

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Физический институт им. П. Н. Лебедева

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО
ДАНЫМ МОНИТОРИНГА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ НА
РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН

1.3.1 – физика космоса, астрономия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Лукманов Владислав Рамильевич

Научный руководитель: доктор физико-математических наук Чашей Игорь Владимирович

Пушинская радиоастрономическая обсерватория
Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук

Москва, 2024

Цель диссертации

Исследование глобальной структуры и крупномасштабных возмущений солнечного ветра на спаде 24-го и начале 25-го циклов солнечной активности по наблюдениям межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН с рабочей частотой 111 МГц.

Задачи диссертации

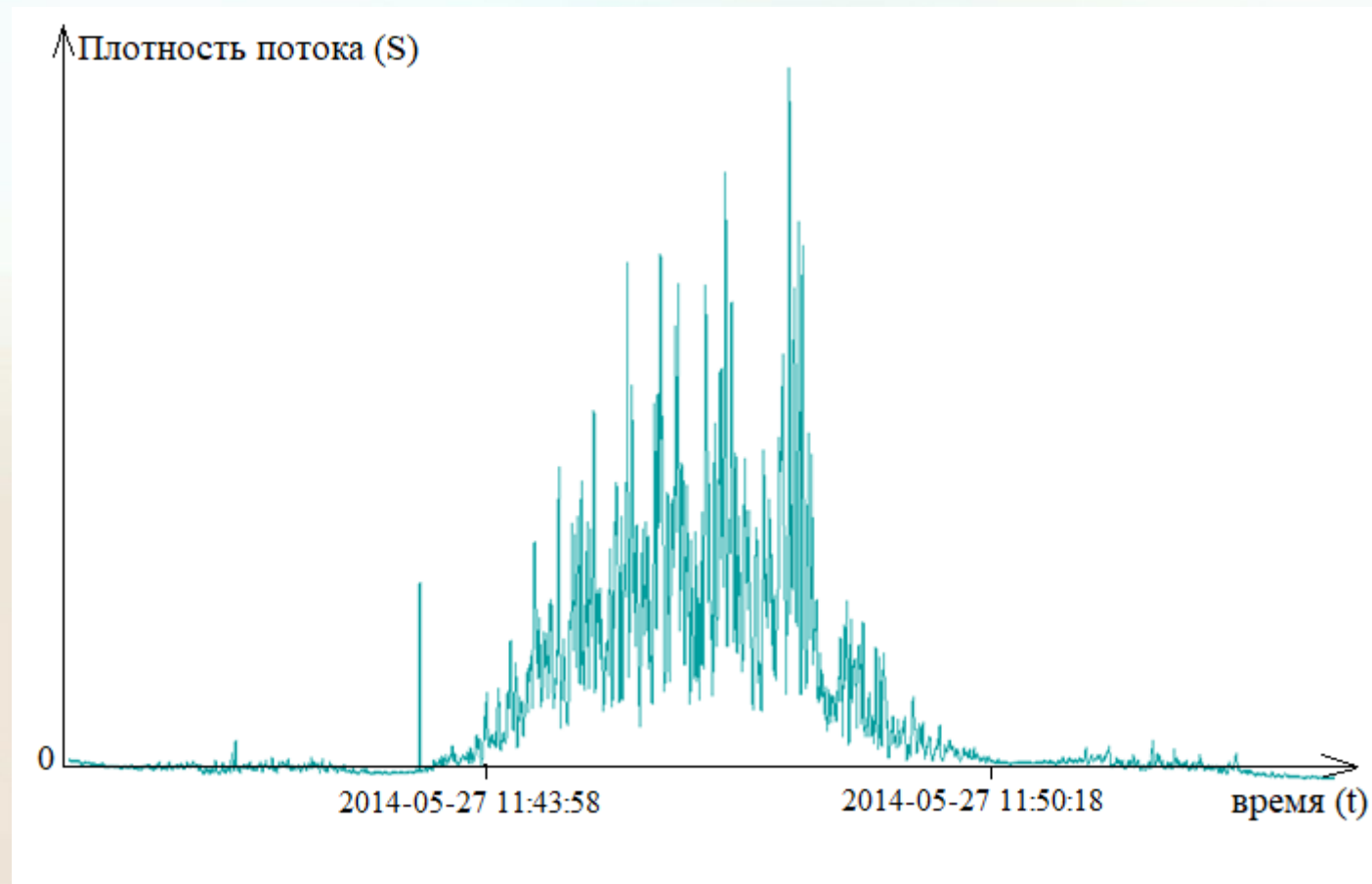
- Разработка моделей, позволяющих по длительным сериям наблюдений индивидуальных источников получать оценки скорости солнечного ветра и информацию о пространственном распределении уровням турбулентности межпланетной плазмы.
- Разработка адаптированных к реальным наблюдениям моделей, позволяющих использовать данные мониторинга межпланетных мерцаний для краткосрочного прогноза геомагнитных возмущений (проблема космической погоды).

1. Метод межпланетных мерцаний. Радиотелескоп БСА ФИАН

Межпланетные мерцания

Мерцания – флуктуации потока (интенсивности) радиоизлучения источника, связанные с дифракцией на неоднородностях плотности солнечного ветра.

Характерные масштабы: для $f = 111$ МГц - пространственный порядка сотен км, временной порядка секунды.



Характеристики межпланетных мерцаний

Индекс мерцаний

$$m^2 = \frac{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2},$$

где $I(t)$ – измеряемая плотность потока в зависимости от времени, $\langle I \rangle$ – ее среднее во времени значение.

Теоретическая формула [*]:

$$m^2 = 2\pi \int_{-1AU \cos \varepsilon}^{+\infty} C(r) dz \int_0^{+\infty} \Phi_e(q) \sin^2 \left(\frac{q^2 z'}{2k} \right) F^2(q) q dq ,$$

где $C(r)$ – структурная константа в зависимости от гелиоцентрического расстояния r ;

$\Phi_e(q)$ – пространственный спектр флуктуаций электронной плотности межпланетной плазмы;

$\sin^2 \left(\frac{q^2 z'}{2k} \right)$ – фильтр Френеля, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, $\lambda = 2,7$ м. – длина волны;

$F(q)$ – пространственный спектр радиоисточника, q – пространственная частота;

z – координата на луче зрения, отсчитываемая от прицельной точки в направлении на источник;

$z' = z + 1AU \cos \varepsilon$ – координата на луче зрения, отсчитываемая от Земли в направлении источника;

ε – элонгация источника; $1AU$ – 1 астрономическая единица.

* Власов В. И., Чашей И. В., Шишов В. И., Шишова Т. Д. Межпланетная плазма по радиоастрономическим данным. // Геомагнетизм и аэрономия. – 1979. – Т. 19. – С. 401 – 424.

Характеристики межпланетных мерцаний

Временной спектр мерцаний [*]

$$P(f) = 4A\lambda^2 \int_{-1AU \cos \varepsilon}^{+\infty} C(r) \frac{dz}{v_{\perp}(z)} \int_0^{+\infty} dq_{\perp} \Phi_e(q) \sin^2 \left(\frac{qz'}{2k} \right) F^2 \left(\frac{qz'}{k} \right) \Big|_{q_{\parallel} = \frac{2\pi f}{v_{\perp}(z)}}$$

где $C(r)$ – структурная константа в зависимости от гелиоцентрического расстояния r ;

$\Phi_e(q)$ – пространственный спектр флуктуаций электронной плотности межпланетной плазмы;

$\sin^2 \left(\frac{qz'}{2k} \right)$ – фильтр Френеля, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, $\lambda = 2,7$ м. – длина волны, $A = 5 \cdot 10^{-25}$ см²;

$F(q)$ – пространственный спектр радиоисточника;

v – скорость солнечного ветра, $v_{\perp} = v \frac{r_0}{\sqrt{z^2 + r_0^2}}$ – ее проекция на картинную плоскость,

r_0 – расстояние от центра Солнца до прицельной точки на луче зрения;

q – пространственная частота, q_{\perp} – ее составляющая в картинной плоскости, q_{\parallel} – составляющая вдоль луча зрения;

f – временная частота;

z – координата на луче зрения, отсчитываемая от прицельной точки в направлении на источник;

$z' = z + 1AU \cos \varepsilon$ – координата на луче зрения, отсчитываемая от Земли в направлении источника;

ε – элонгация источника; 1AU – 1 астрономическая единица.

* Шишов В. И., Шишова Т. Д. Влияние размеров источников на спектры межпланетных мерцаний. Теория. // *Астрономический журнал*. – 1978. – Т. 55. – С. 411 – 418.

