phase	Storm SYM-H amplitude	Substorm characteristics	AE	AL	AU
1*	10/7/2019	18:40	10/8/2019	7:25						
2*	10/19/2019	18:58	10/20/2019	7:40						
3*	10/25/2019	20:40	10/26/2019	7:42						
4*	11/6/2019	18:58	11/7/2019	6:10						
5	11/19/2019	18:18	11/20/2019	3:01	no storm		2 isolated substorms (-150, -140)	170.0	-158.0	65.0
6	11/27/2019	18:20	11/28/2019	5:45	no storm		2 isolated substorms (-350, -80)	348.0	-336.0	73.0
7	12/5/2019	18:25	12/6/2019	5:56	no storm			109.0	-70.0	50.0
8	12/30/2019	18:10	12/31/2019	5:25	no storm		1 isolated substorm (-150)	180.0	-155.0	77
9	1/8/2020	18:58	1/9/2020	6:10	no storm		substorm activity during all session	562.0	-409.0	196.0
10	1/14/2020	17:28	1/15/2020	5:25	no storm			104.0	-100.0	24.0
11	2/21/2020	18:22	2/22/2020	5:44	recovery	-45	substorm activity during all session	424.0	-263.0	211.0
12	3/2/2020	18:27	3/3/2020	5:50	no storm			166.0	-99.0	86.0
13	3/13/2020	17:50	3/14/2020	5:30	no storm		3 isolated substorms (-200, -140, -70)	252.0	-219.0	50.0
14	3/31/2020	18:25	4/1/2020	6:05	no storm		substorm activity during all session	425.0	-343.0	142.0



Пример вариации SYM-H индекса для августа 2024 г. В этот месяц было проведено 4 сеанса «УФ атмосфера». Начало и конец сеансов показаны зеленой и красной пунктирными линиями соответственно.



На нижней панели приведены вариации авроральных индексов AU и AL для сеанса 122, проходящего на фазе восстановления геомагнитной бури. Наблюдается высокая геомагнитная активность с суббурями амплитудой до -600 нТл.

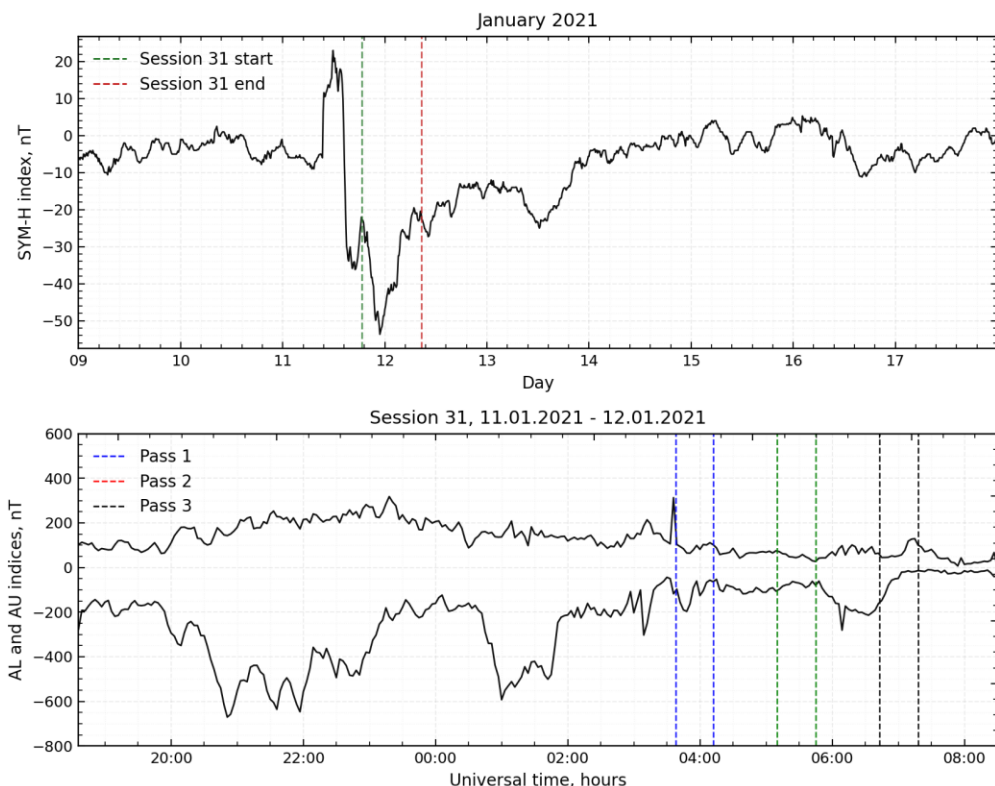
Распределение сеансов «УФ атмосфера» по геомагнитной обстановке



