

# События GLE в потоке мюонов космических лучей

*А.А. Петрухин*

**38 Всероссийская конференция по космическим лучам**

02 июля 2024 г.

# Некоторые сведения о GLE

## События

Первое GLE 28.02.1942 г.

**Всего 73 за 79 лет**

Последнее GLE 28.10.2021 г.

Все GLE связаны с солнечными вспышками, как правило, класса X, реже M

## Регистрация

В основном нейтронные мониторы.

Значительно реже в мюонных телескопах

На стационарных спутниках.

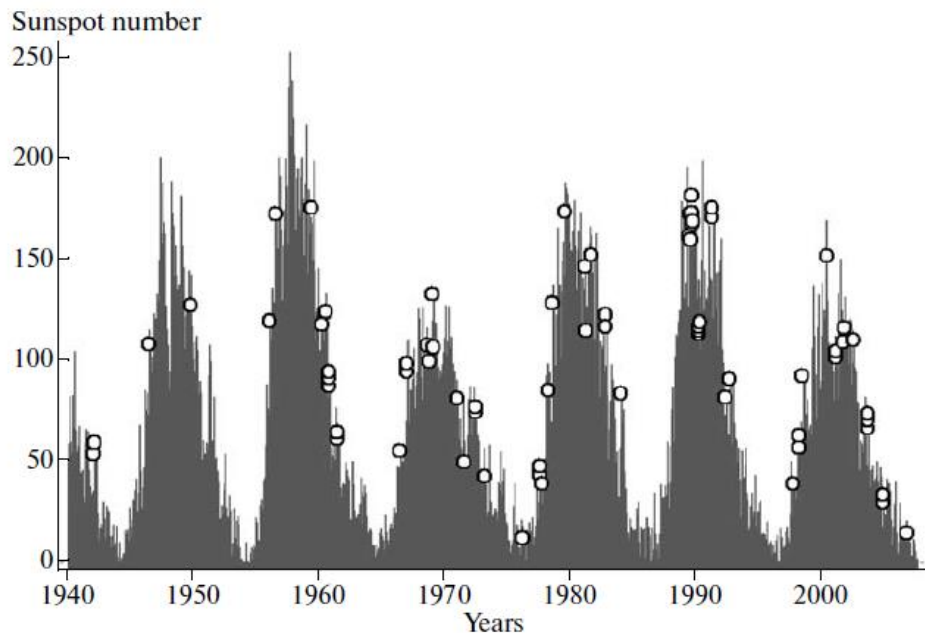
## Анализ

1. A.V. Belov et al. Geomagnetizm & Aeronomia, [2010](#), v.50, № 1, pp. 23 – 36.  
GLEs за 3 цикла (21 - 23) с № 27 (30.04.1976) до № 70 (13.12.2006)
2. R.A. Suleymanova et al. Solar Physics, [2024](#), 299:7  
Все GLEs (1942 - 2021) с №1(28.02.1942) до № 73 (28.10.2021)

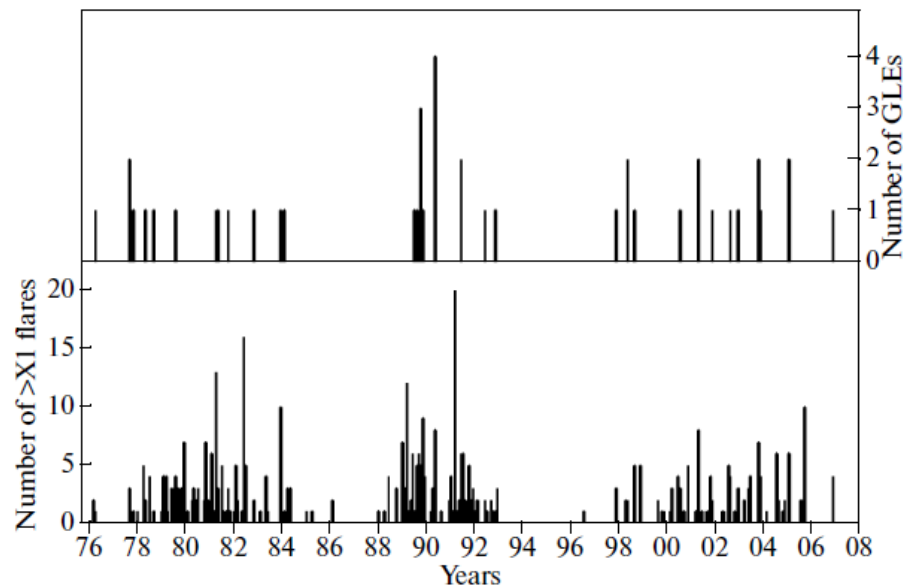
# Связь GLE с солнечной активностью

## (A.V. Belov et al., 2010)

### 1. Связь с солнечными циклами



### 2. Связь с солнечными вспышками



# GLE в мюонах

Нейтроны: Ядро Pb – энергия связи  $\sim 1,6$  ГэВ  
Ядра воздуха  $\sim 0,13$  ГэВ  $E_n$  - тепловые

Мюоны:  $E_\mu^{min} \sim 2$  ГэВ,  $E_\pi^{min} \sim 4$  ГэВ,  $E_p^{min} \sim 10$  ГэВ

Поэтому эффекты в мюонах в несколько раз меньше чем в нейтронах

## Примеры

29 сентября 1989 г.

J.L. Lovell et al. J. Geophysical Research v. 103, №A10, pp. 13733-23742

D.F. Smart and M.A. Shea 22<sup>nd</sup> ICRC, 1991, vol. 3, p.101

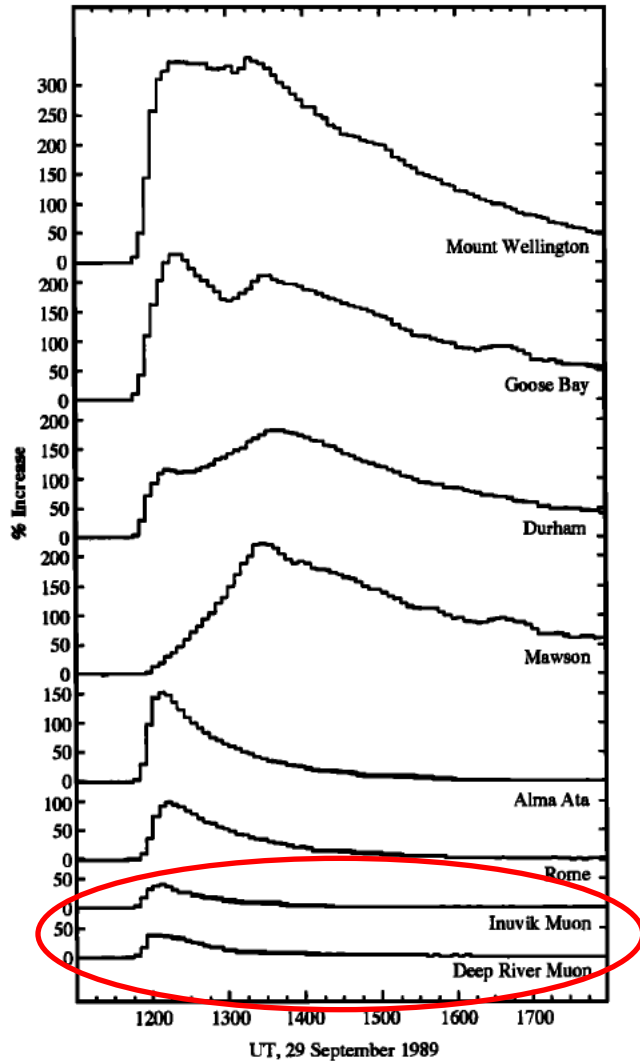
2 декабря 2003 г.

C.E. Navia et al. Astrophysical Journal 621: 1137 – 1145, 2005, March 10

13 декабря 2006 г.

D.A. Timashkov et al. Astroparticle Physics 30(2008) pp. 117-123

# GLE 29 сентября 1989 г.



Station	<u>Neutron Monitor</u>			<u>Muon Monitor</u>	
	Alt (m)	Cutoff (GV)	Pcnt. (%)	Threshold (GV)	Pcnt. (%)
Inuvik	21	0.17	377	4*	41
Goose Bay	46	0.64	252	4*	41
Deep River	145	1.14	233	4*	39
Ottawa	101	1.22	207	4*	41
Hobart	15	1.84	300	4*	28
Moscow	200	2.43	190	4*	23
Rome	60	6.32	98	6.32	9
Brisbane	~1	6.99	79	6.99	--
Tokyo	20	11.63	28	11.63	--
Nagoya	77	12.14	--	12.14	16
Darwin	~1	14.09	13	14.09	--
Embudo	n/a	4.25	--	19#	2

# GLE 02 декабря 2003 г. по данным TUPI

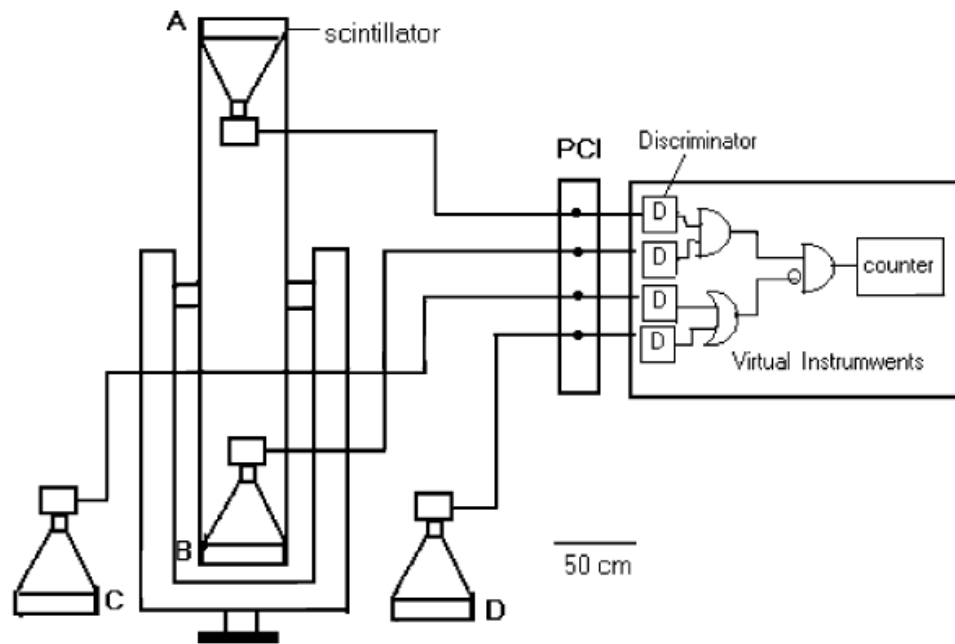
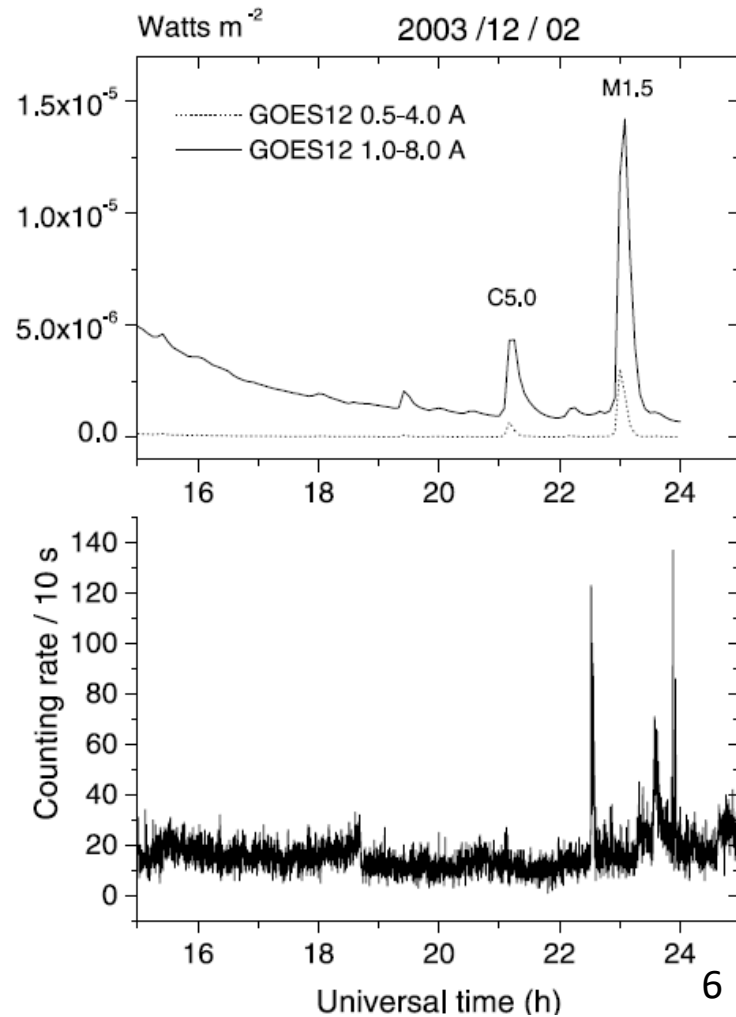
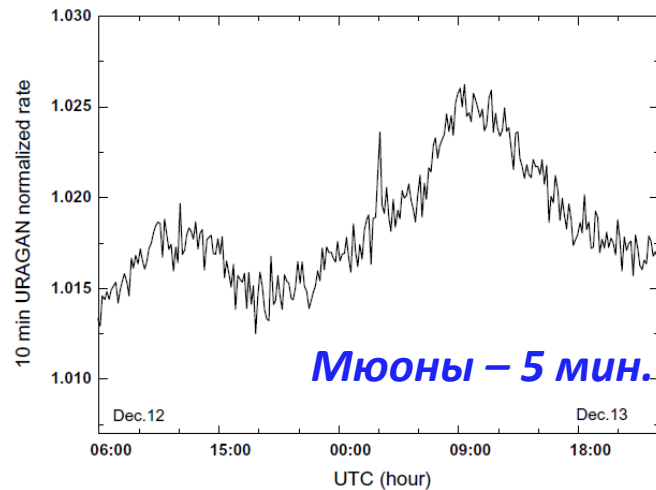
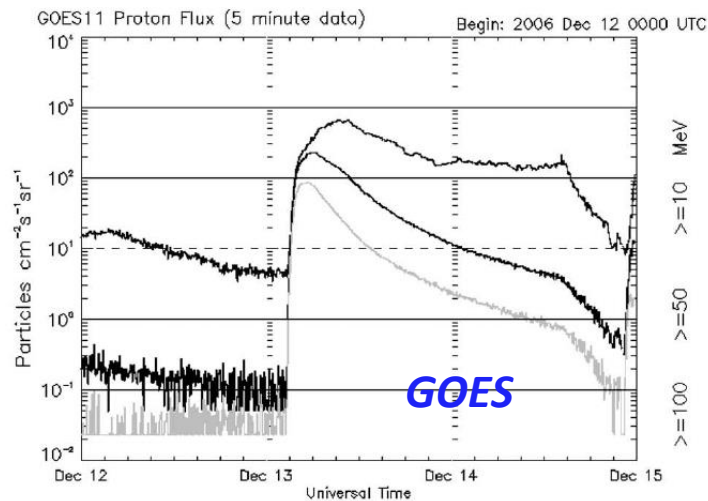
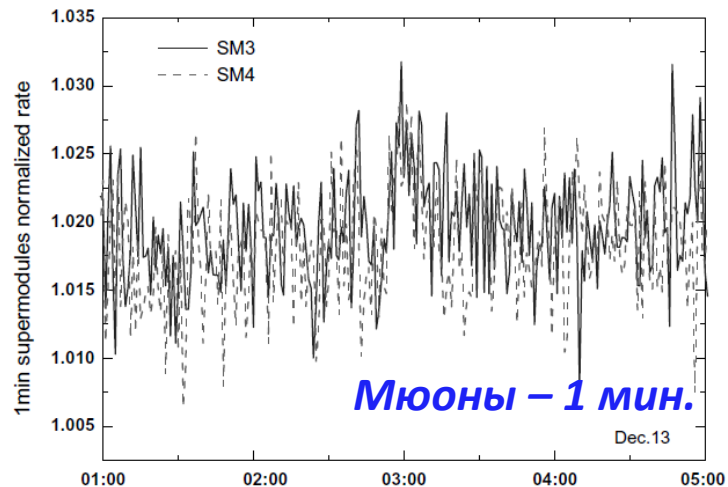
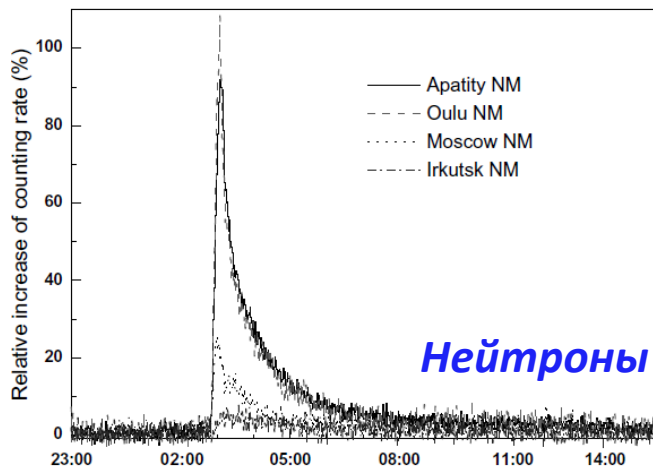