Предположения при расчетах характеристик межпланетных мерцаний [* , **]

- Скорость солнечного ветра постоянная по величине и направлена радиально от Солнца;
- Трехмерный спектр турбулентности $\Phi_e(q) \sim q^{-3,6}$;
- Предполагалась сферически-симметричная модель межпланетной среды. Структурная константа $C \sim n^2(r) \sim \frac{1}{r^4} = \frac{1}{(r_0^2 + z^2)^2}$, где r – расстояние от центра Солнца до точки на луче зрения, $r_0 = 1AU \sin \varepsilon$ – расстояние от центра Солнца до прицельной точки, ε – элонгация источника;
- Пространственный спектр радиоисточника $F(q) \sim \exp\left(-\frac{1}{4} \theta_0^2 k^2 z'^2\right)$, где θ_0 – радиус источника по уровню $\frac{1}{e}$, $z' = z + 1AU \cos \varepsilon$ – расстояние от точки на луче зрения до наблюдателя;
- Интегрирование по лучу зрения проводилось до 2 AU (после данного значения вклад незначительный) с шагом 0,01 AU. По пространственной частоте интегрирование проводилось от 0 до 10^{-4} м^{-1} с шагом 10^{-6} м^{-1} .

*Глубокова С. К., Глянецев А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Межпланетные мерцания сильных радиоисточников на фазе спада вблизи минимума 23-го цикла солнечной активности. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т. 51. – № 6. – С. 810 – 815.

**Глубокова С. К., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям мерцаний квазара 3C 48 в минимуме солнечной активности. // Астрономический журнал. – 2013. – Т. 90. – С. 639 – 647.

Радиотелескоп БСА ФИАН [*]



Размер 187x384 метра в направлениях Восток-Запад и Север-Юг;

16384 волновых диполей;

Радиотелескоп меридионального типа;

128 лучей диаграммы направленности, из которых задействованы 96 лучей, перекрывающие склонения от -8° до $+42^\circ$;

Центральная частота 111 МГц;

Полоса частот 2,5 МГц;

6 частотных каналов.

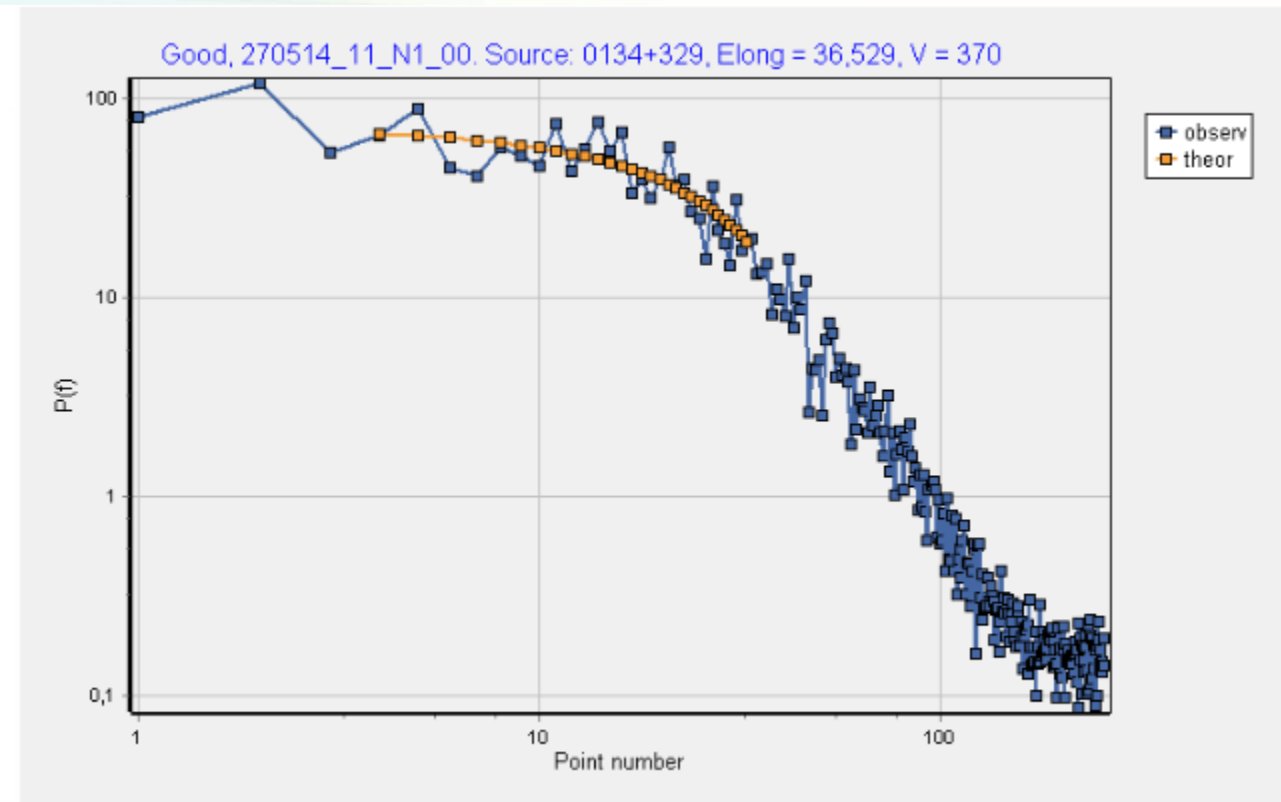
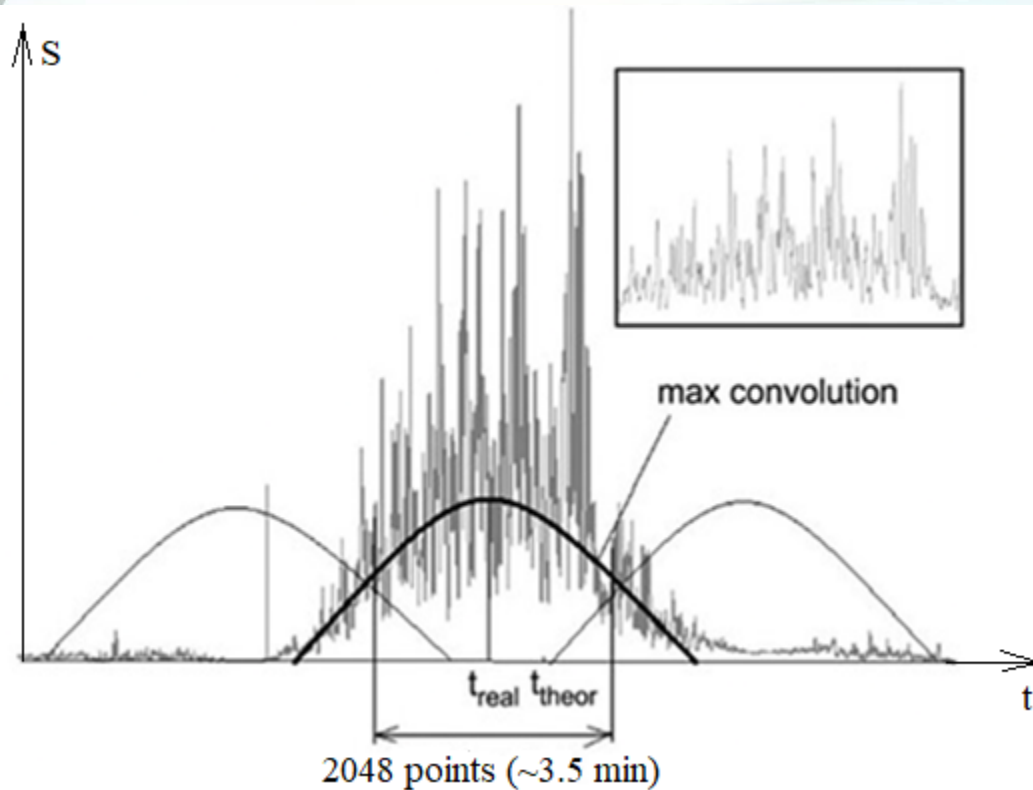
Мониторинг межпланетных мерцаний ведется с 2014 г. Ежедневно в течение 24 часов наблюдаются мерцания всех источников (около 5000 в сутки), попадающих в многолучевую диаграмму радиотелескопа. При анализе данных массовых измерений мерцаний используются не записи индивидуальных источников, а двумерные карты, характеризующие пространственно-временное распределение уровня мерцаний.