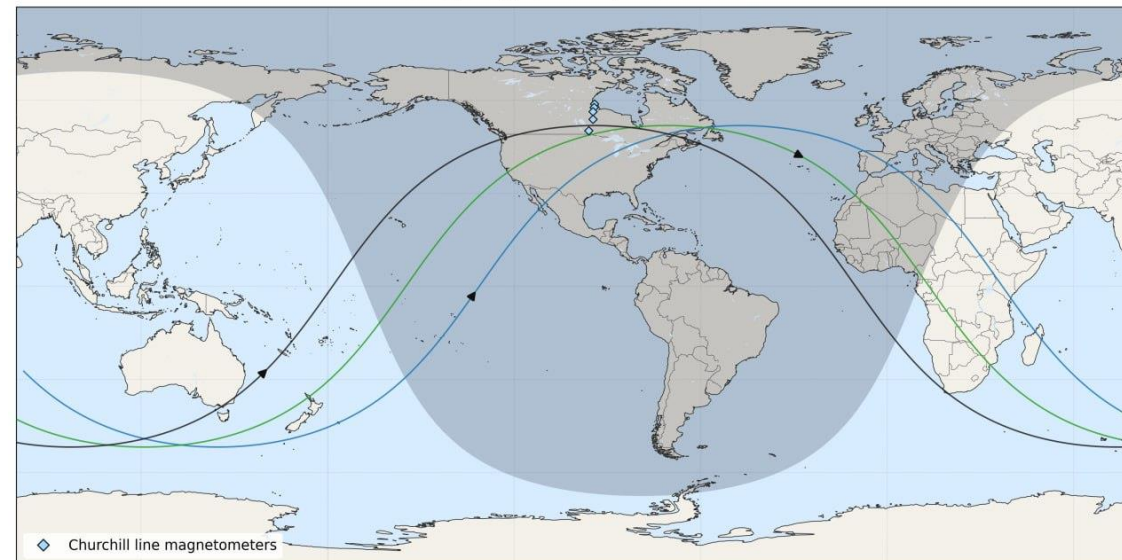
С учетом условий наблюдений и геомагнитной обстановки был определен наилучший сеанс для проведения «поисковых» работ:
Сеанс 31 (11.01.2021-12.01.2021).

Сеанс 31. 11.01.2021-12.01.2021

Траектории полёта МКС во время 31 сеанса над канадским сектором Арктики в темное время суток. Различными цветами обозначены три витка пролёта орбиты. Стрелками на траектории показано направление движения МКС.



ISS Trajectory, 2021.01.12, 02:55-07:50 UT



Геомагнитная обстановка:

Сверху: вариации SYM-H с 9 по 17 января 2021. «Классическая» структура во время геомагнитной бури. Вертикальными линиями отмечено начало и конец сеанса 31, который приходится на главную и раннюю фазу восстановления.

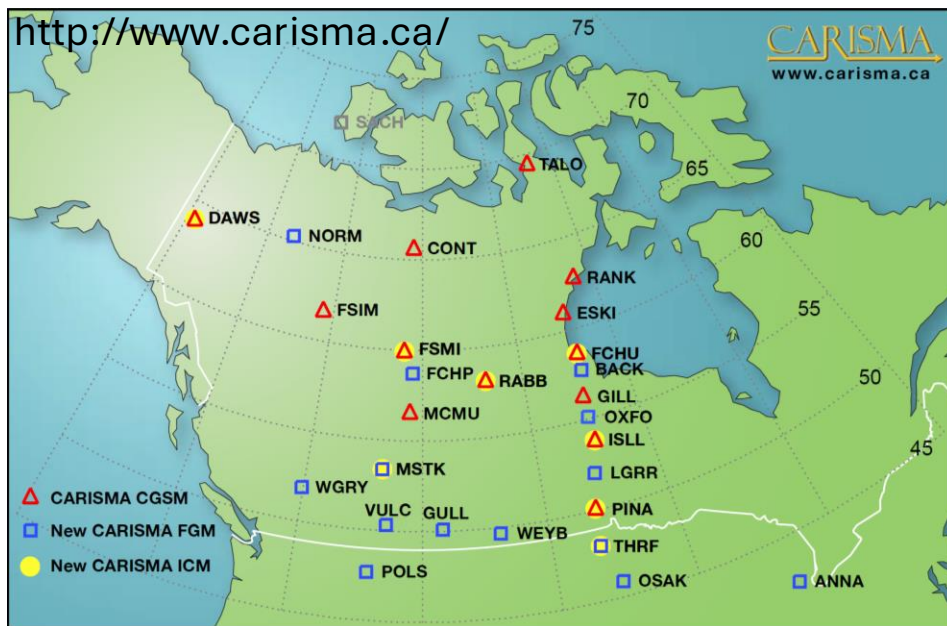
Снизу: вариации авроральных индексов AU, AL во время сеанса 31 показывают наличие суббуревой активности, и можно ожидать значительного расширения аврорального овала к югу.

Вертикальными линиями обозначены пролёты над канадским сектором, цвета соответствуют рисунку справа.