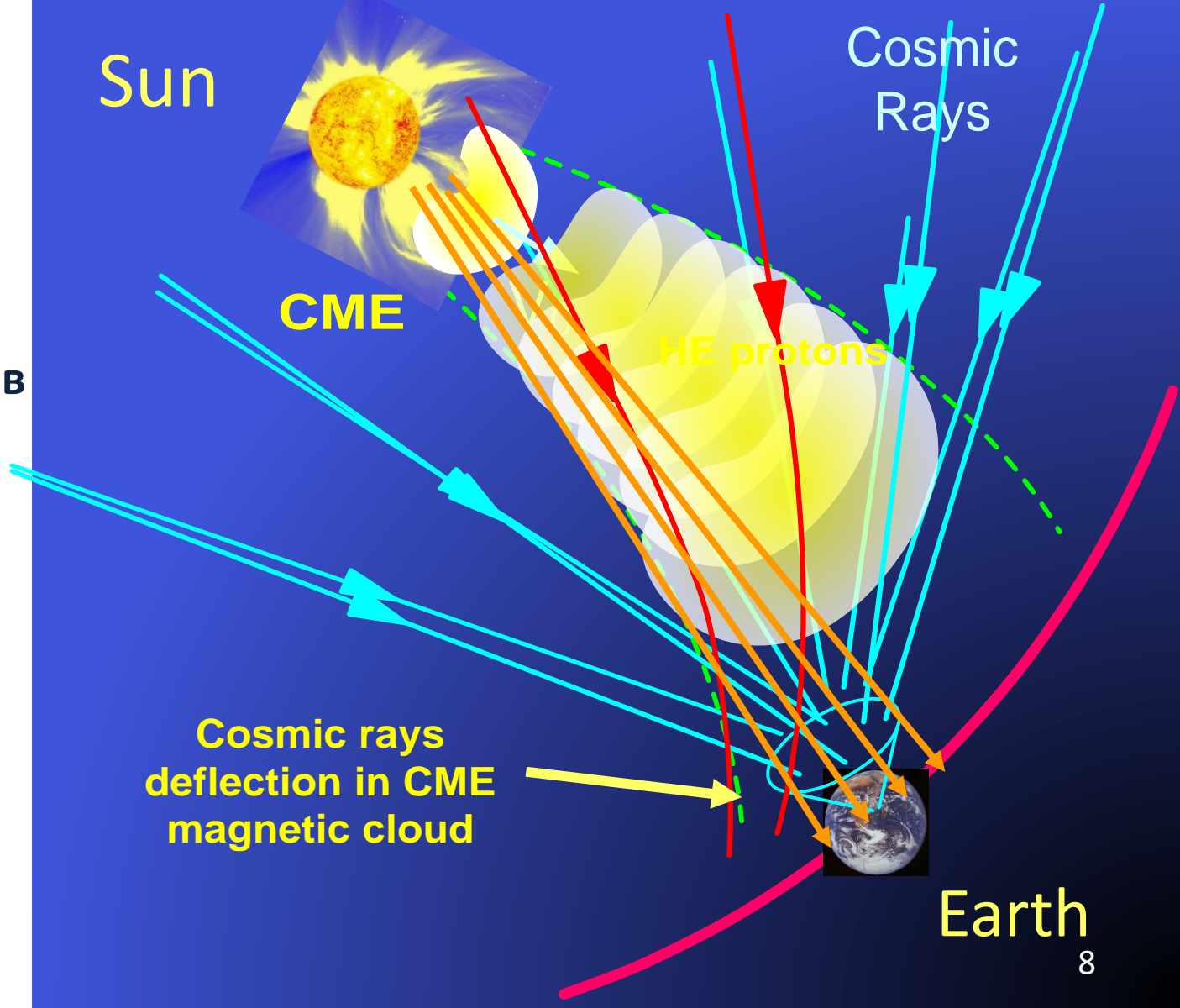
Схема телескопа



# GLE 13 декабря 2006 г.



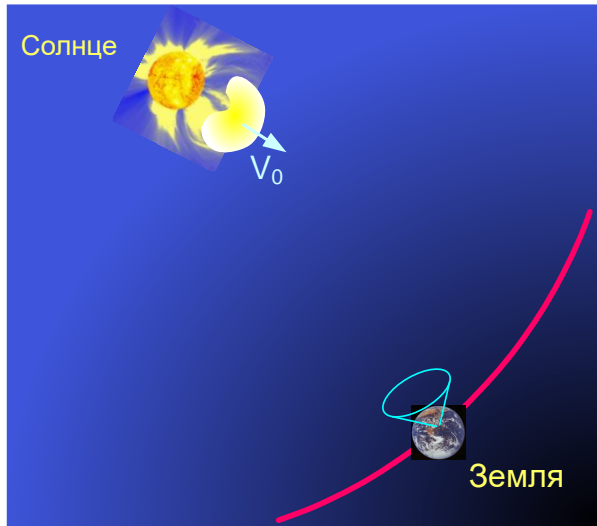
Распространение в  
гелиосфере



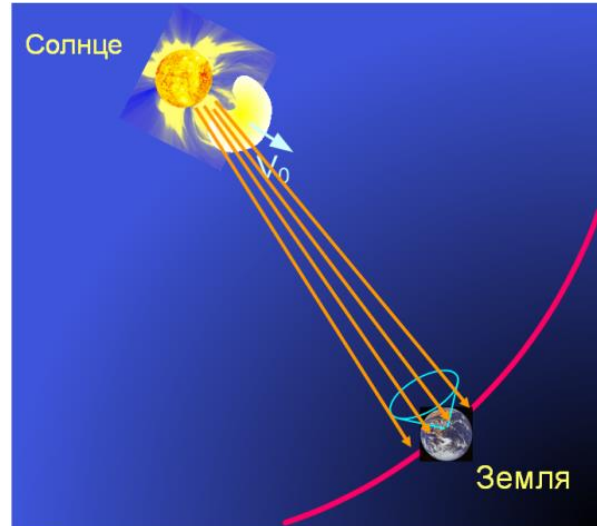


# Три стадии

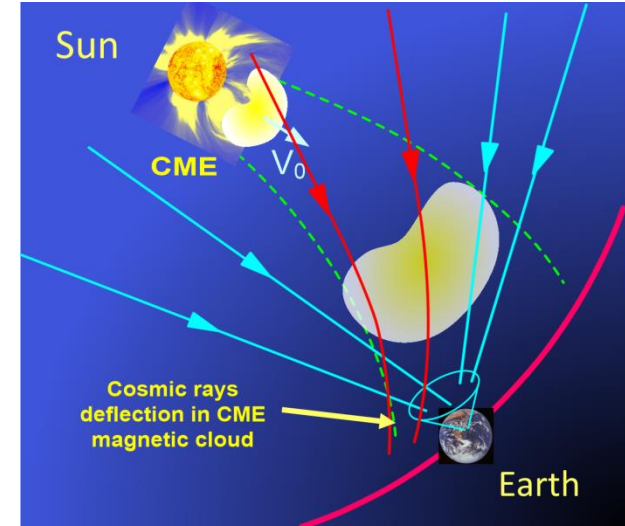
## Вспышка



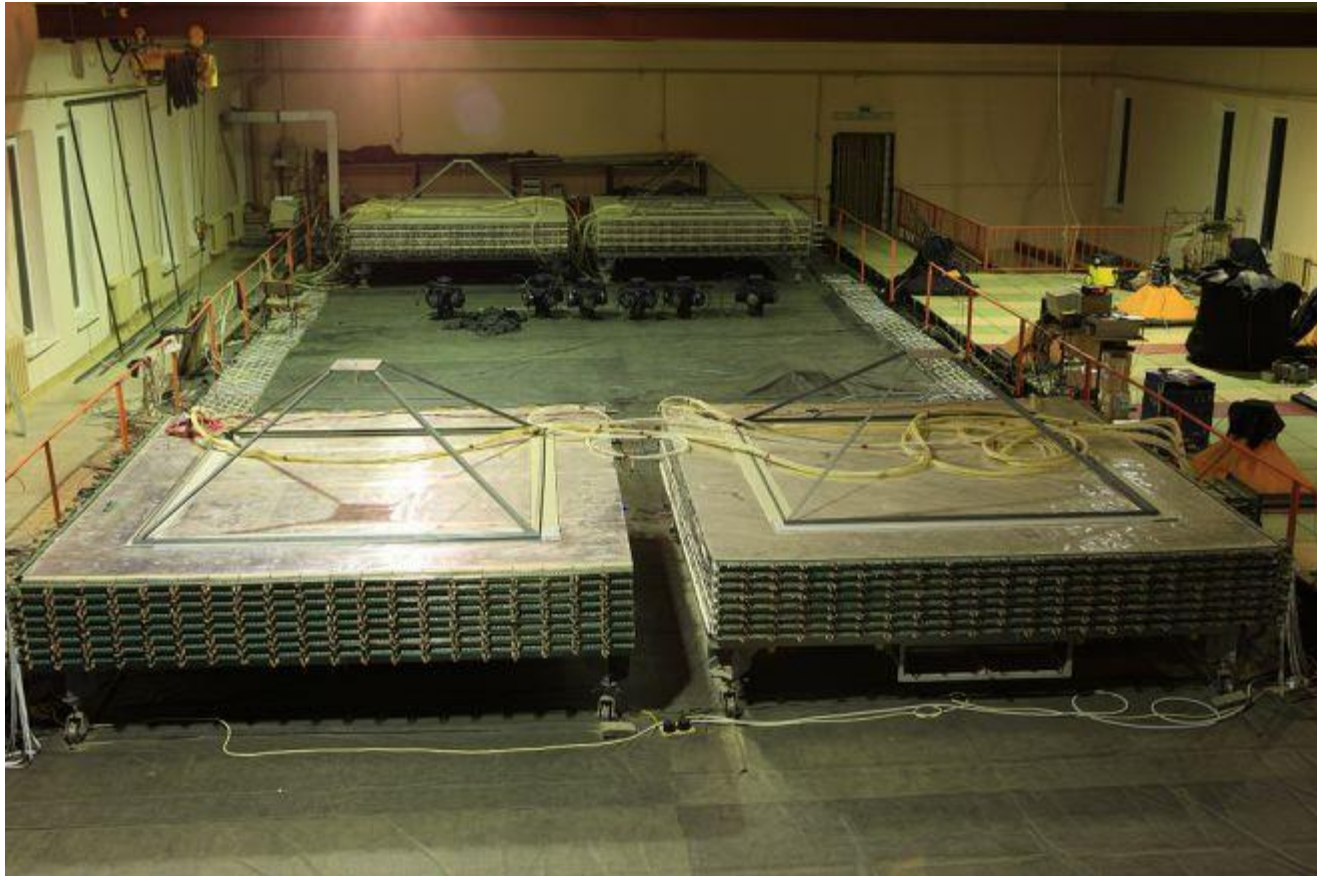
## GLE



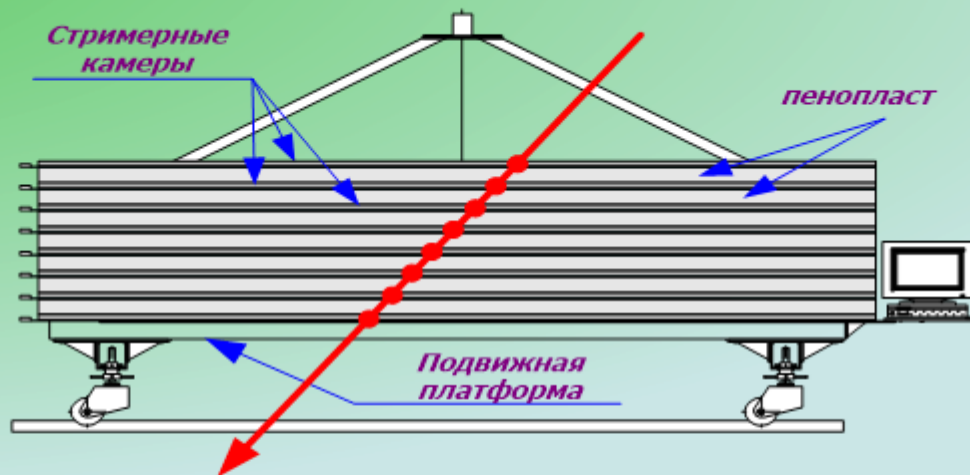
## Форбуш-эффект



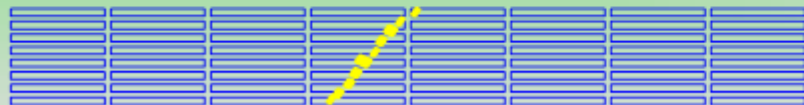