*<https://www.prao.ru>

2. Глобальная структура солнечного ветра на спаде 24-го цикла солнечной активности

Оценка скорости солнечного ветра

Радиоисточники: 3C48 ($\theta=0.33''$), 3C298 ($\theta=0.52''$) [*]

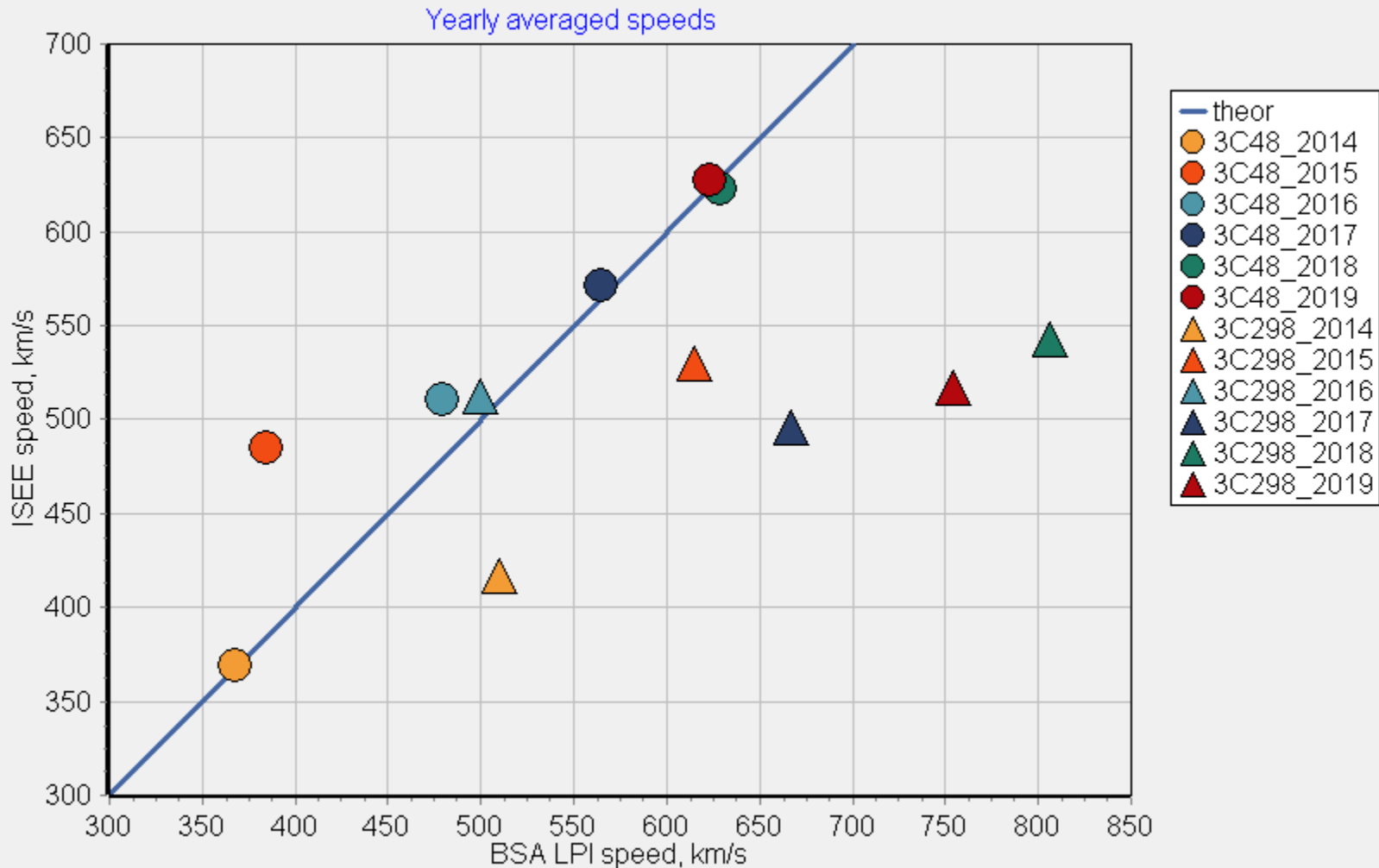


*Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Субаев И. А., Китаева М. А. Исследование ярких компактных радиоисточников северной полушеры на частоте 111 МГц. // *Астрономический журнал*. – 2020. – Т. 97. – С. 378 – 398.

Сравнение среднегодовых оценок скоростей, рост скорости с понижением активности

Элонгации (угловое расстояние от Солнца до радиоисточника при наблюдении с Земли): 25° - 60°

Погрешности сравнимы с размером меток



Для компактного источника (3C48):
Среднегодовые оценки скоростей
совпадают.

Для протяженного источника (3C298):
Однопунктовые оценки скоростей
превышают трехпунктовые.
Возможные причины: недостаточно
точная модель среды, анизотропия
источника.

Понятия компактный и протяженный
источник следует разделять по
угловому размеру Френеля:

$$\theta_{\text{фр}} = (2k \cdot 1 \text{ а. е.} \cdot \cos \varepsilon)^{-1/2}.$$

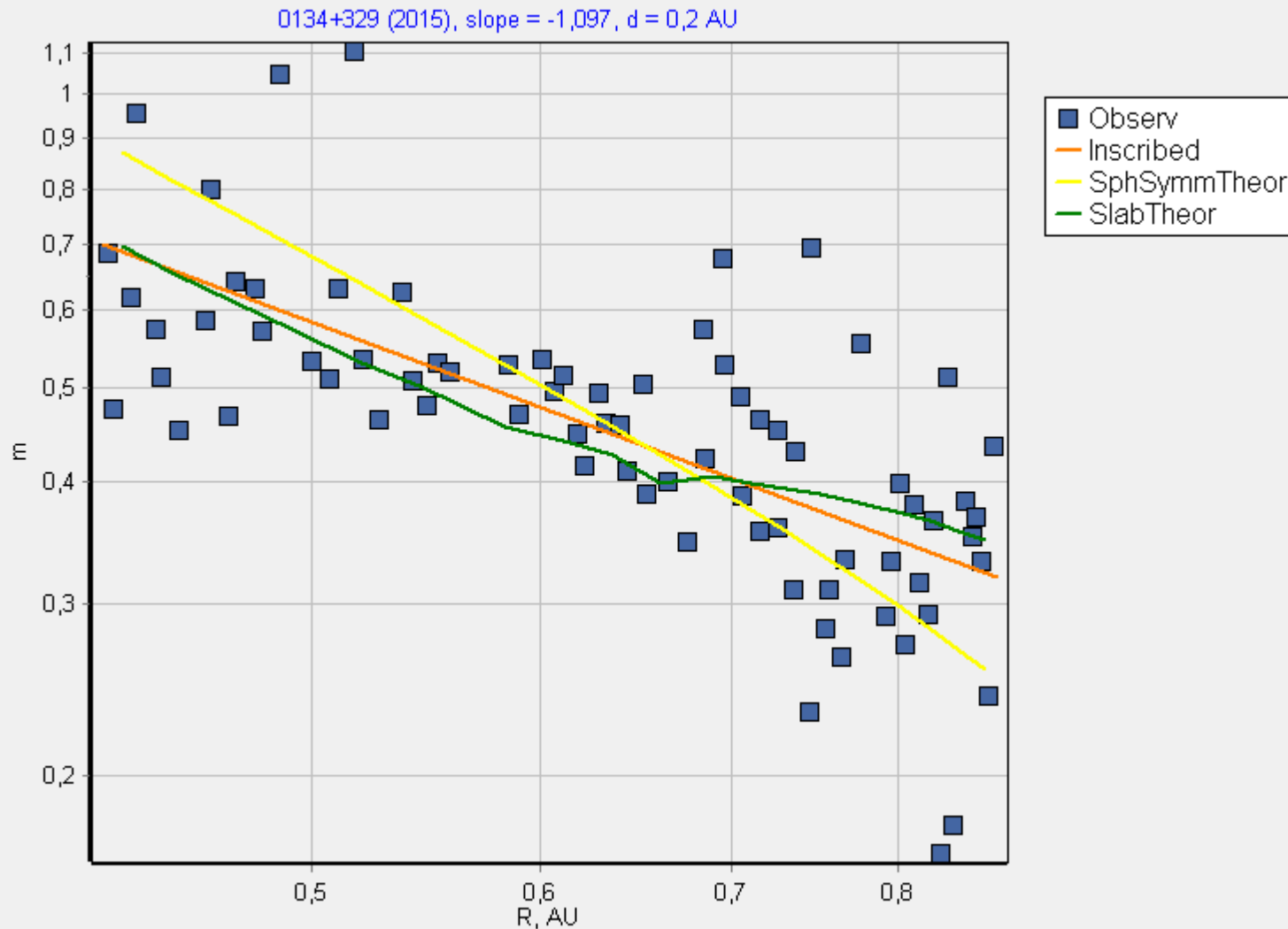
$\theta < \theta_{\text{фр}}$ - источник компактный;

$\theta > \theta_{\text{фр}}$ - источник протяженный.