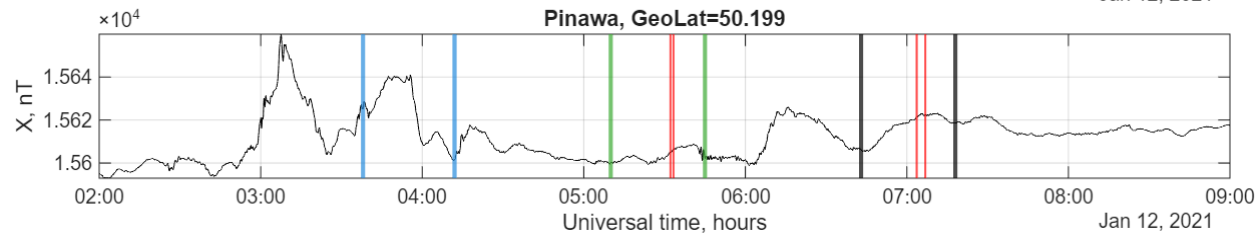
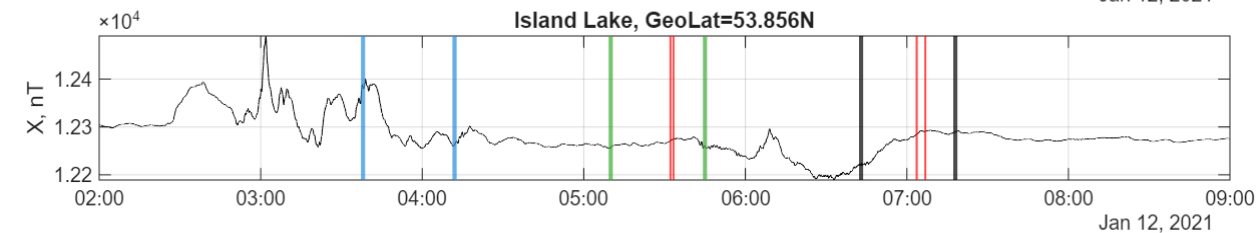
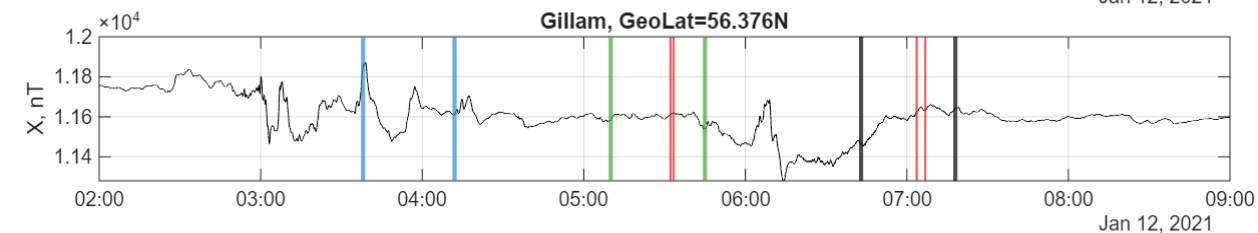
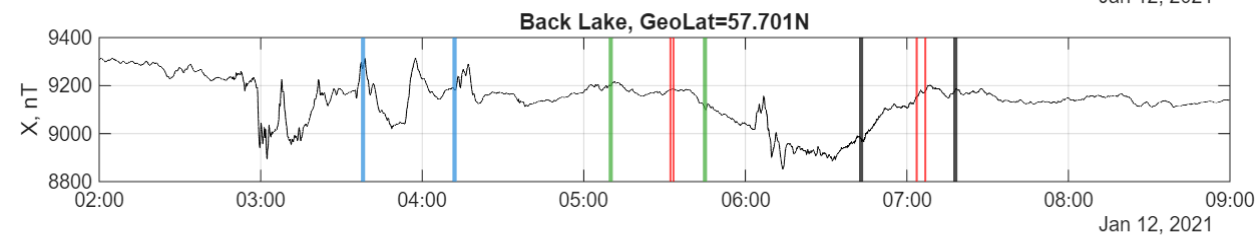
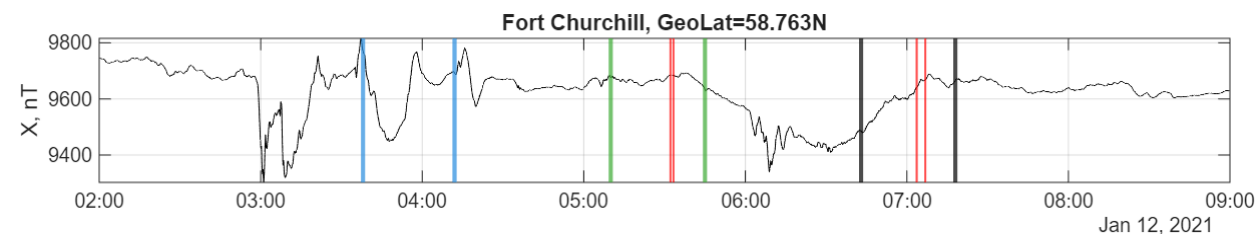
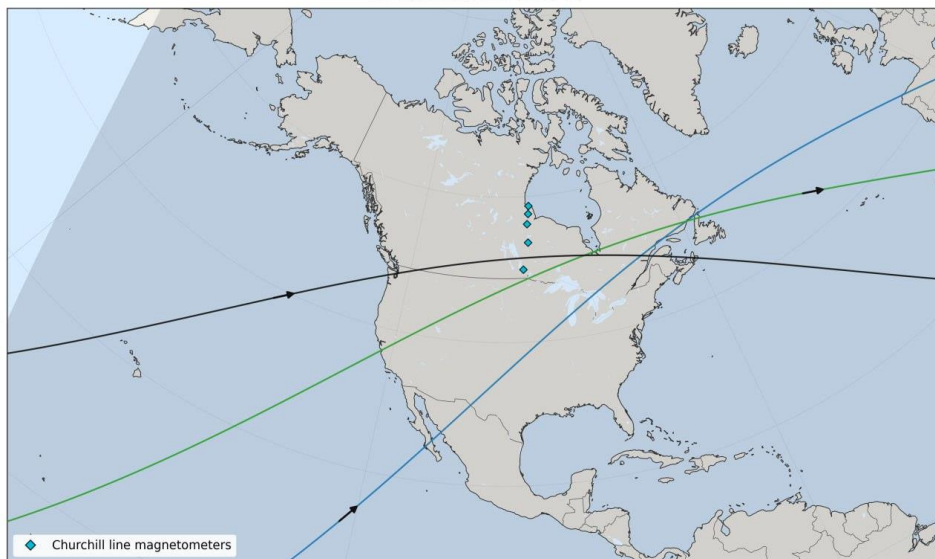
В таблице приведены географические, исправленные геомагнитные координаты AACGM и магнитное локальное время для самой северной точки каждой орбиты.