# Мюонный годоскоп УРАГАН



# Структура мюонного годоскопа



Проекция Y

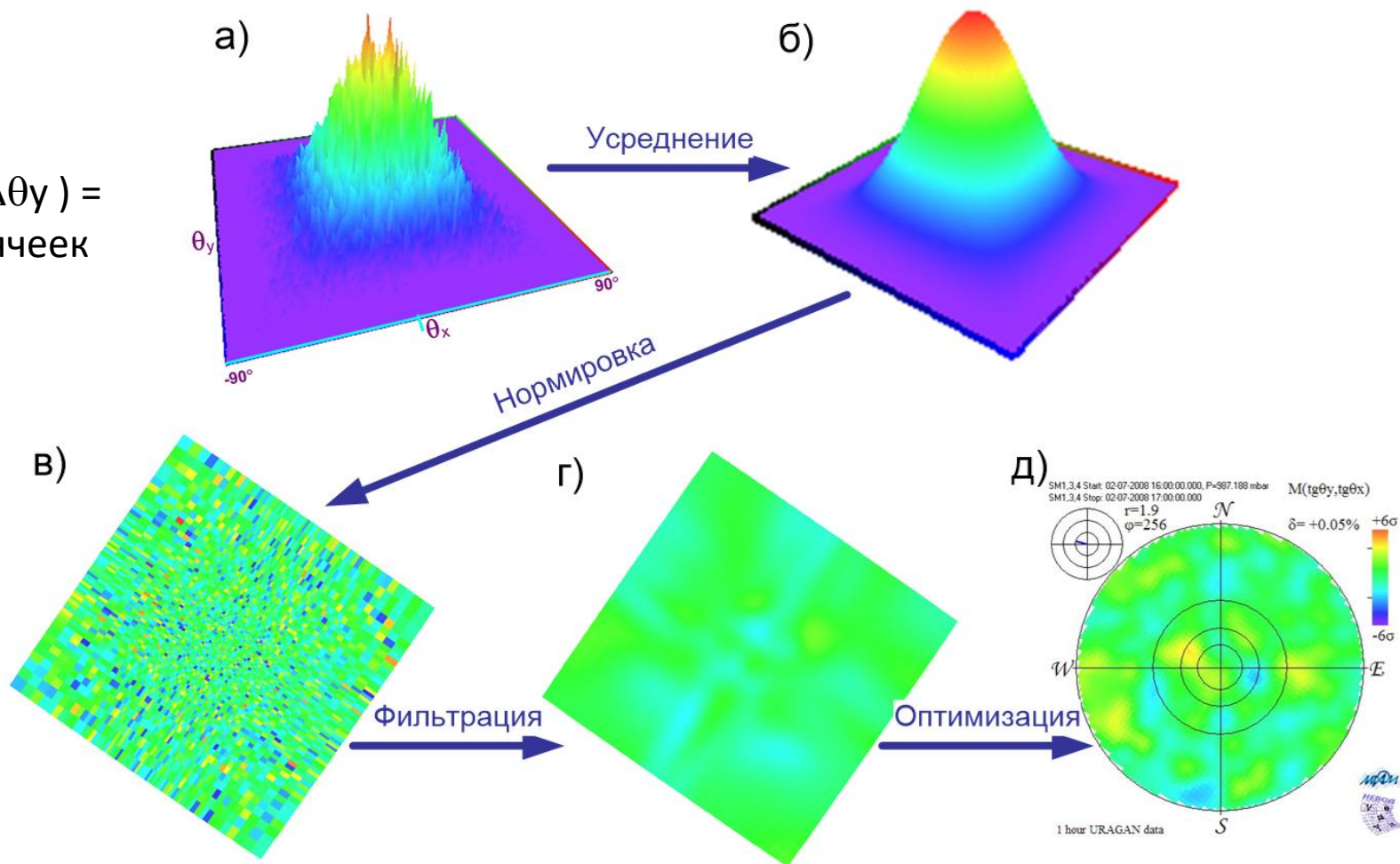


Проекция X



# Построение мюонных изображений (мюонографий)

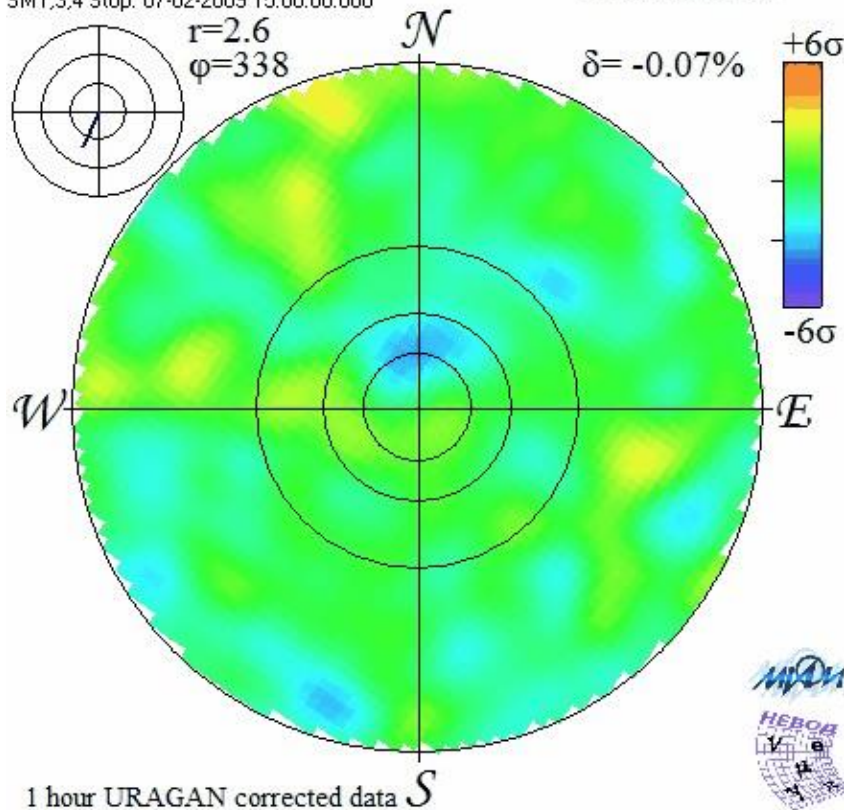
$M(\Delta\theta_x, \Delta\theta_y) =$   
 $91 \times 91$  ячеек



# 2D-динамика вариаций потока мюонов в спокойных условиях

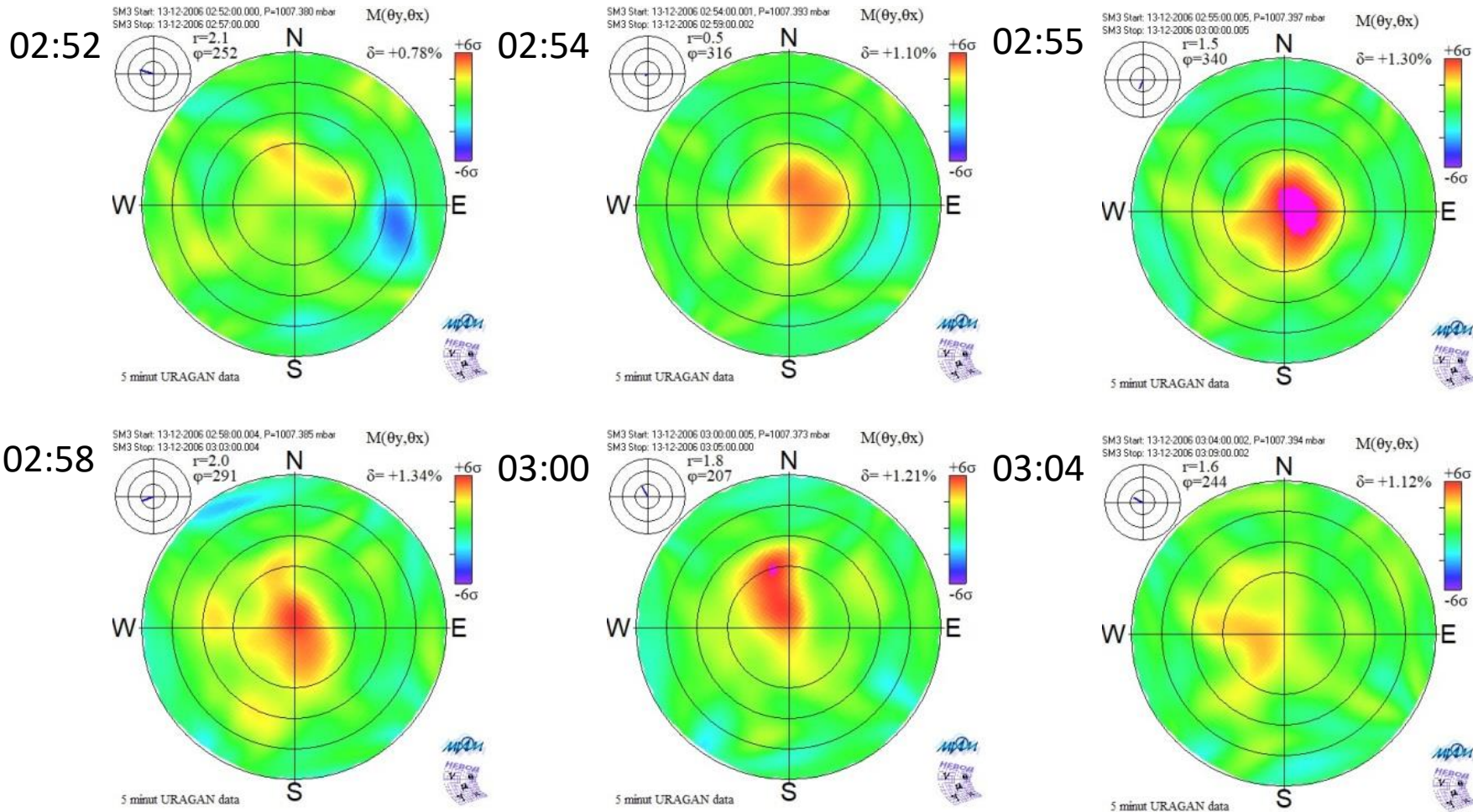
SM1,3,4 Start: 07-02-2009 14:00:00.000, P=989.053 mbar  
SM1,3,4 Stop: 07-02-2009 15:00:00.000