Зависимость индекса мерцаний от расстояния от Солнца (2015)

Элонгации: 25° - 60°

Радиоисточник: 3C48



Среднеквадратичное отклонение вписанной прямой от точек по наблюдениям (в логарифмическом масштабе):

$$\sigma_{inscr} = 0,076.$$

Среднеквадратичное отклонение теоретической зависимости в сферически-симметричном случае:

$$\sigma_{SphSymmTheor} = 0,113,$$

$$\frac{|\sigma_{SphSymmTheor} - \sigma_{inscr}|}{\sigma_{inscr}} = 49,0 \%$$

Среднеквадратичное отклонение теоретической зависимости с учетом слоя:

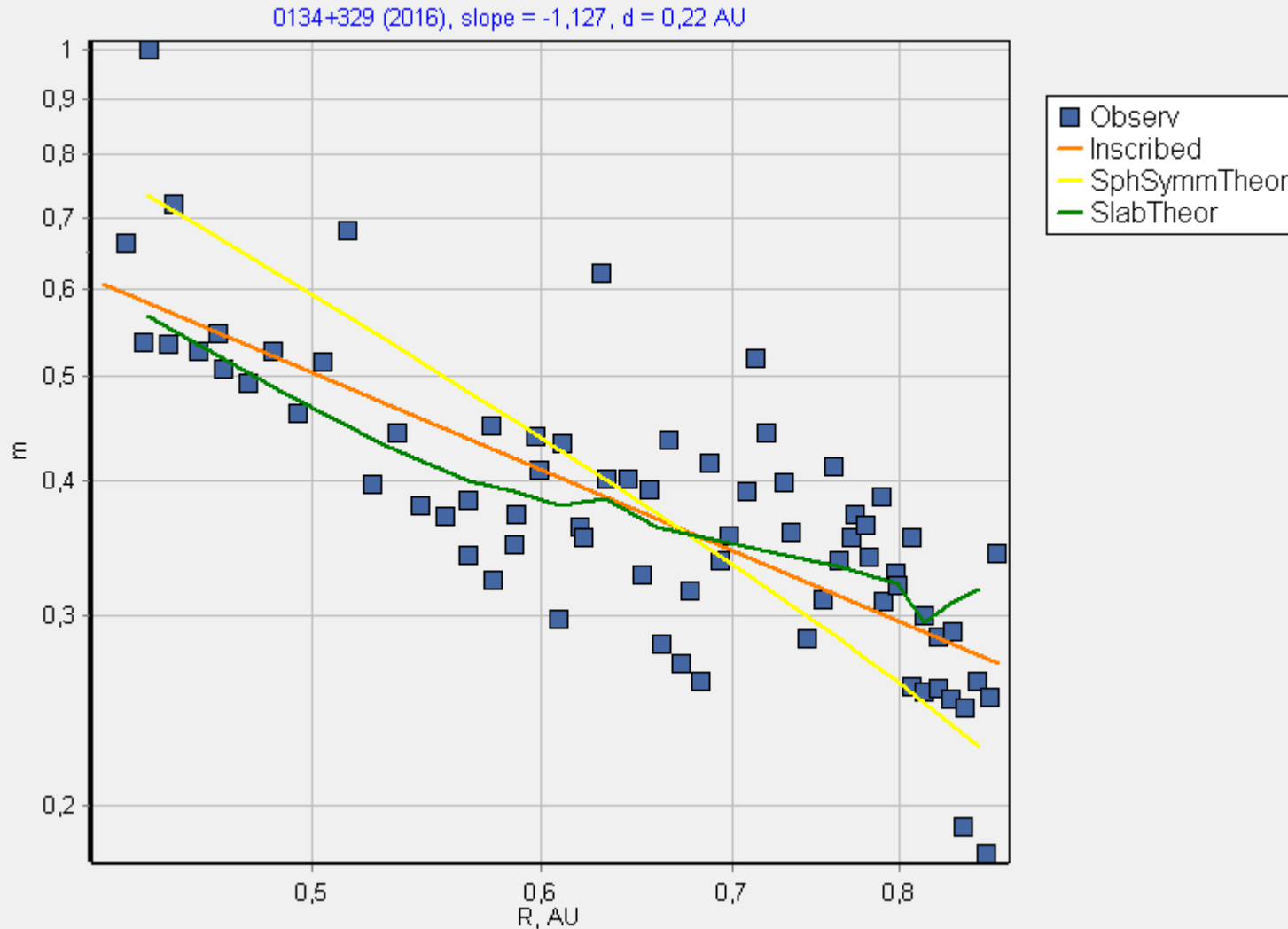
$$\sigma_{SlabTheor} = 0,071,$$

$$\frac{|\sigma_{SlabTheor} - \sigma_{inscr}|}{\sigma_{inscr}} = 6,8 \%$$

Зависимость индекса мерцаний от расстояния от Солнца (2016)

Элонгации: 25° - 60°

Радиоисточник: 3C48



Среднеквадратичное отклонение вписанной прямой от точек по наблюдениям (в логарифмическом масштабе):

$$\sigma_{inscr} = 0,070.$$

Среднеквадратичное отклонение теоретической зависимости в сферически-симметричном случае:

$$\sigma_{SphSymmTheor} = 0,098,$$

$$\frac{|\sigma_{SphSymmTheor} - \sigma_{inscr}|}{\sigma_{inscr}} = 40,0 \%$$

Среднеквадратичное отклонение теоретической зависимости с учетом слоя:

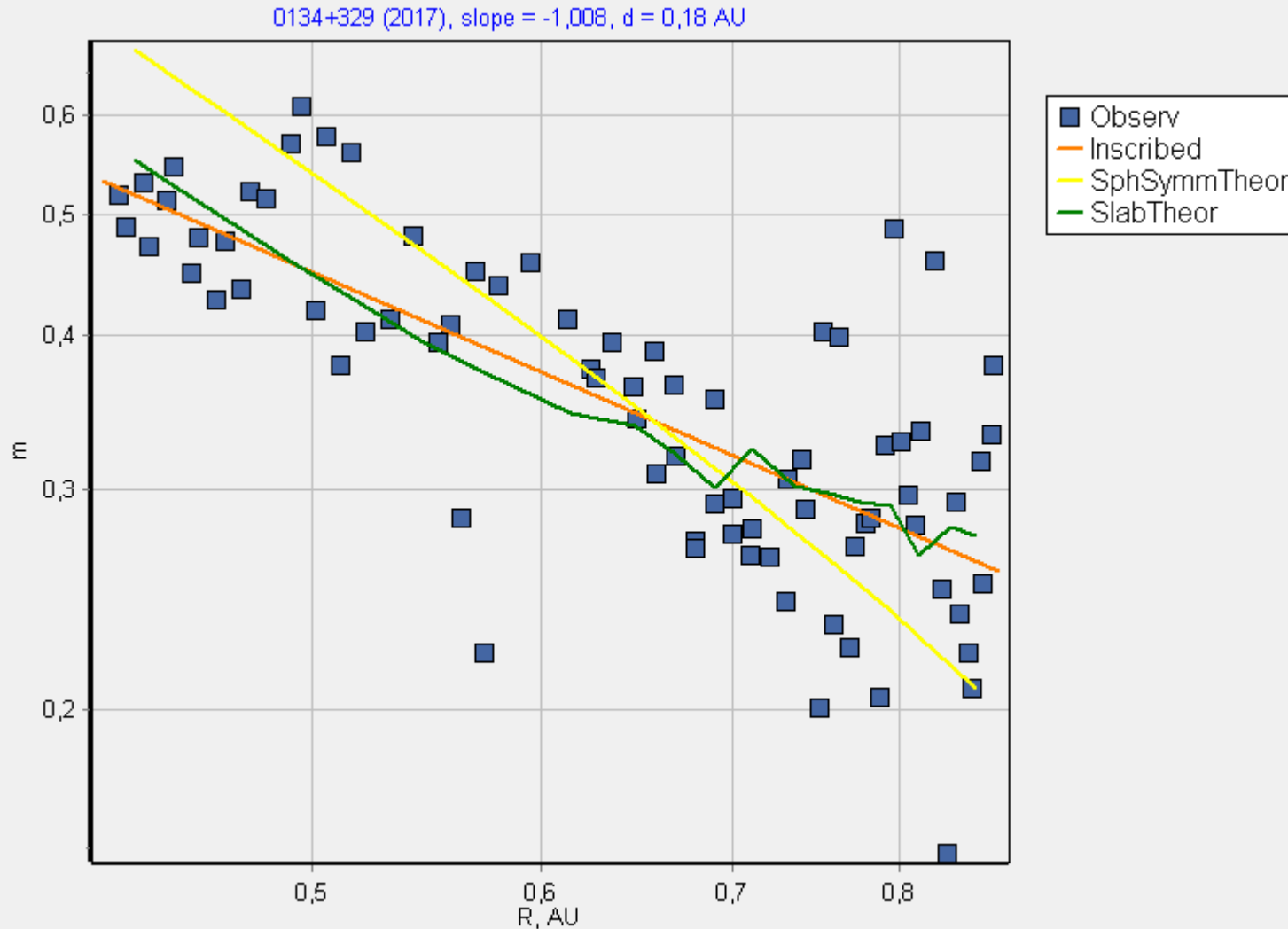
$$\sigma_{SlabTheor} = 0,064,$$

$$\frac{|\sigma_{SlabTheor} - \sigma_{inscr}|}{\sigma_{inscr}} = 8,7 \%$$

Зависимость индекса мерцаний от расстояния от Солнца (2017)

Элонгации: 25° - 60°

Радиоисточник: 3C48



Среднеквадратичное отклонение вписанной прямой от точек по наблюдениям (в логарифмическом масштабе):

$$\sigma_{inscr} = 0,086.$$

Среднеквадратичное отклонение теоретической зависимости в сферически-симметричном случае:

$$\sigma_{SphSymmTheor} = 0,113,$$

$$\frac{|\sigma_{SphSymmTheor} - \sigma_{inscr}|}{\sigma_{inscr}} = 31,4 \%$$

Среднеквадратичное отклонение теоретической зависимости с учетом слоя:

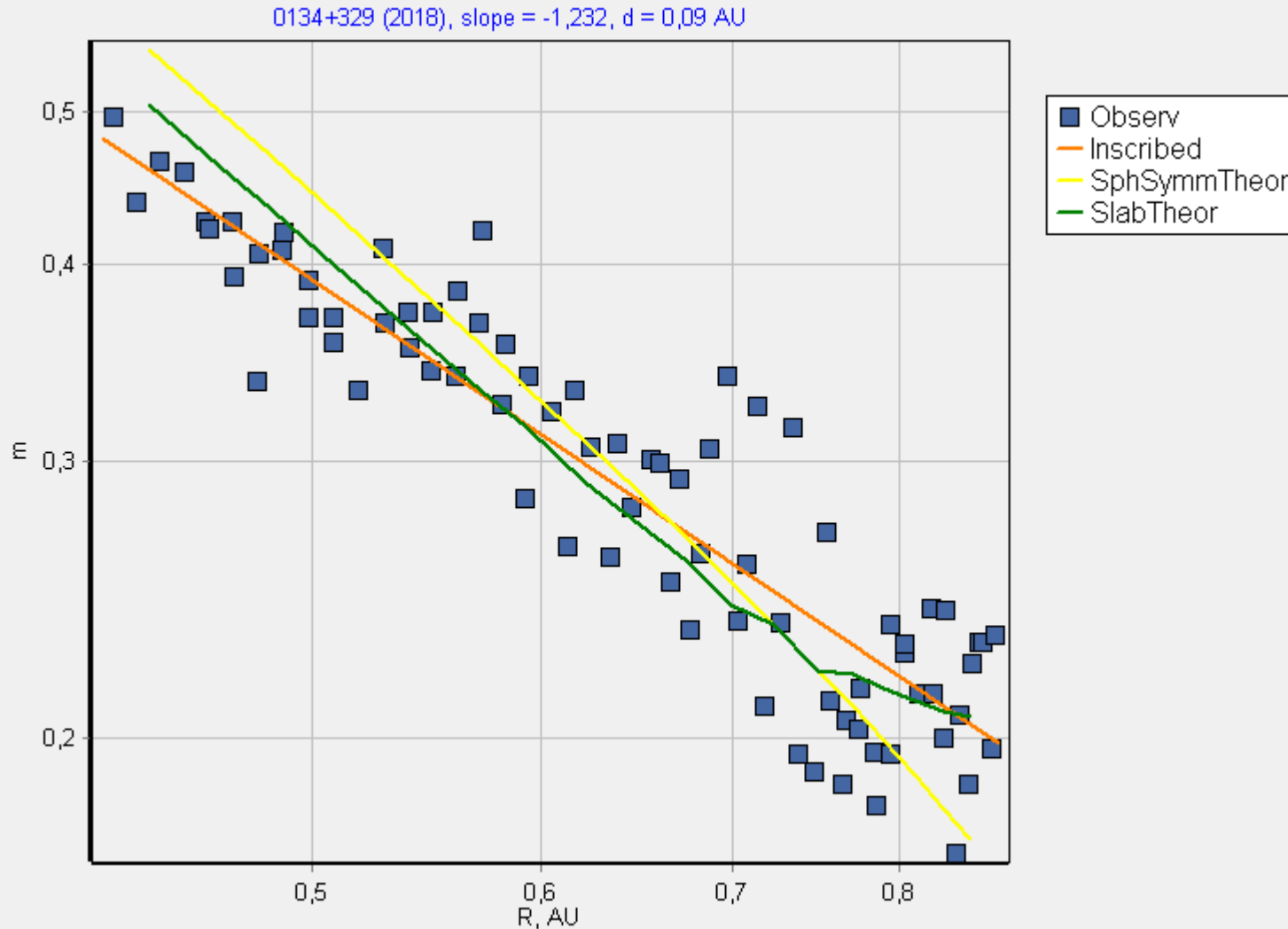
$$\sigma_{SlabTheor} = 0,088,$$

$$\frac{|\sigma_{SlabTheor} - \sigma_{inscr}|}{\sigma_{inscr}} = 2,6 \%$$

Зависимость индекса мерцаний от расстояния от Солнца (2018)

Элонгации: 25° - 60°

Радиоисточник: 3C48



Среднеквадратичное отклонение вписанной прямой от точек по наблюдениям (в логарифмическом масштабе):

$$\sigma_{inscr} = 0,049.$$

Среднеквадратичное отклонение теоретической зависимости в сферически-симметричном случае:

$$\sigma_{SphSymmTheor} = 0,069,$$

$$\frac{|\sigma_{SphSymmTheor} - \sigma_{inscr}|}{\sigma_{inscr}} = 39,7 \%$$

Среднеквадратичное отклонение теоретической зависимости с учетом слоя:

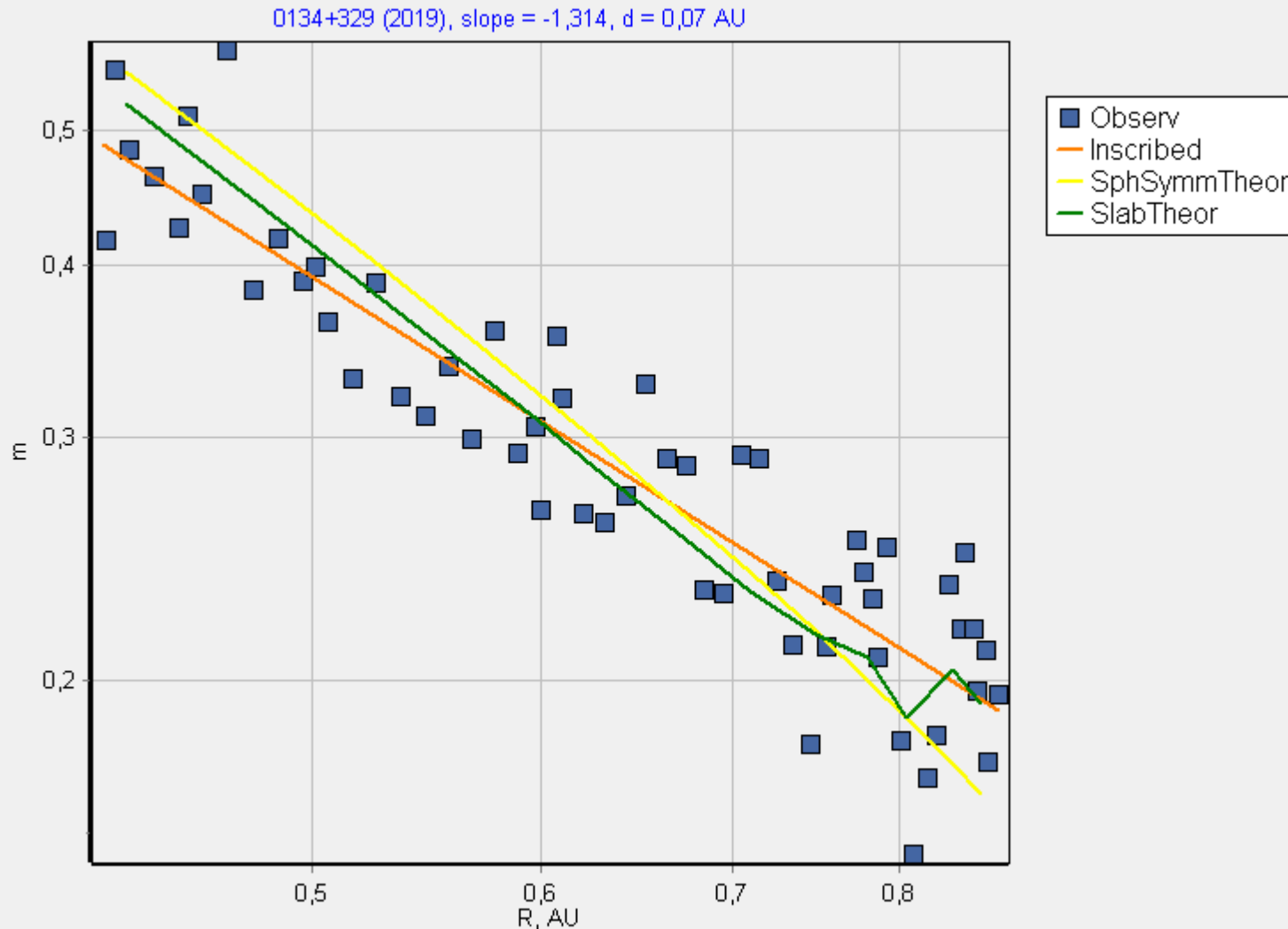
$$\sigma_{SlabTheor} = 0,052,$$

$$\frac{|\sigma_{SlabTheor} - \sigma_{inscr}|}{\sigma_{inscr}} = 6,2 \%$$

Зависимость индекса мерцаний от расстояния от Солнца (2019)

Элонгации: 25° - 60°

Радиоисточник: 3C48



Среднеквадратичное отклонение вписанной прямой от точек по наблюдениям (в логарифмическом масштабе):

$$\sigma_{inscr} = 0,053.$$

Среднеквадратичное отклонение теоретической зависимости в сферически-симметричном случае:

$$\sigma_{SphSymmTheor} = 0,069,$$

$$\frac{|\sigma_{SphSymmTheor} - \sigma_{inscr}|}{\sigma_{inscr}} = 30,3 \%$$

Среднеквадратичное отклонение теоретической зависимости с учетом слоя:

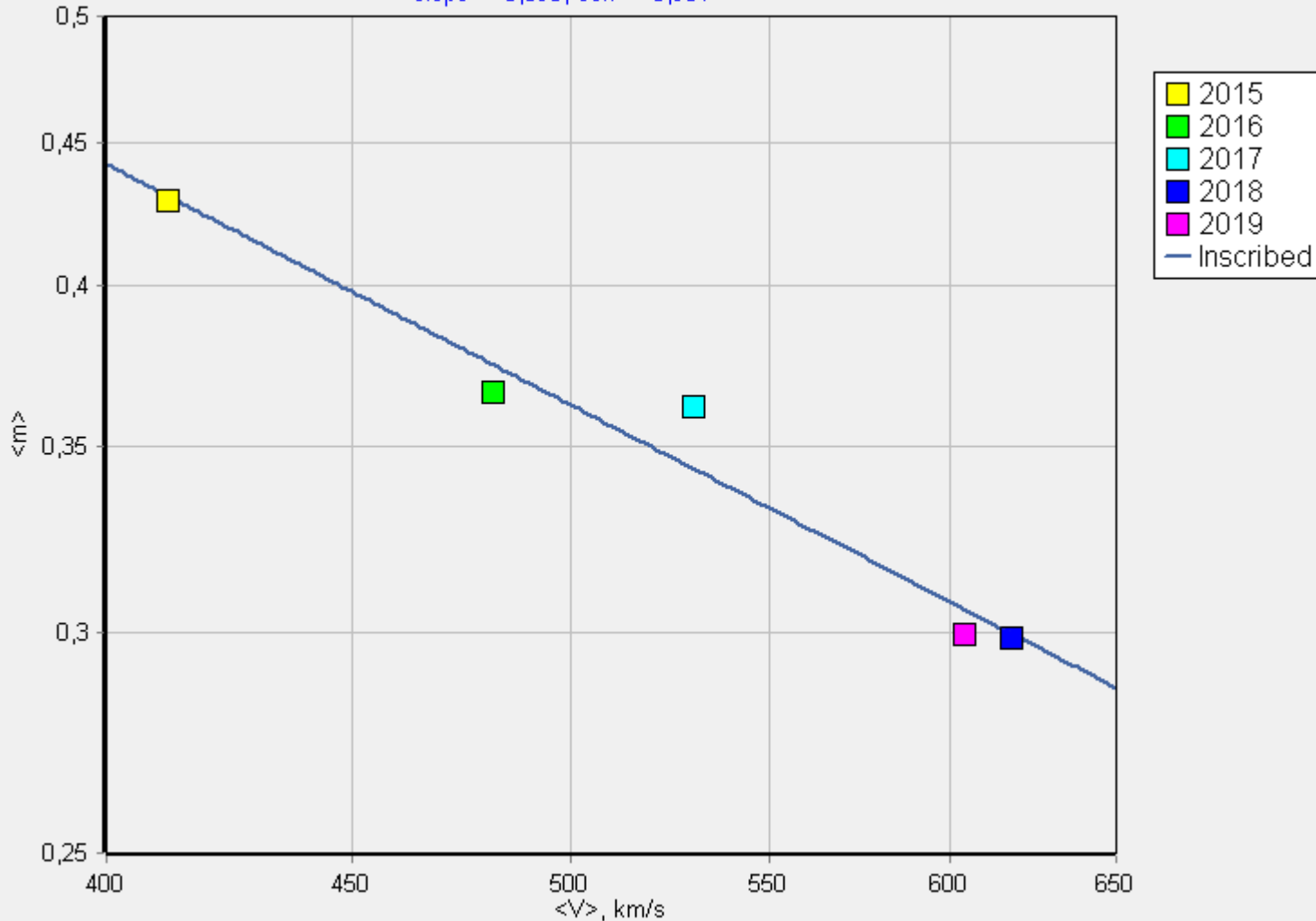
$$\sigma_{SlabTheor} = 0,056,$$

$$\frac{|\sigma_{SlabTheor} - \sigma_{inscr}|}{\sigma_{inscr}} = 6,3 \%$$

Среднегодовые значения индекса мерцаний и скорости солнечного ветра

Погрешности сравнимы с размером меток

slope = -0,893, corr = -0,981



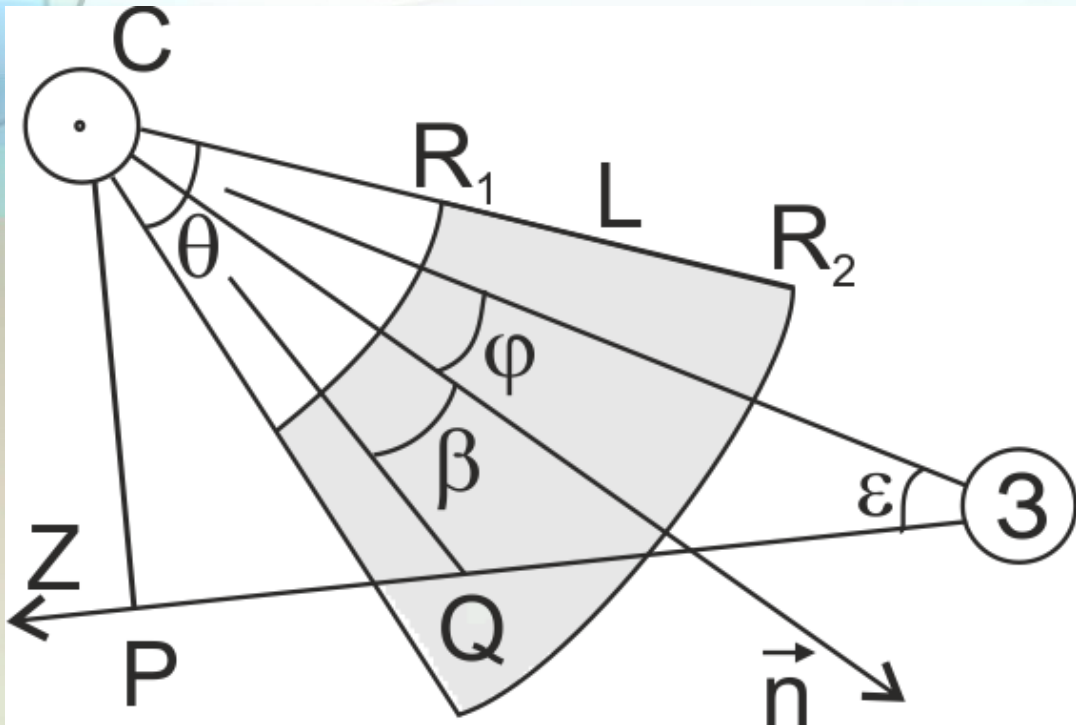
Элонгации: 25° - 60°
Радиоисточник: 3C48

Год	$\langle v \rangle$, км/с	σ_v , км/с	$\langle m \rangle$	σ_m
2015	412	98	0,429	0,093
2016	482	124	0,366	0,086
2017	530	114	0,362	0,102
2018	618	96	0,299	0,083
2019	604	118	0,300	0,100

$\Delta n \sim \langle n \rangle$ при $\langle nV \rangle \approx const$

3. Модель распространения СМЕ в межпланетном пространстве и обоснование возможности ее применения к прогнозу космической погоды

Моделирование СМЕ



Предполагается $\theta = 100^\circ$, $L = 0,1 \text{ AU}$, $N = 3$

$$m^2 = 2\pi \int_{-1\text{AU} \cos \varepsilon}^{+\infty} dz \int_0^{+\infty} C q^{1-n} \sin^2 \left(\frac{q^2 z'}{2k} \right) dq,$$

$n = 3,6$ – индекс турбулентности,

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, $\lambda = 2,7 \text{ м}$ – длина волны,

$z' = z + 1\text{AU} \cos \varepsilon$,

z – от прицельной точки, z' – от наблюдателя,

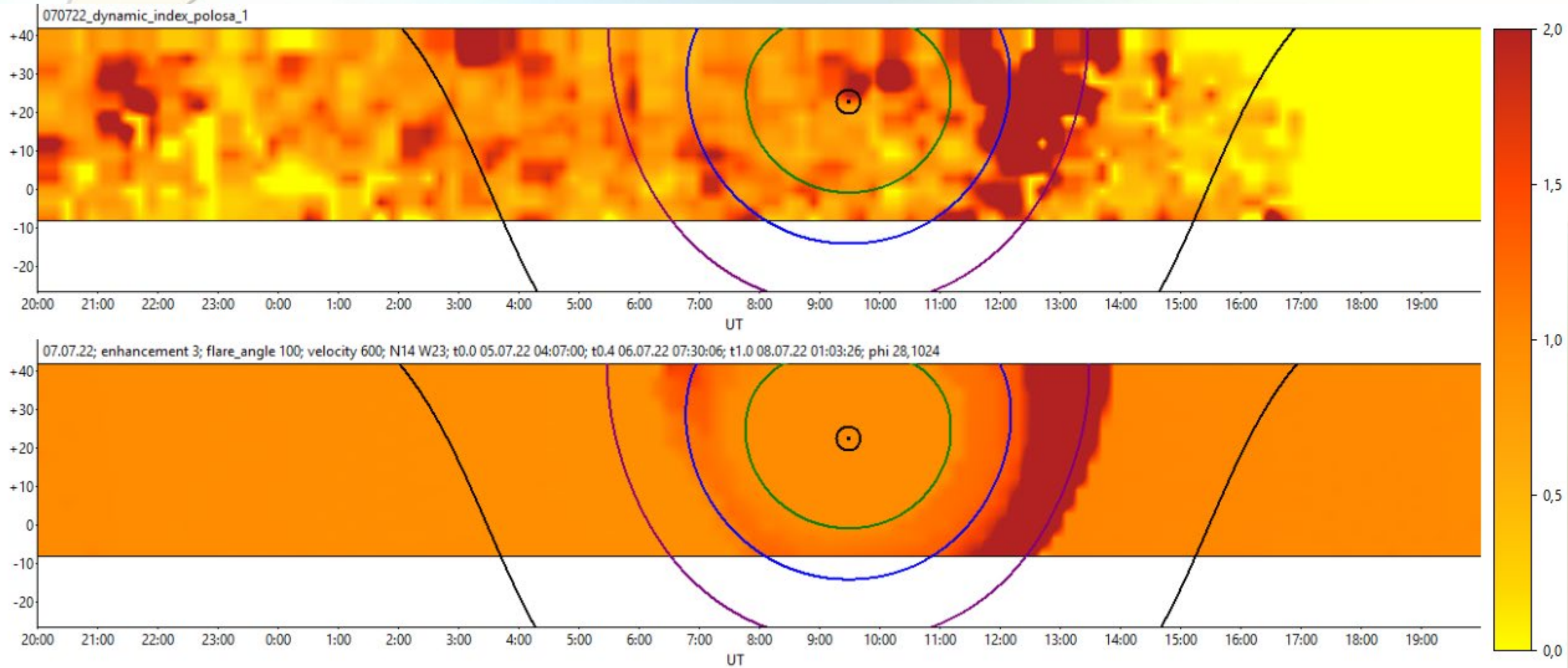
$$C = \begin{cases} C_0 r^{-4} & \text{вне СМЕ,} \\ C_0 r^{-4} N^2 & \text{внутри СМЕ.} \end{cases}$$

r – расстояние от точки до Солнца,

N – увеличение электронной плотности внутри СМЕ,

C_0 – константа, находящаяся из условия, что $m^2 = 0,6$ при $\varepsilon = 25^\circ$ и отсутствия СМЕ.

Буря 7 июля 2022 г. 21:00 UT



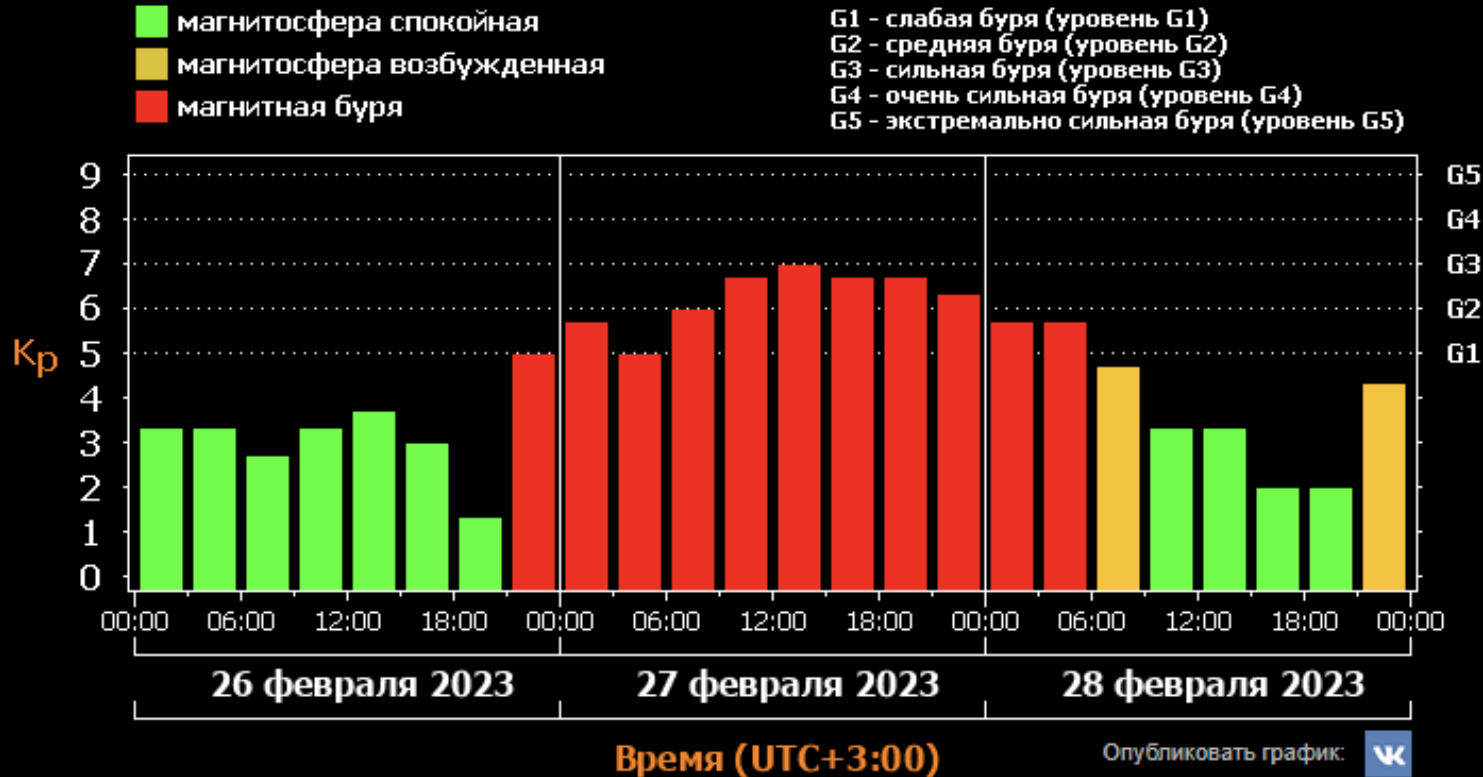
Сводная таблица случаев предсказанных магнитных бурь