N	UT	Geographic		AACGM		MLT
		Latitude (degrees N)	Longitude (degrees E)	Latitude (degrees N)	Longitude (degrees E)	
1.	03:58:27	51.8018	-45.8975	54.5755	38.6495	1.5474
2.	05:31:21	51.8018	-70.7115	59.6846	9.8758	1.2835
3.	07:04:14	51.8018	-94.3257	60.9336	-24.0425	0.6852

Оценка наличия геомагнитных возмущений на широтах МКС во Сеанса 31 по данным меридиональной цепочки магнетометров CHARISMA

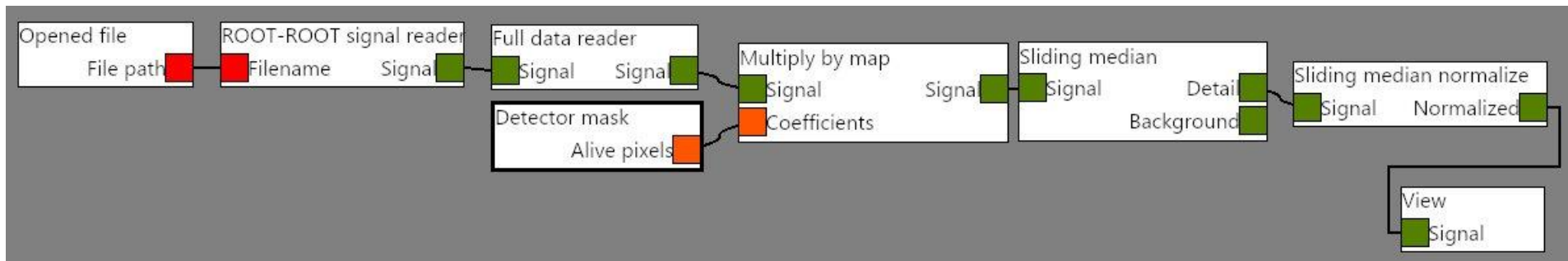


ISS Trajectory, 2021-01-12, UT



PADAMO-RS (PAIPS DAta MOonitor, <https://github.com/saraevrom/PADAMO-RS>) - универсальная программа для предобработки и визуализации данных наземных изображающих фотометров проекта PAIPS и орбитальных детекторов "УФ атмосфера", "ТУС" (спутник Ломоносов), "СОНЭТ" (спутник Скорпион).