$M(\text{tg}\theta_y, \text{tg}\theta_x)$





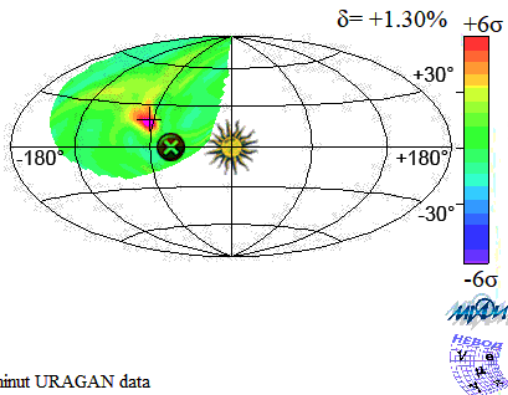
# Мюнографы GLE#70 в лабораторной системе



# Мюнографии GLE#70 в системе GSE

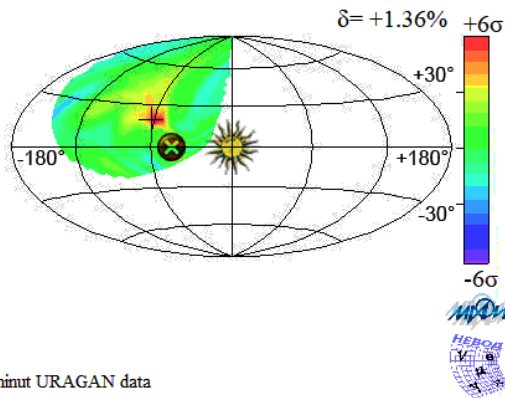
SM3 Start: 13-12-2006 02:55:00.005, P=1007.397 mbar  
SM3 Stop: 13-12-2006 03:00:00.005

$M(\theta y, \theta x)$



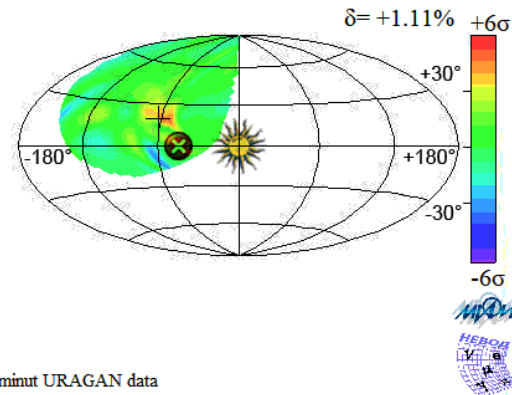
SM3 Start: 13-12-2006 02:59:00.007, P=1007.382 mbar  
SM3 Stop: 13-12-2006 03:04:00.002

$M(\theta y, \theta x)$



SM3 Start: 13-12-2006 03:01:00.003, P=1007.376 mbar  
SM3 Stop: 13-12-2006 03:05:59.098

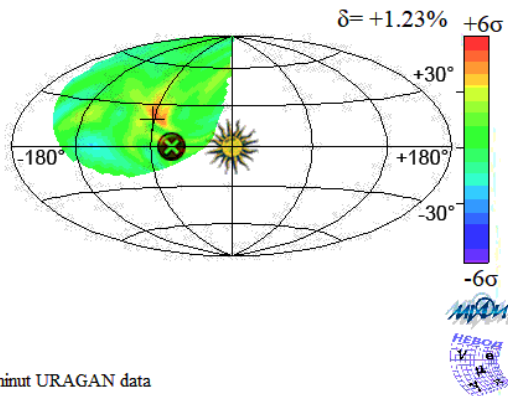
$M(\theta y, \theta x)$



5 minut URAGAN data

SM3 Start: 13-12-2006 03:03:00.004, P=1007.391 mbar  
SM3 Stop: 13-12-2006 03:08:00.004

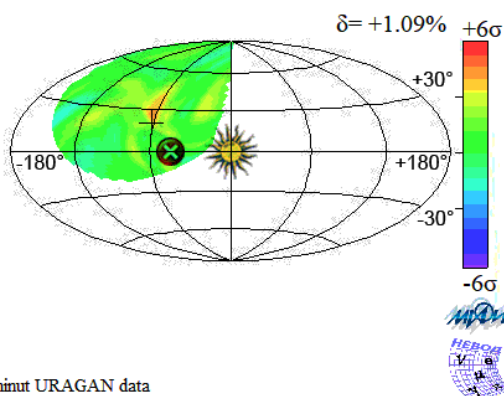
$M(\theta y, \theta x)$



5 minut URAGAN data

SM3 Start: 13-12-2006 03:05:00.000, P=1007.398 mbar  
SM3 Stop: 13-12-2006 03:10:00.000

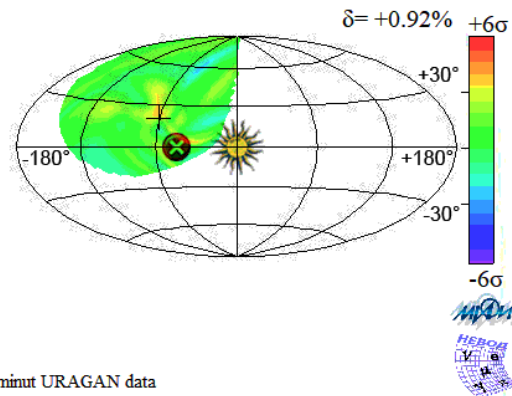
$M(\theta y, \theta x)$



5 minut URAGAN data

SM3 Start: 13-12-2006 03:09:00.002, P=1007.402 mbar  
SM3 Stop: 13-12-2006 03:14:00.003