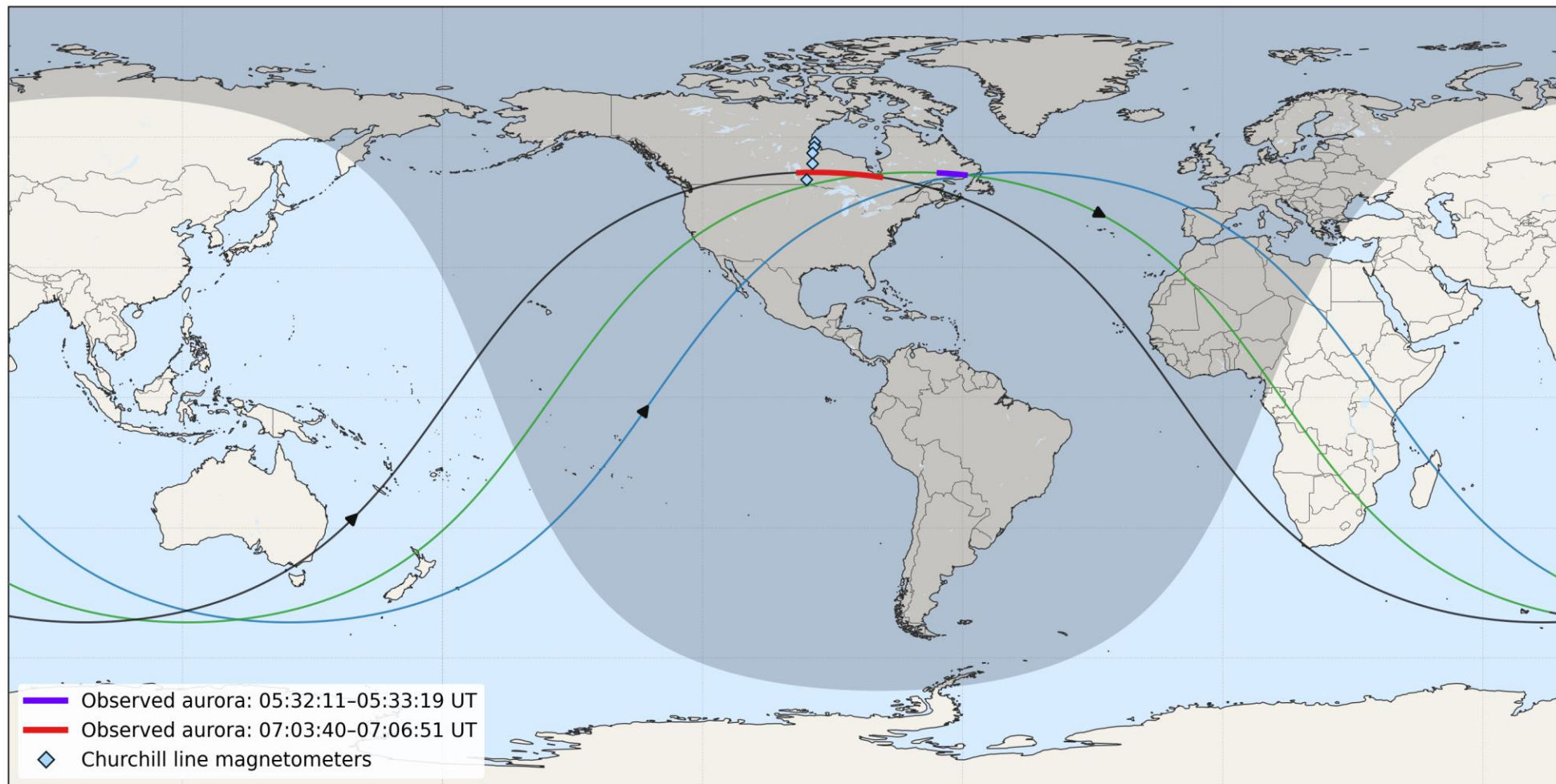
PADAMO-RS позволяет также производить моделирование и поиск различных типов событий. Процесс анализа данных может быть гибко настроен с помощью построения графа обработки. Пример такого графа показан на рисунке и демонстрирует: загрузку данных в ROOT формате, маскирование данных, вычитание фона и масштабирование по шуму методом скользящей медианы.



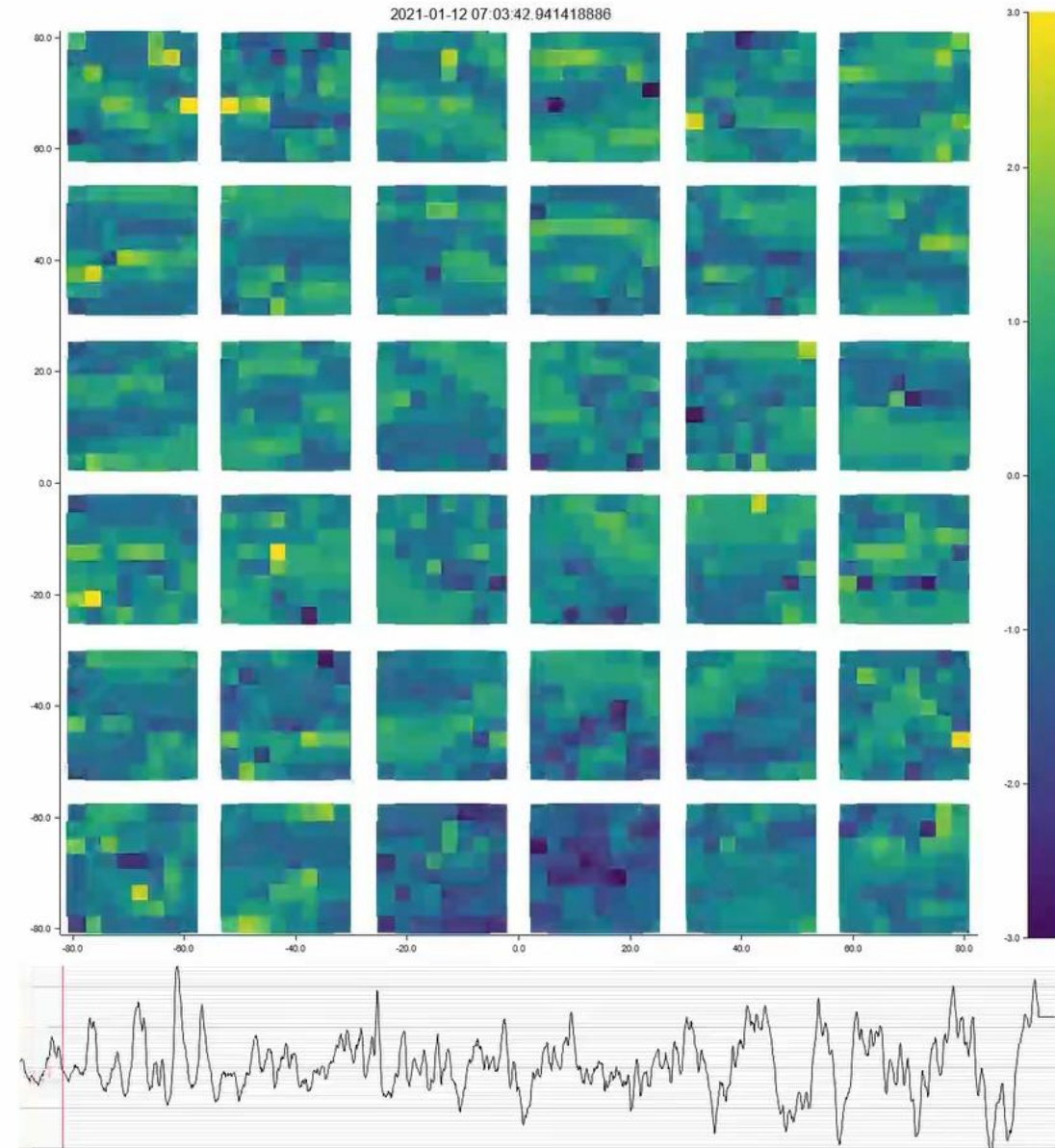
Были зарегистрированы полярные сияния по данным «УФ атмосфера» для двух пролетов!

Интервалы наблюдения сияний отмечены на траекториях орбит МКС.