$M(\theta y, \theta x)$

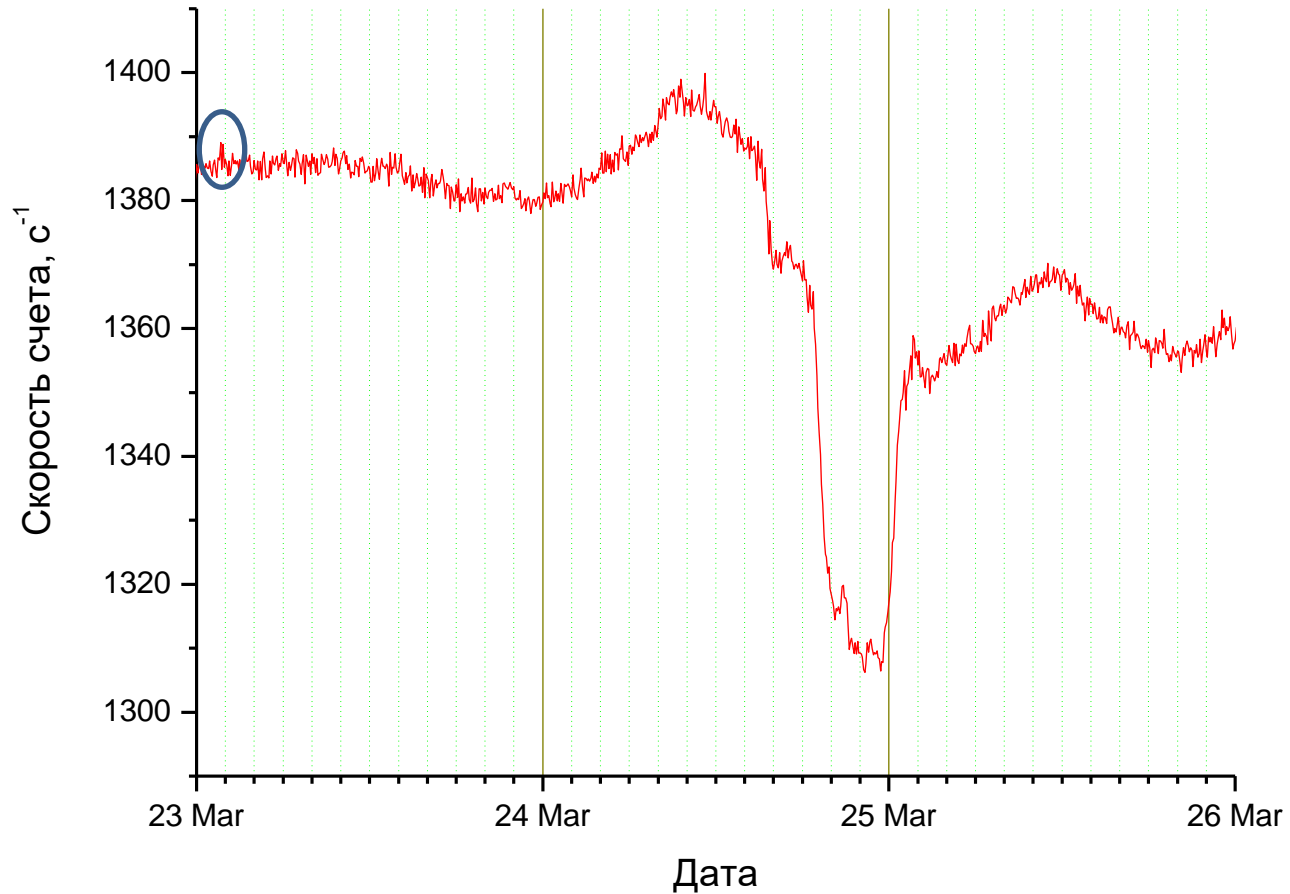


5 minut URAGAN data

5 minut URAGAN data

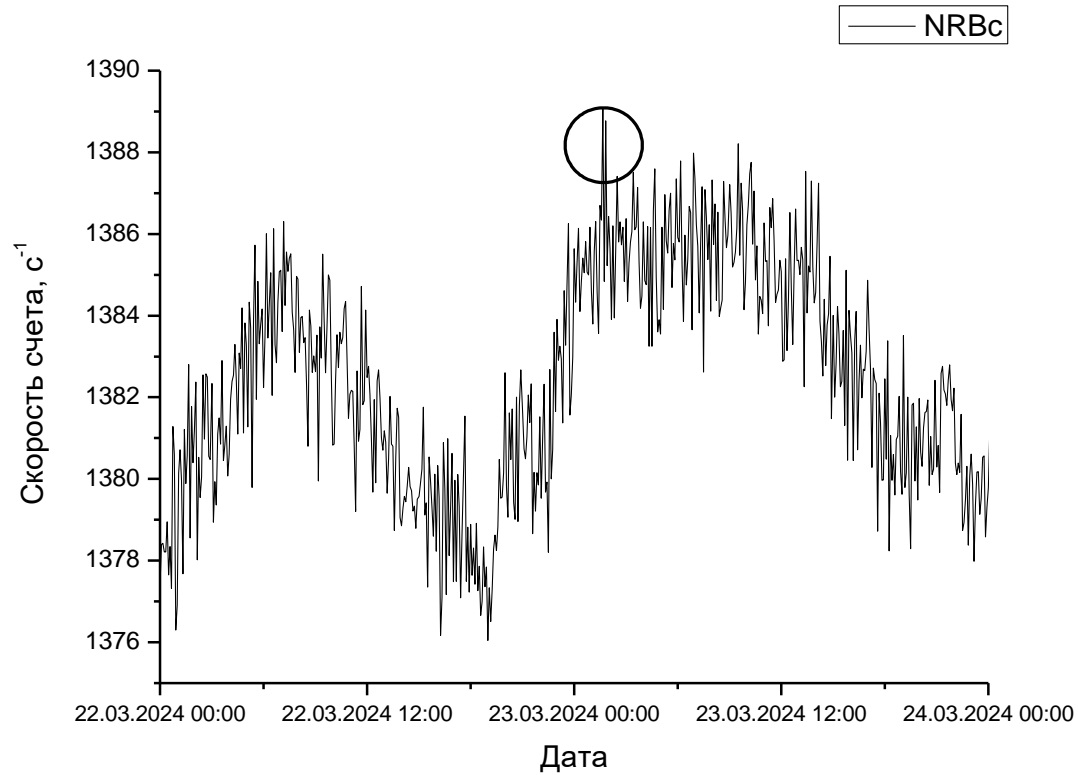
5 minut URAGAN data

# Солнечное событие 23 марта 2024 г.

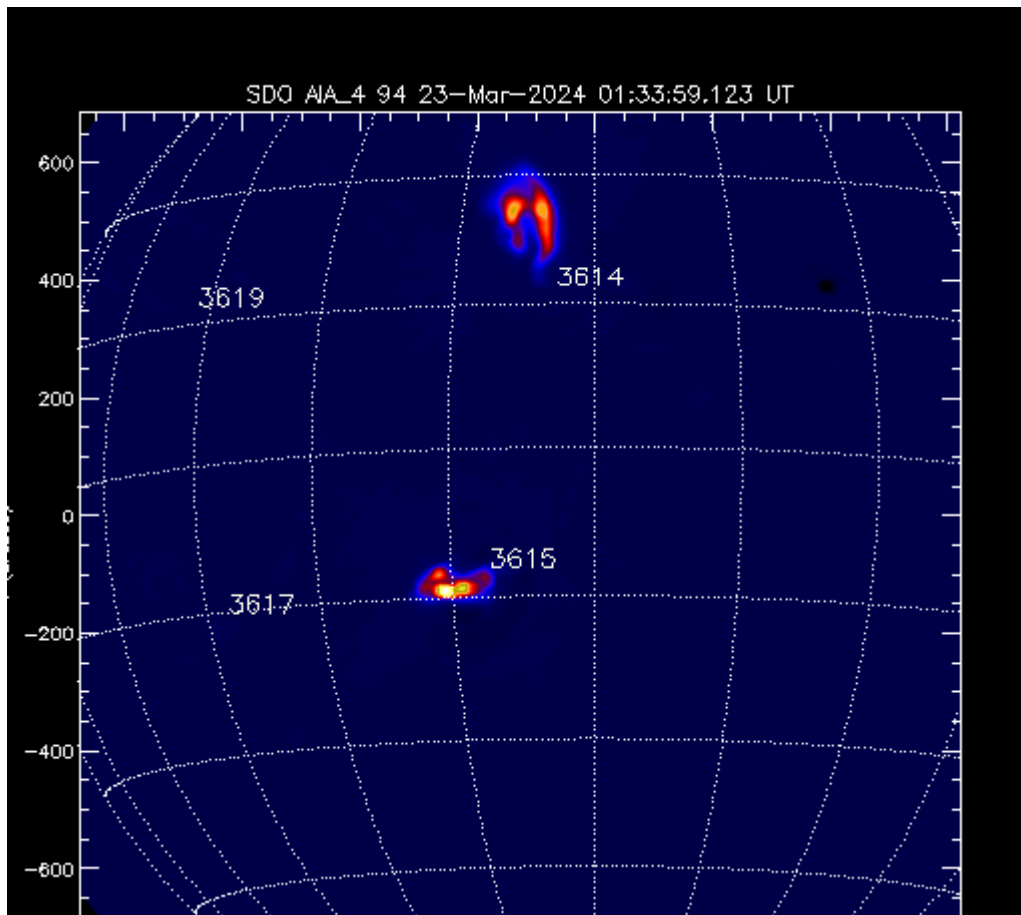




# 5-минутные данные УРАГАН



# Вспышки 3614 и 3615 на Солнце



## Вспышка X1.1

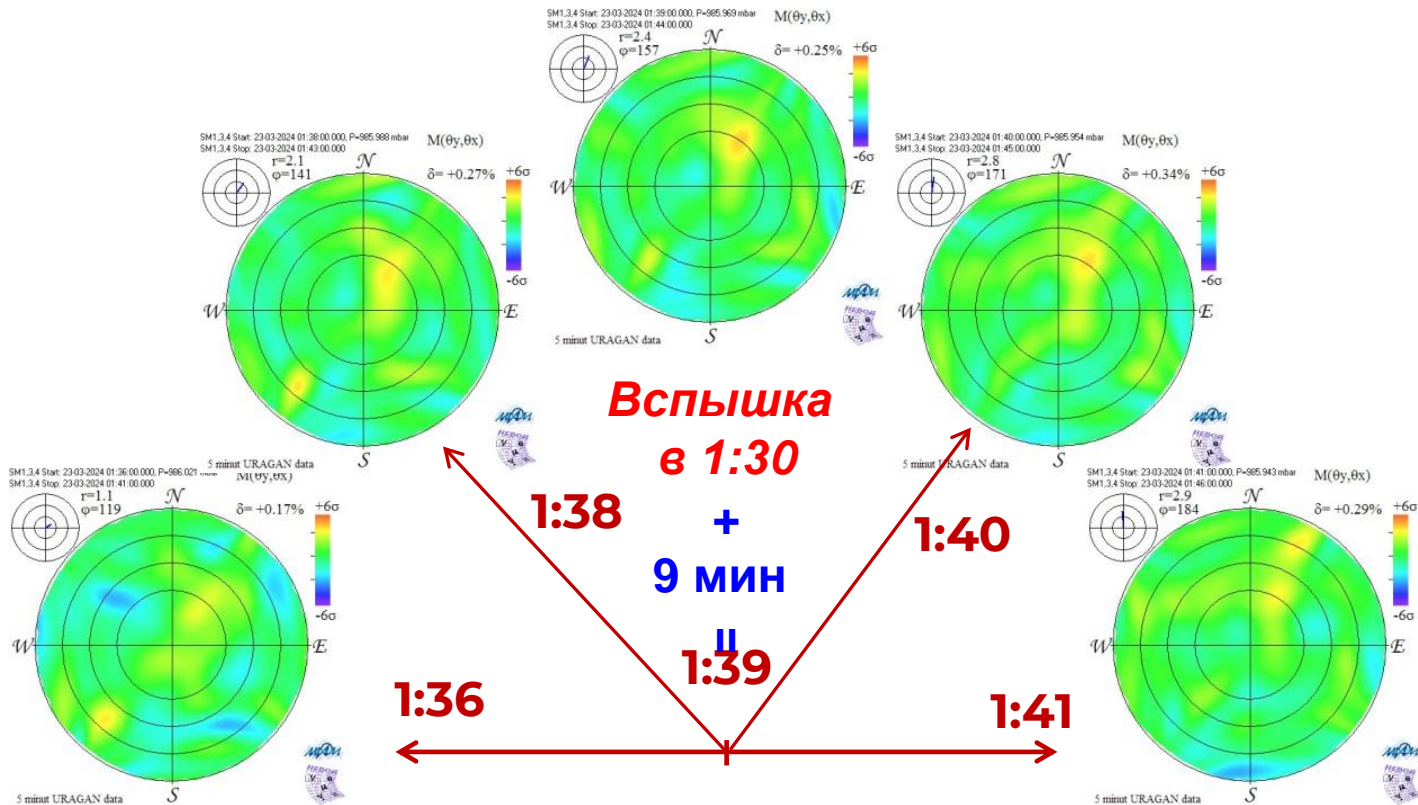
Начало – 00:58

Максимум – 01:33

Окончание – 02:21

Длительность – 01:23

# Мюнографии события 23 марта в лабораторной системе

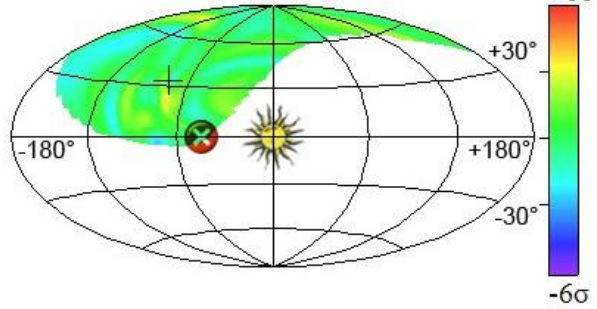


# Мюнографии в GSE системе

SM1,3,4 Start: 23-03-2024 01:39:00.000, P=985.969 mbar  
SM1,3,4 Stop: 23-03-2024 01:44:00.000

$M(\theta_y, \theta_x)$

$\delta = +0.25\%$

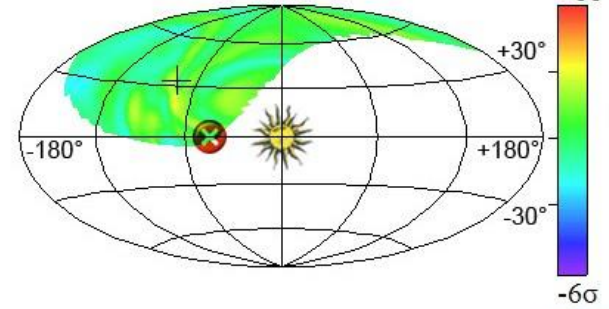


1:39

SM1,3,4 Start: 23-03-2024 01:40:00.000, P=985.954 mbar  
SM1,3,4 Stop: 23-03-2024 01:45:00.000

$M(\theta_y, \theta_x)$

$\delta = +0.34\%$



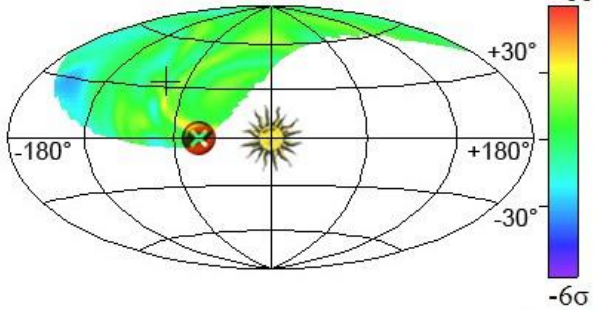
1:40

5 minut URAGAN data

SM1,3,4 Start: 23-03-2024 01:41:00.000, P=985.943 mbar  
SM1,3,4 Stop: 23-03-2024 01:46:00.000

$M(\theta_y, \theta_x)$

$\delta = +0.29\%$



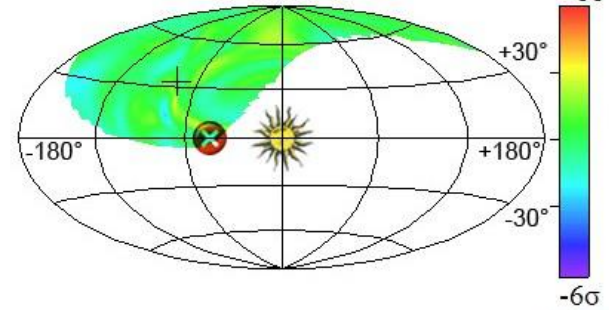
1:41

5 minut URAGAN data

SM1,3,4 Start: 23-03-2024 01:42:00.000, P=985.928 mbar  
SM1,3,4 Stop: 23-03-2024 01:47:00.000

$M(\theta_y, \theta_x)$

$\delta = +0.20\%$

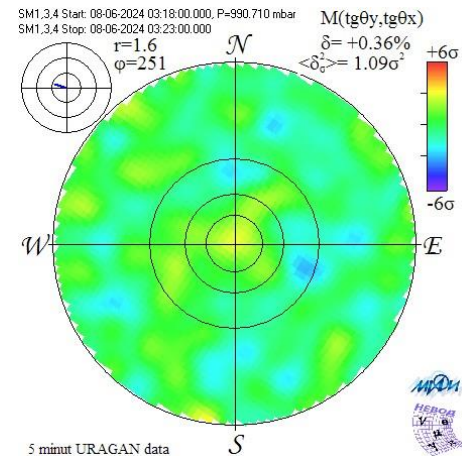
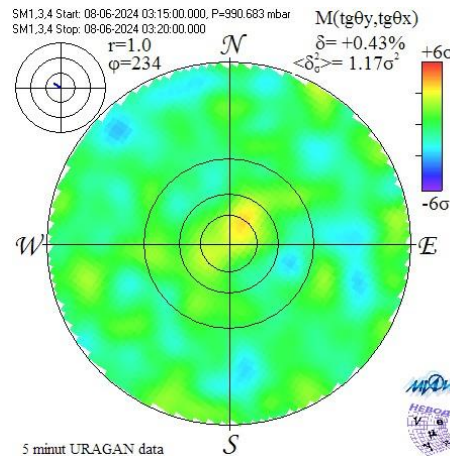
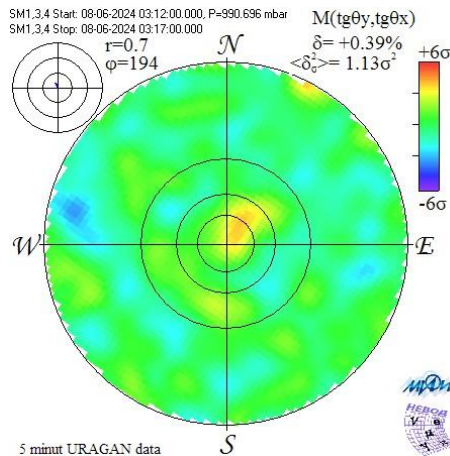
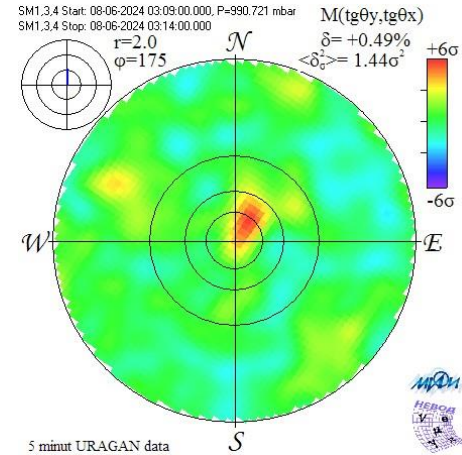
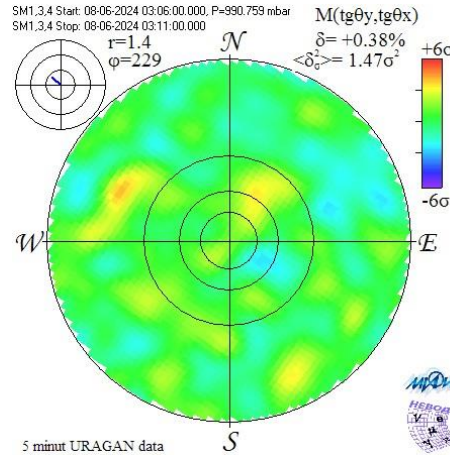
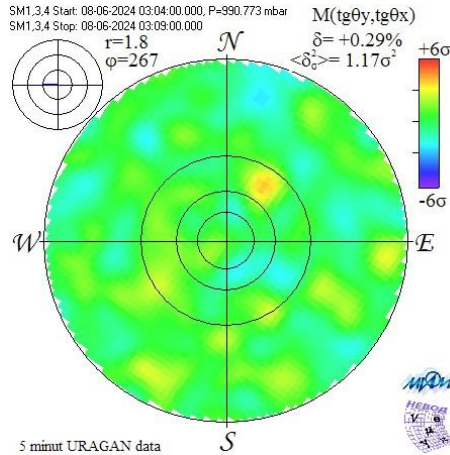