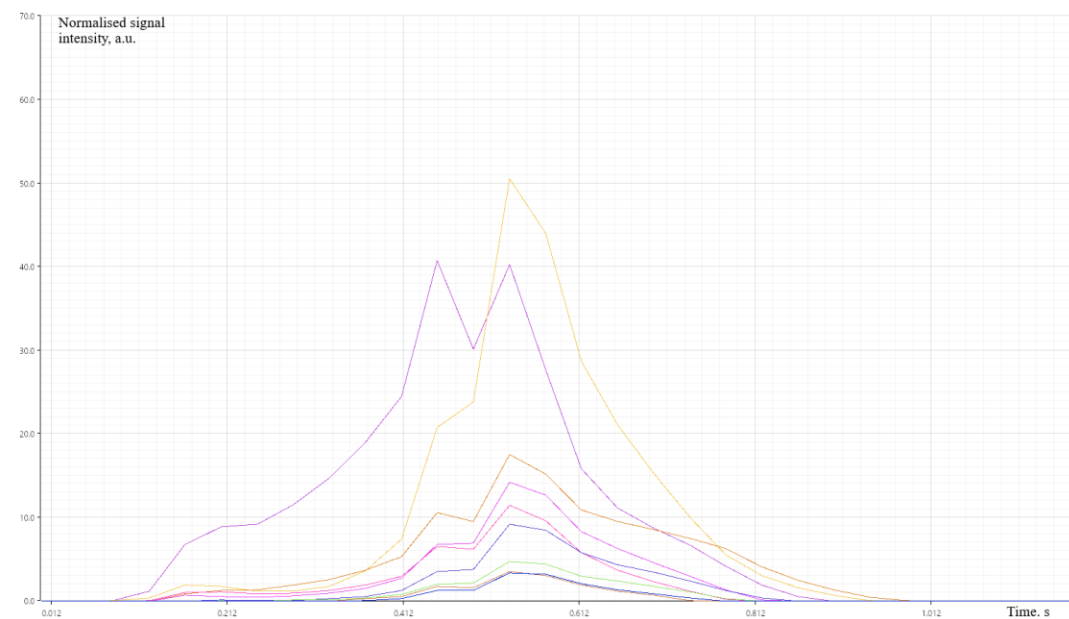
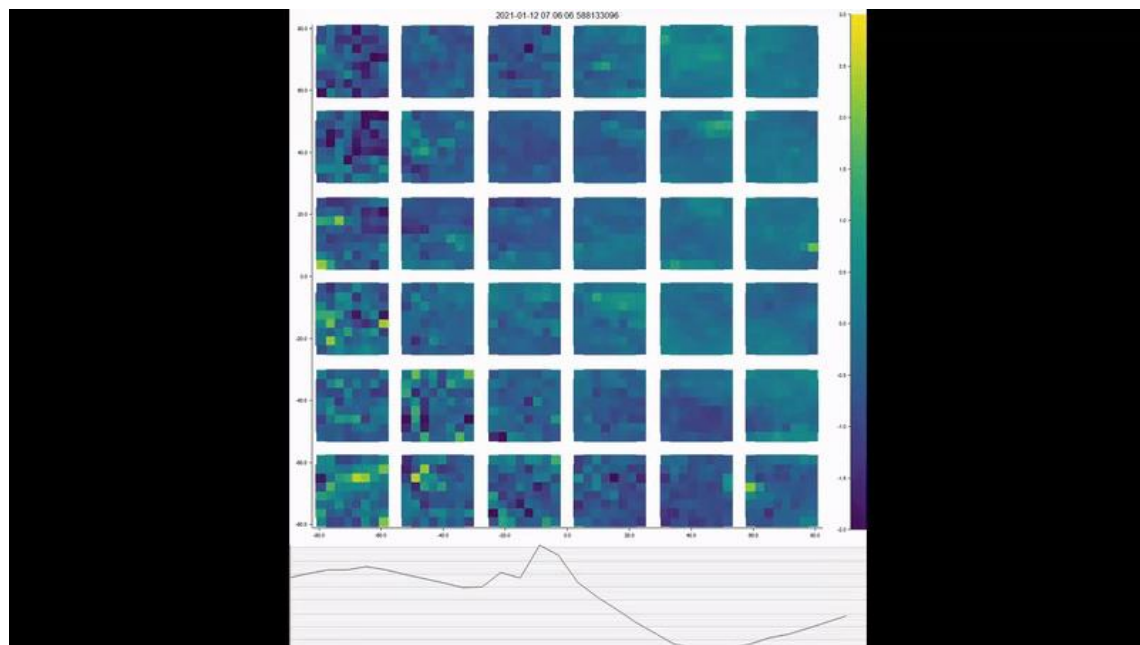
ISS Trajectory, 2021.01.12, 02:55-07:50 UT



Наблюдалось сияние длительностью ~3 минуты при пролёте 3

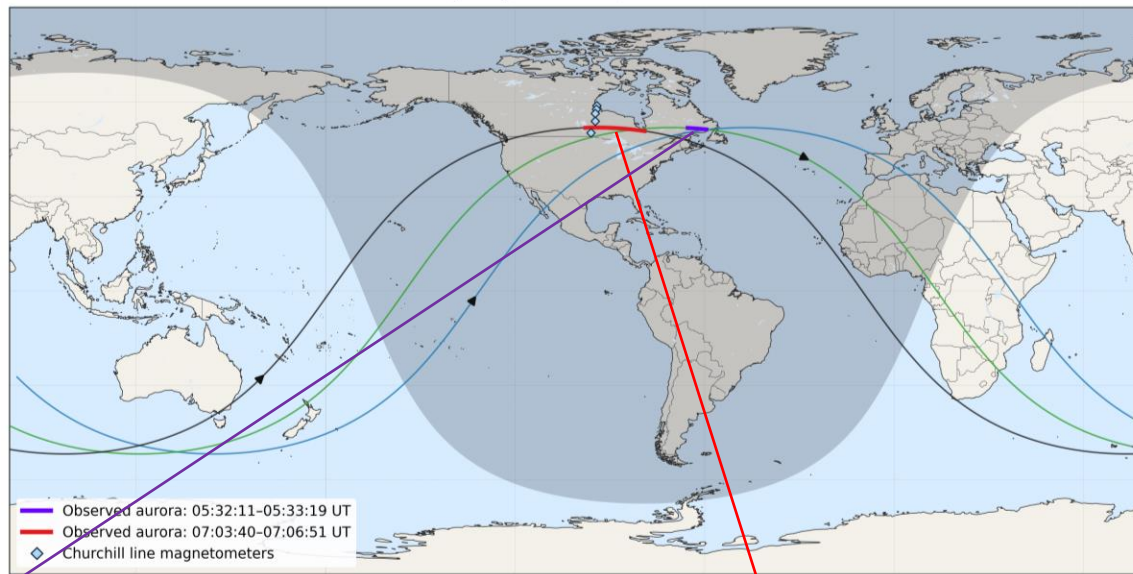


В ходе сияния наблюдалась вспышка, требующая дальнейшего анализа.