1:42

5 minut URAGAN data

5 minut URAGAN data

# Мюнографии события 8 июня в лабораторной системе

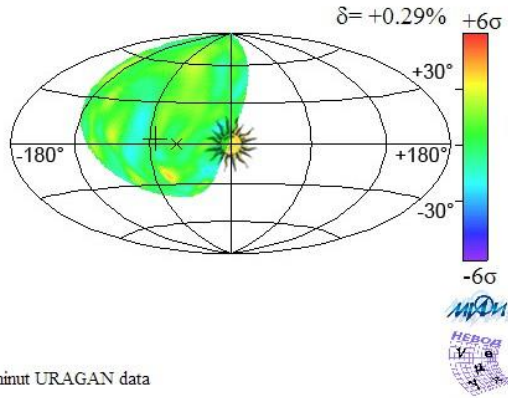




# Мюнографии 8 июня в GSE системе

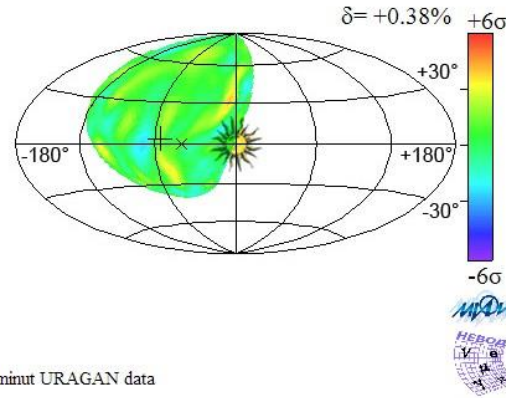
SM1,3,4 Start: 08-06-2024 03:04:00.000, P=990.773 mbar  
SM1,3,4 Stop: 08-06-2024 03:09:00.000

$M(\text{tg}\theta_y, \text{tg}\theta_x)$



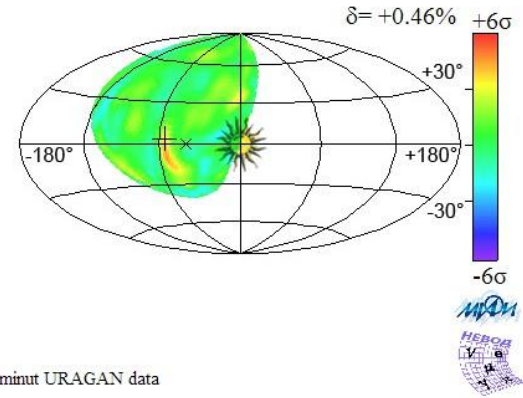
SM1,3,4 Start: 08-06-2024 03:06:00.000, P=990.759 mbar  
SM1,3,4 Stop: 08-06-2024 03:11:00.000

$M(\text{tg}\theta_y, \text{tg}\theta_x)$



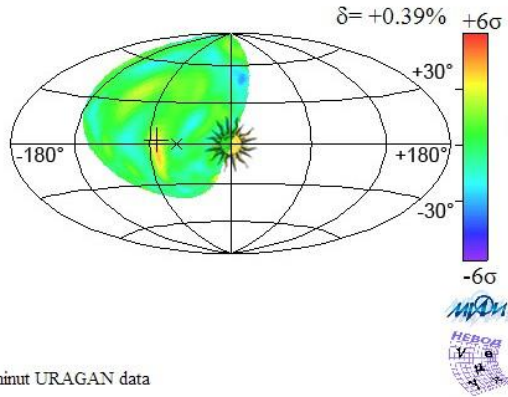
SM1,3,4 Start: 08-06-2024 03:08:00.000, P=990.734 mbar  
SM1,3,4 Stop: 08-06-2024 03:13:00.000

$M(\text{tg}\theta_y, \text{tg}\theta_x)$



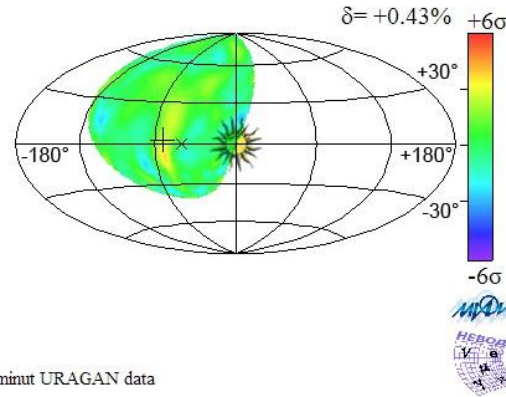
SM1,3,4 Start: 08-06-2024 03:12:00.000, P=990.696 mbar  
SM1,3,4 Stop: 08-06-2024 03:17:00.000

$M(\text{tg}\theta_y, \text{tg}\theta_x)$



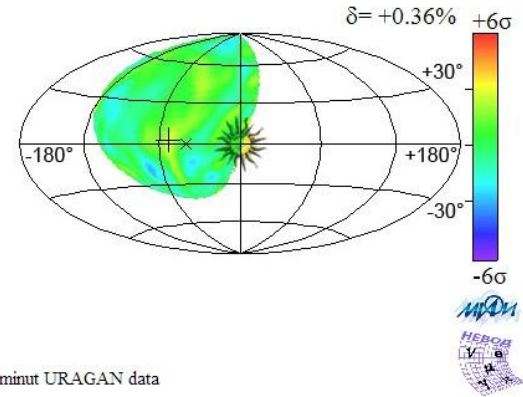
SM1,3,4 Start: 08-06-2024 03:15:00.000, P=990.683 mbar  
SM1,3,4 Stop: 08-06-2024 03:20:00.000

$M(\text{tg}\theta_y, \text{tg}\theta_x)$

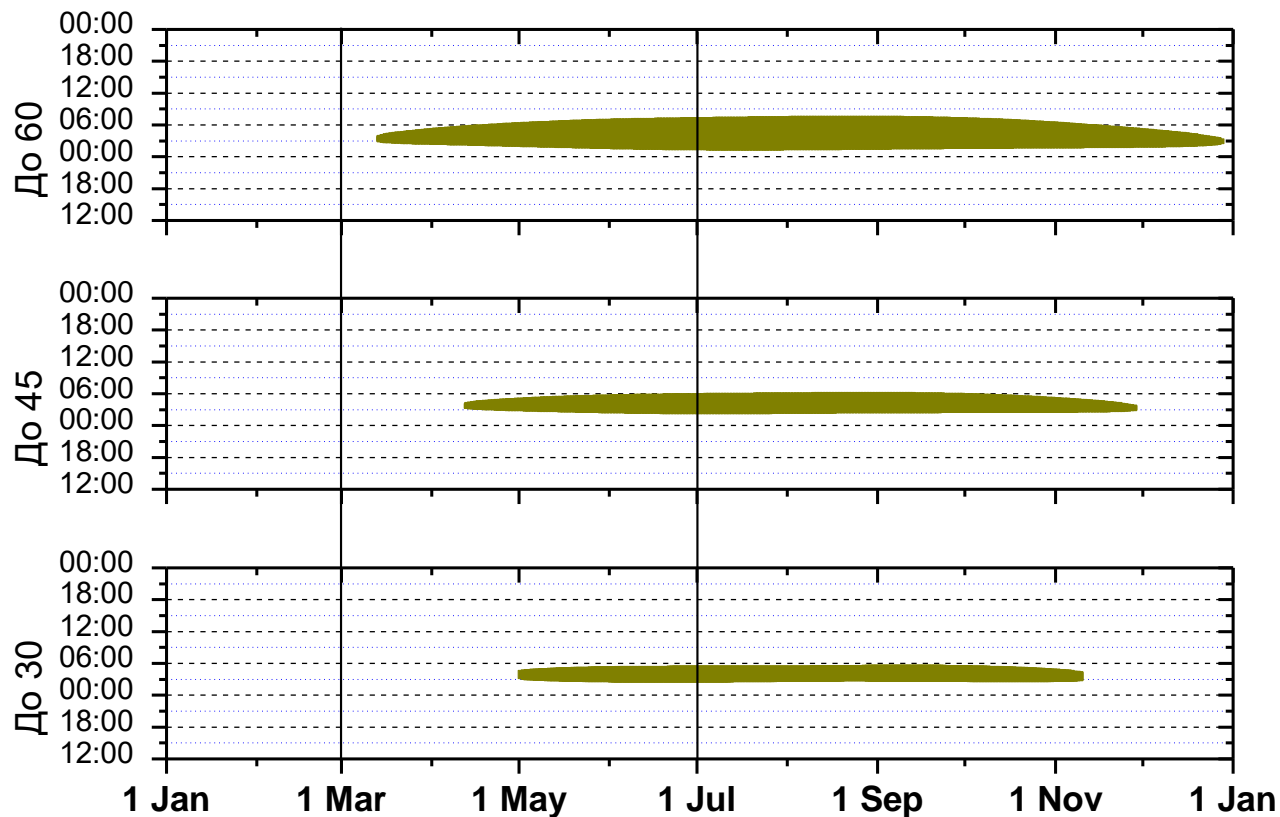


SM1,3,4 Start: 08-06-2024 03:18:00.000, P=990.710 mbar  
SM1,3,4 Stop: 08-06-2024 03:23:00.000

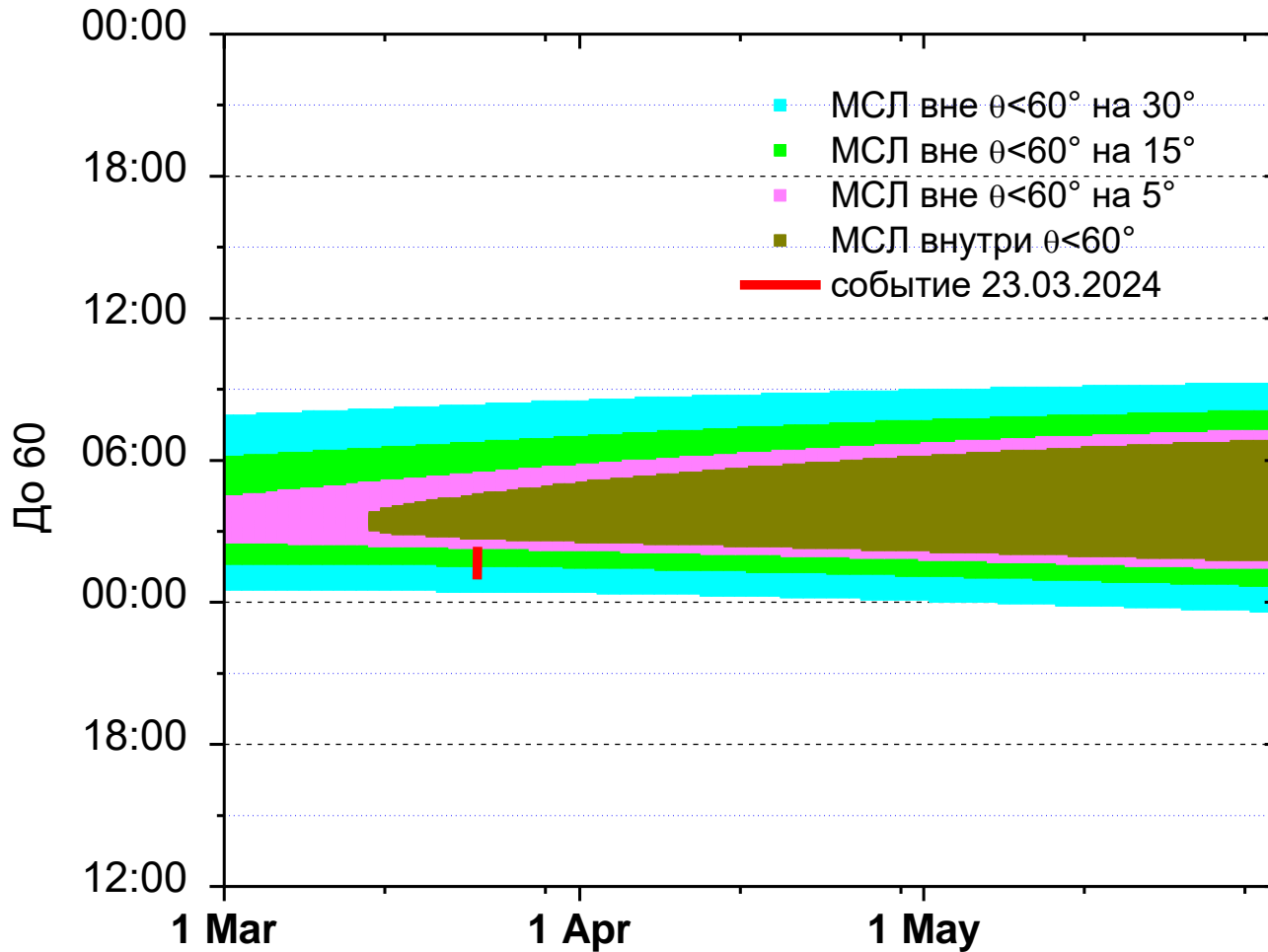
$M(\text{tg}\theta_y, \text{tg}\theta_x)$