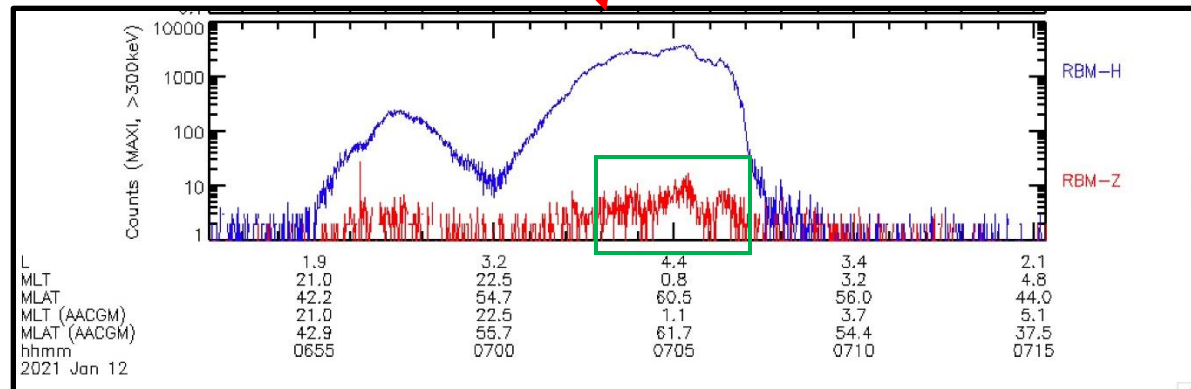
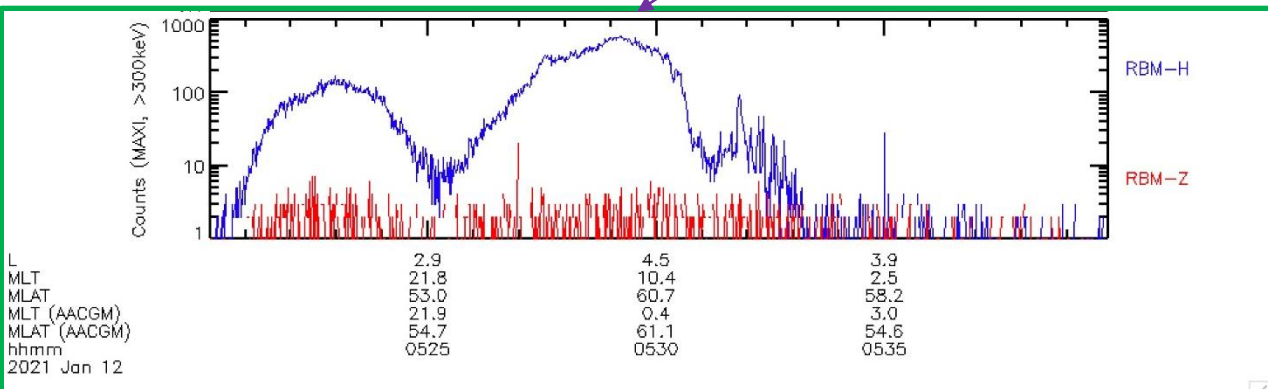


Одновременно с полярными сияниями во время пролета №3 наблюдаются высыпающиеся энергичные электроны ($E > 300$ кэВ) по данным прибора MAXI (красная кривая на нижних рисунках – данные RBM-Z).

В данных CALET ($E > 1.6$ МэВ) вариации не видны.



Precipitation (weak) by whistlers



Заключение:

1. Сформирована база данных сеансов «УФ атмосфера» и геомагнитных условий во время наблюдений. База данных размещена на сайте лаборатории. Отобраны сеансы с наилучшими условиями для регистрации полярных сияний.
2. Отдельно рассмотрен сеанс 31 (11.01.2021-12.01.2021), у которого
 - a) Оптимальные орбитальные условия наблюдения УФ свечения в субавроральной зоне (полярная часть орбиты полностью на ночной стороне).
 - b) Оптимальные географические условия наблюдения: телескоп включен над канадским сектором, где МКС достигает наиболее высоких геомагнитных широт.
 - c) Оптимальные геомагнитные условия наблюдения: суббуревая активность на фоне фазы восстановления геомагнитной бури.
3. По данным сети станций CARISMA показано, что экваториальная кромка аврорального овала находится на широтах, доступных для наблюдения телескопом «УФ атмосфера» с борта МКС.
4. Идентифицированы паттерны сигнала, соответствующие полярным сияниям. Наблюдается интересная динамика и тонкая пространственно-временная структура свечения внешней границы овала сияний (экваториальной кромка) и экспансия сияний в сторону экватора.
5. Одновременно с полярными сияниями наблюдаются высыпающиеся электроны ($E > 300$ кэВ) по данным прибора MAXI. В данных CALET ($E > 1.6$ МэВ) вариации не видны.

Дальнейшие планы

1. Поиск отдельных пульсирующих пятен и анализ пространственно-временной динамики свечения.
2. Поиск оптических микровсплесков
3. Сопоставление данных «УФ атмосфера», CALET и MAXI.
4. Анализ других сеансов и набор статистики. Добавить южное полушарие земного шара.

Спасибо за внимание!