# Время нахождения магнитных силовых линий в апертуре МГ УРАГАН при зенитных углах 30°, 45° и 60°

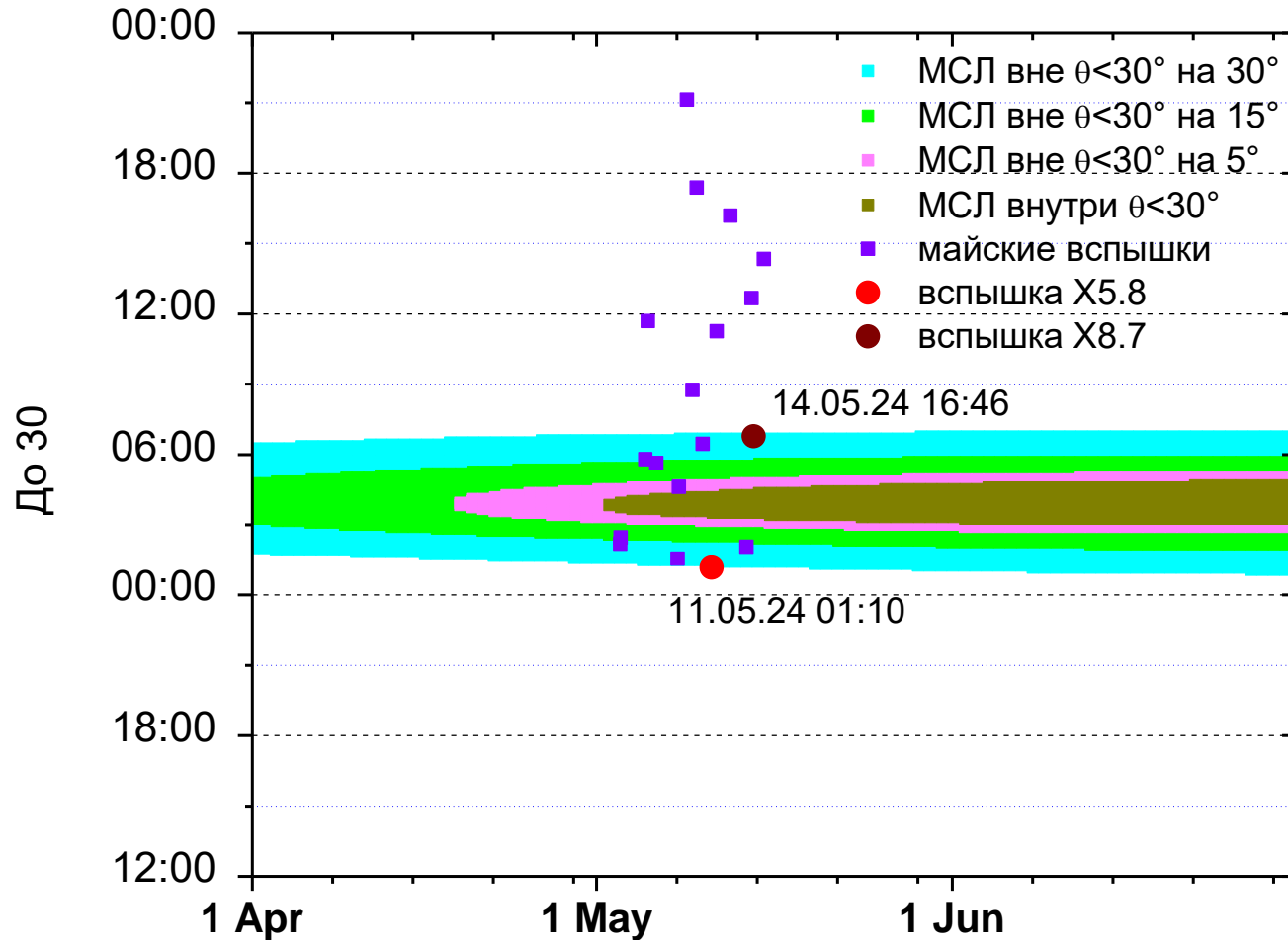


# Событие 23.03.2024 г. в МГ УРАГАН

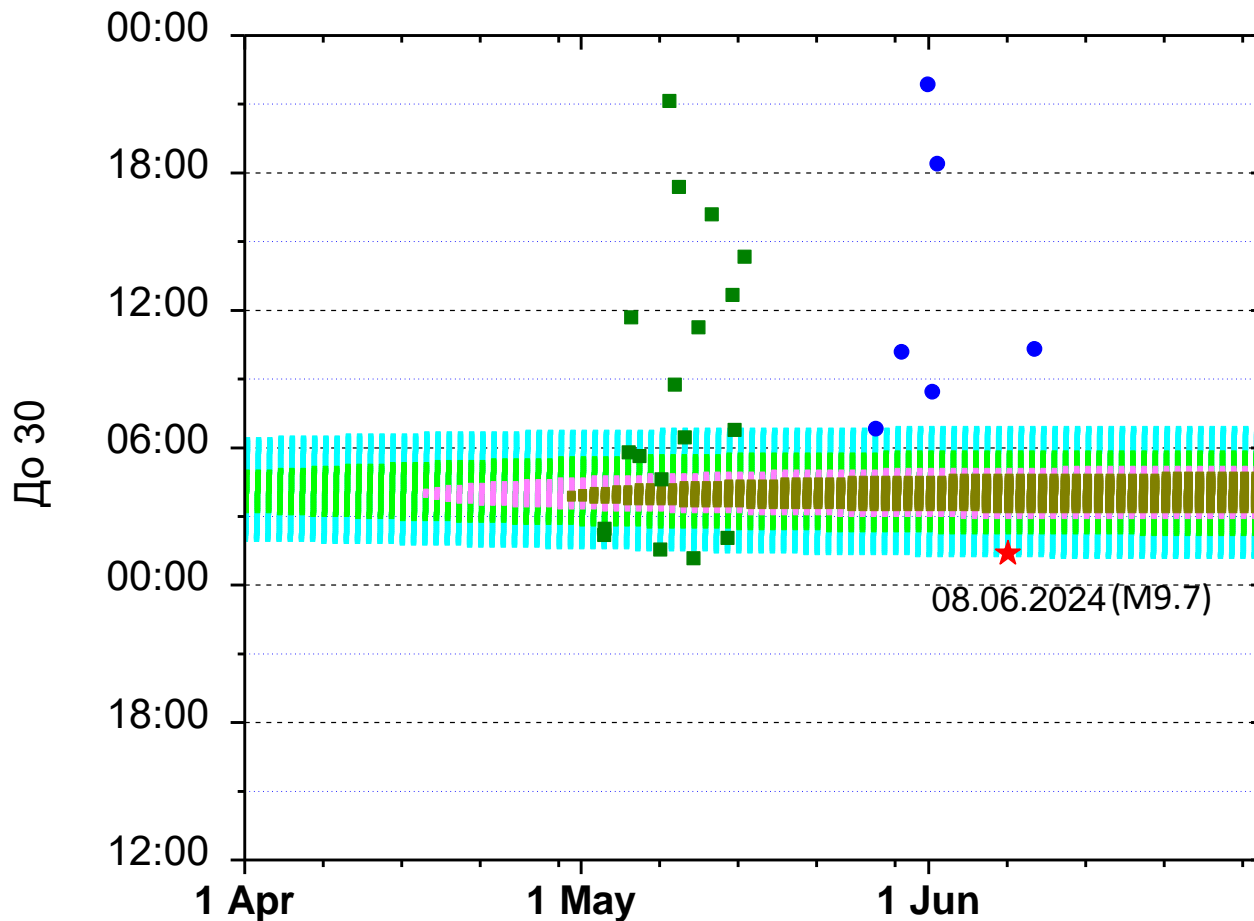




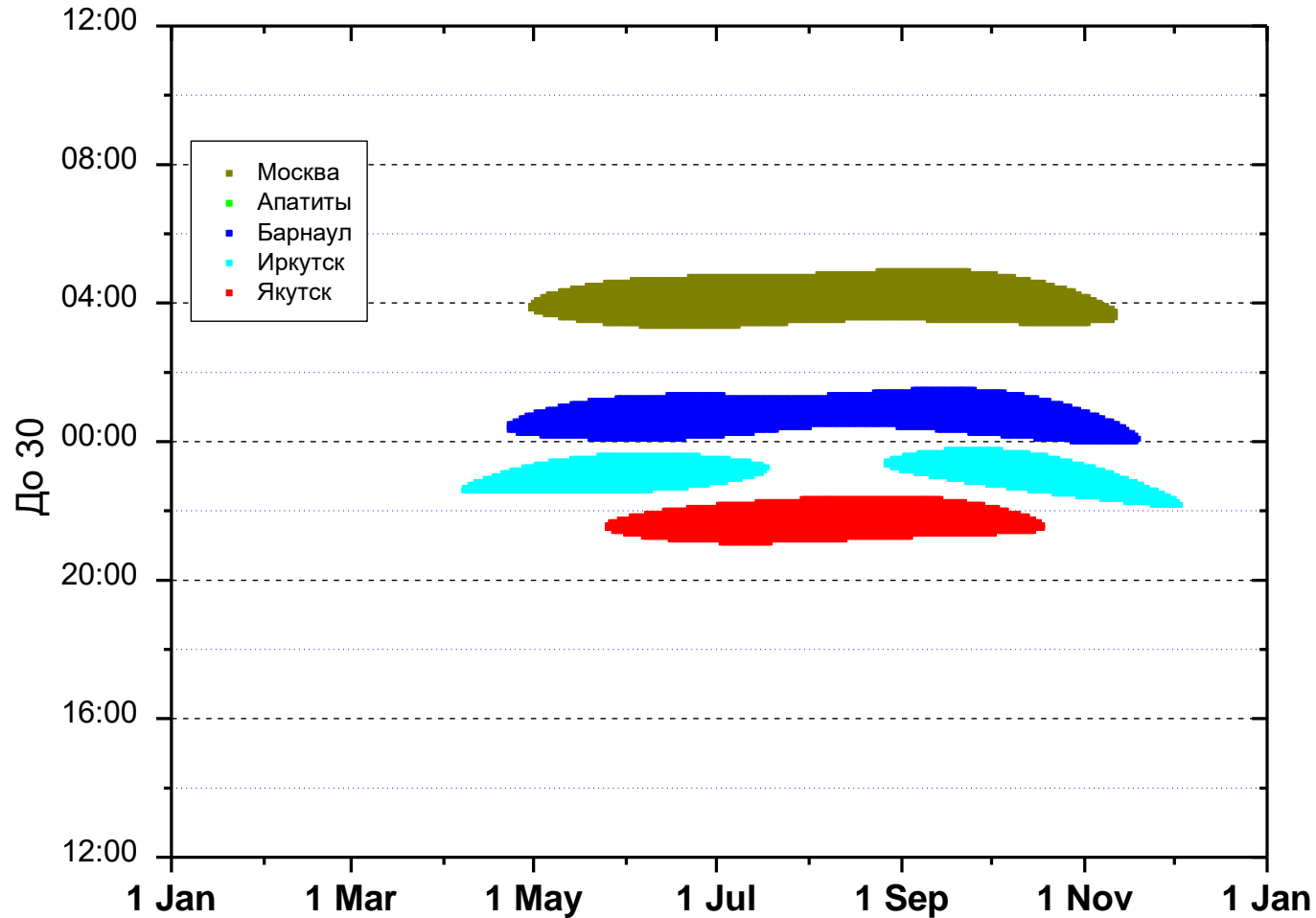
# Вспышки X класса в 1-й половине мая 2024



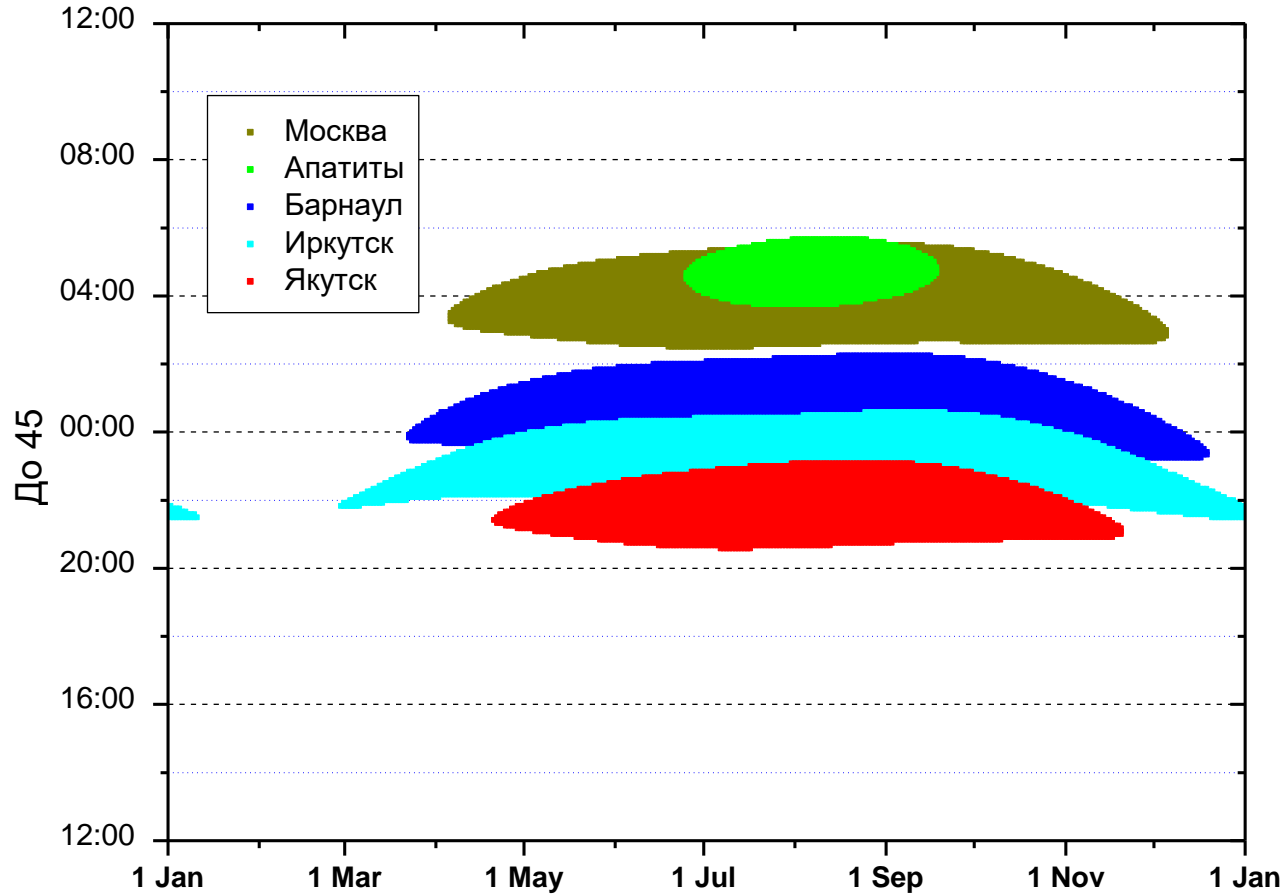
# Вспышки X класса в конце мая – начале июня 2024



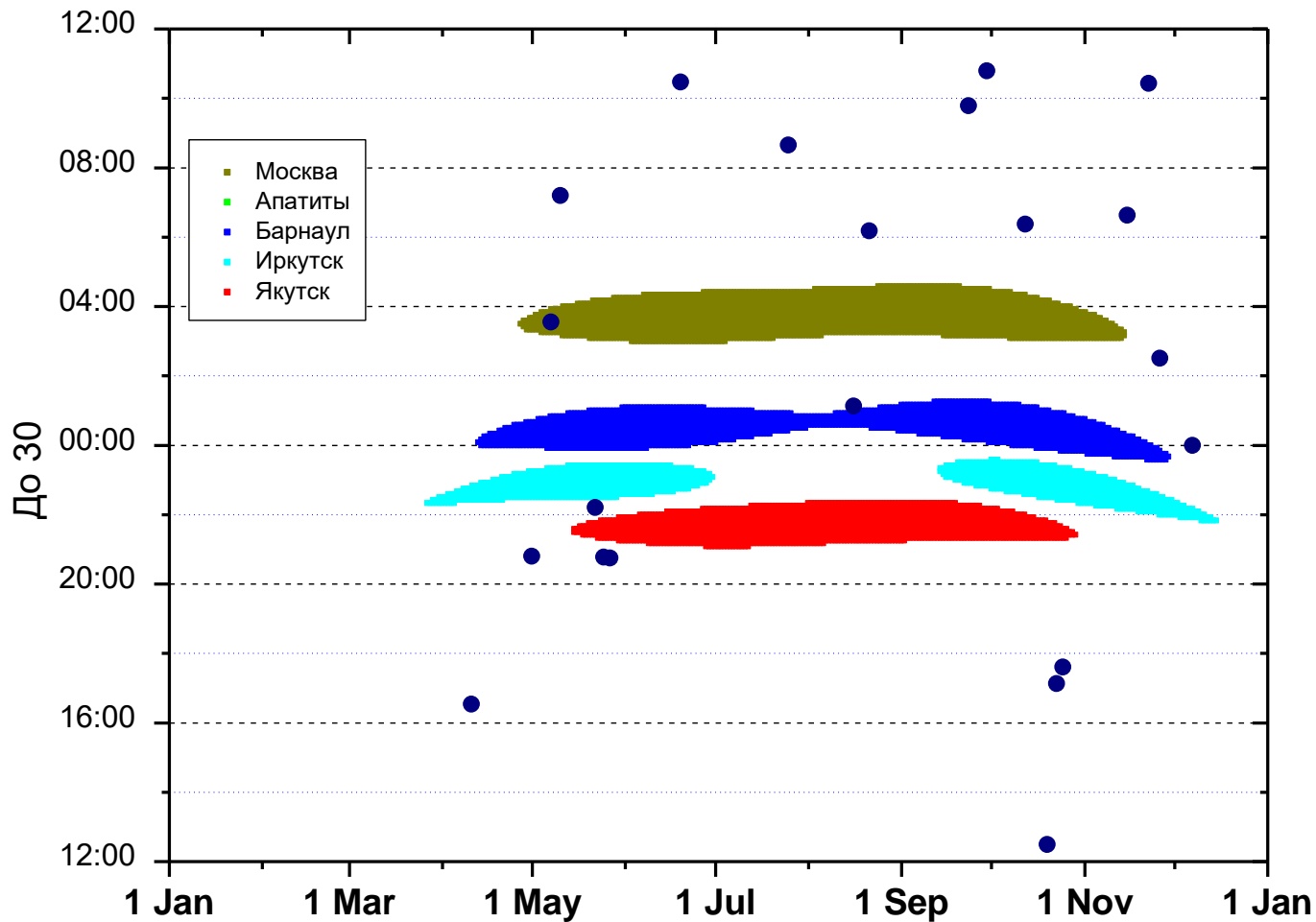
# Время нахождения магнитных силовых линий в апертуре «МГ УРАГАН» в пяти местах ( $\theta < 30^\circ$ )



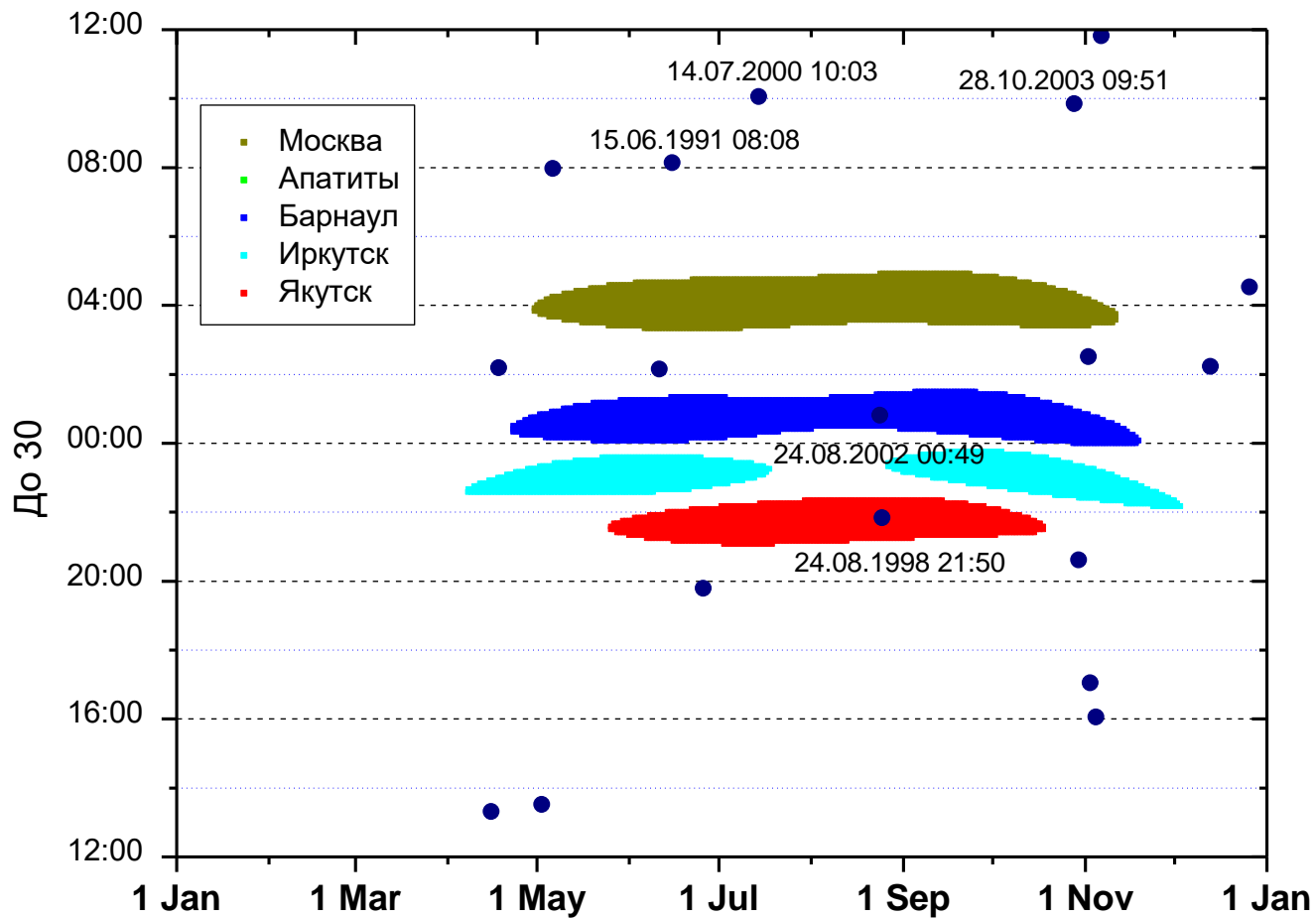
# Время нахождения магнитных силовых линий в апертуре «МГ УРАГАН» в пяти местах ( $\theta < 45^\circ$ )



# GLE №№ 27 – 50 (1976 – 1990 гг.)



# GLE №№ 51 – 70 (1991 – 2006 гг.)



# Заключение - 1

1. Если во время солнечной вспышки мы регистрируем мюоны с направления на Солнце на поверхности Земли, то это значит, что из Солнца вылетели частицы с энергией  $> 10$  ГэВ.
2. При этом возможны два варианта:
  - лишь в некоторых очень мощных вспышках генерируются частицы таких высоких энергий.
  - высокоэнергичные частицы в солнечных вспышках генерируются всегда, но мы их редко регистрируем, так как наша аппаратура в нужный момент смотрит не туда.
3. Во втором случае, возможно, потребуется пересмотр модели Солнца

# Определения GLE

1970-е годы - A GLE event is registered when there are near-time coincident and statistically significant enhancements of the count rates of at least **two differently located NMs**.

2017 год - A GLE event is registered when there are near-time coincident and statistically significant enhancements of the count rates of at least **two differently located neutron monitors** including at least **one** neutron monitor **near sea level** and a corresponding enhancement in the **proton flux** measured by a **space-borne instrument(s)**.



# Уточнение определения GLE

Необходимо добавить:

- Мог ли конкретный NM зарегистрировать короткую (несколько минут) вспышку?
- Мог ли спутник (например GOES) зарегистрировать эту короткую вспышку?

Если в определение включить длительное (несколько минут) наблюдение потока мюонов, то появятся еще два GLE.

GLE74 – 23.03.2024

GLE75 – 08.06.2024

# Заключение - 2

1. До настоящего времени анализировались зарегистрированные GLE, но не обсуждался вопрос были ли во время солнечных вспышек другие GLE, которые имеющаяся аппаратура не могла зарегистрировать.
2. Для существенного продвижения в исследованиях GLE необходимо в дополнение к сети нейтронных мониторов создать сеть мюонных годоскопов.

**Спасибо за внимание!**