№	Вспышка			v, км/с	φ, град.	Буря				
	Класс вспышки	Место вспышки	Время вспышки, UT			Оценочное время прихода, UT	Интервал времени прихода, UT	Время между началом обнаружения усиления мерцаний и началом бури, ч.	Разница реального и предсказанного времени, ч.	G-индекс
1	C2.5	S24 E00	22.04.2021 14:30	720	18,2	24.04.2021 23:57	25.04.2021 00:00-03:00	13,5	0,05	G1
2*	C4.0	N18 E50	09.05.2021 14:20	500	51,2	13.05.2021 01:04	12.05.2021 12:00-15:00	28,25	-13,07	G3
3*	M1.1	N20 E07	23.05.2021 11:08	750	23,6	25.05.2021 18:17	26.05.2021 18:00-21:00	35,5	23,72	G1
4	M1.6	N19 E09	09.10.2021 06:38	630	13,6	12.10.2021 00:17	12.10.2021 00:00-03:00	18	-0,28	G2
5	M1.7	N16 E01	02.11.2021 03:01	1100	10,6	03.11.2021 14:59	03.11.2021 21:00-24:00	13,5	6,02	G3
6*	C2.8	N21 W38	17.01.2022 14:34	1600	45,4	18.01.2022 15:38	19.01.2022 00:00-03:00	14,25	8,37	G2
7	C7.6	N25 W19	27.04.2022 14:54	700	37,0	30.04.2022 02:00	30.04.2022 03:00-06:00	20,5	1	G1
8	C9.8	N14 W23	05.07.2022 04:07	600	28,1	08.07.2022 01:03	07.07.2022 21:00-24:00	14	-4,05	G1
9*	C9.0	S11 W48	15.08.2022 17:35	1250	51,9	17.08.2022 02:40	17.08.2022 18:00-21:00	34	15,33	G2
10	C4.1	S09 E73	01.09.2022 13:58	1400	73,2	02.09.2022 19:31	03.09.2022 00:00-03:00	17	4,48	G1
11	M5.8	N17 W35	01.10.2022 20:10	1550	36,6	02.10.2022 22:51	02.10.2022 21:00-24:00	13	-1,85	G1

Среднее время реального начала магнитной бури после предсказанного: 3,6 часов, без учета сложных случаев (*): 0,8 часов;
 Среднее время начала бури после обнаружения усиления мерцаний: 20,1 часов, без учета сложных случаев (*): 15,6 часов;

Буря 26 – 28 февраля 2023 г.

Магнитные бури с 26 по 28 февраля 2023 года



Вспышки 24 февраля:

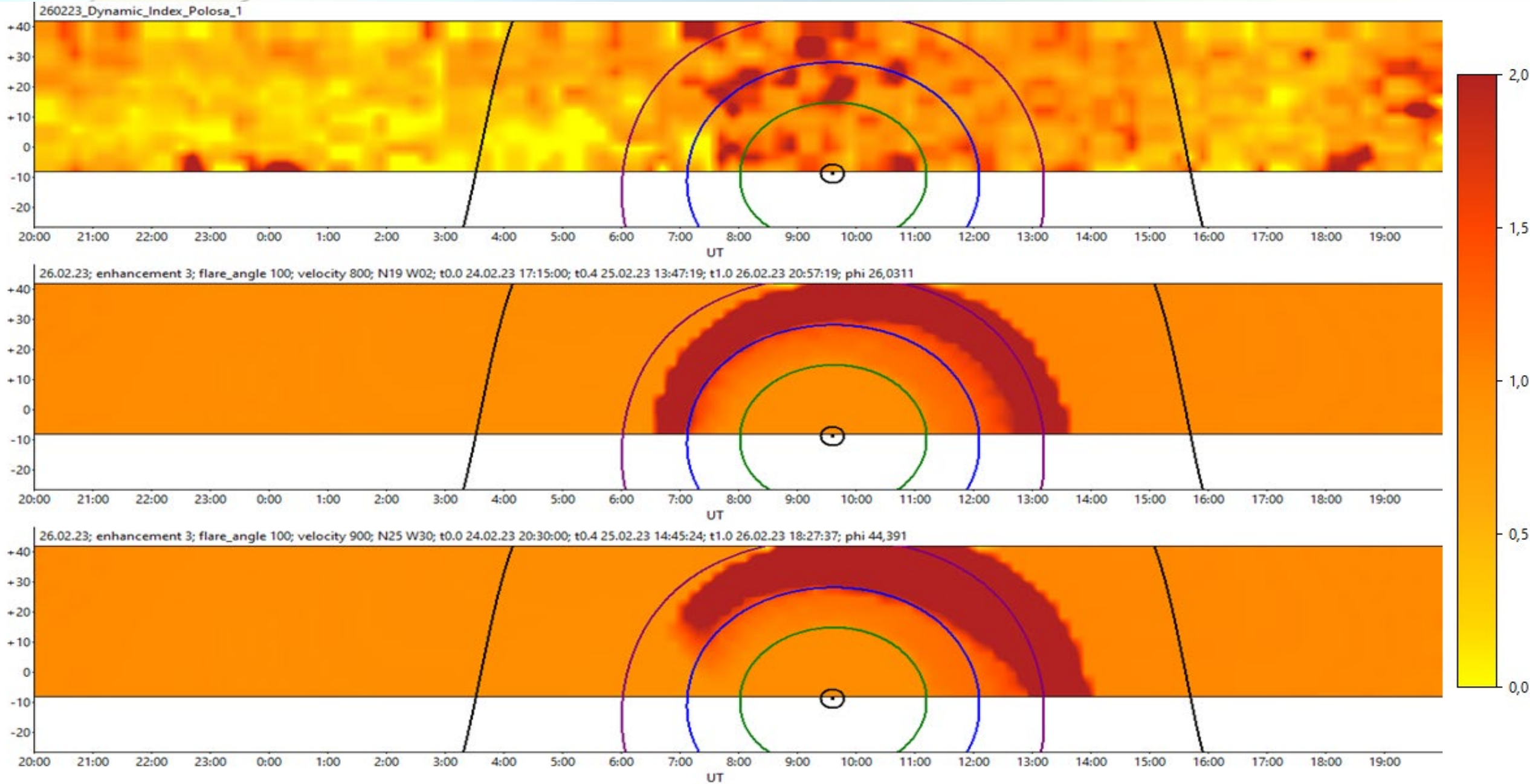
- M1.1 в 17:11-17:20 UT акт. обл. 3235;
- M3.7 в 20:03-21:29 UT акт. обл. 3229;

Вспышки 25 февраля:

- M1.0 в 15:34-15:46 UT акт. обл. 3236;
- M6.3 в 18:40-20:27 UT акт. обл. 3229.

Карты за 26 февраля

Начало усиления мерцаний 7:00UT, начало магнитной бури: 18:00UT



Краткосрочный прогноз прихода СМЕ к Земле

В данных межпланетных мерцаний СМЕ могут быть обнаружены по усилению мерцаний внутри орбиты Земли на расстоянии от 0,4 а.е. от Солнца за 15 – 20 часов до их прихода к Земле;

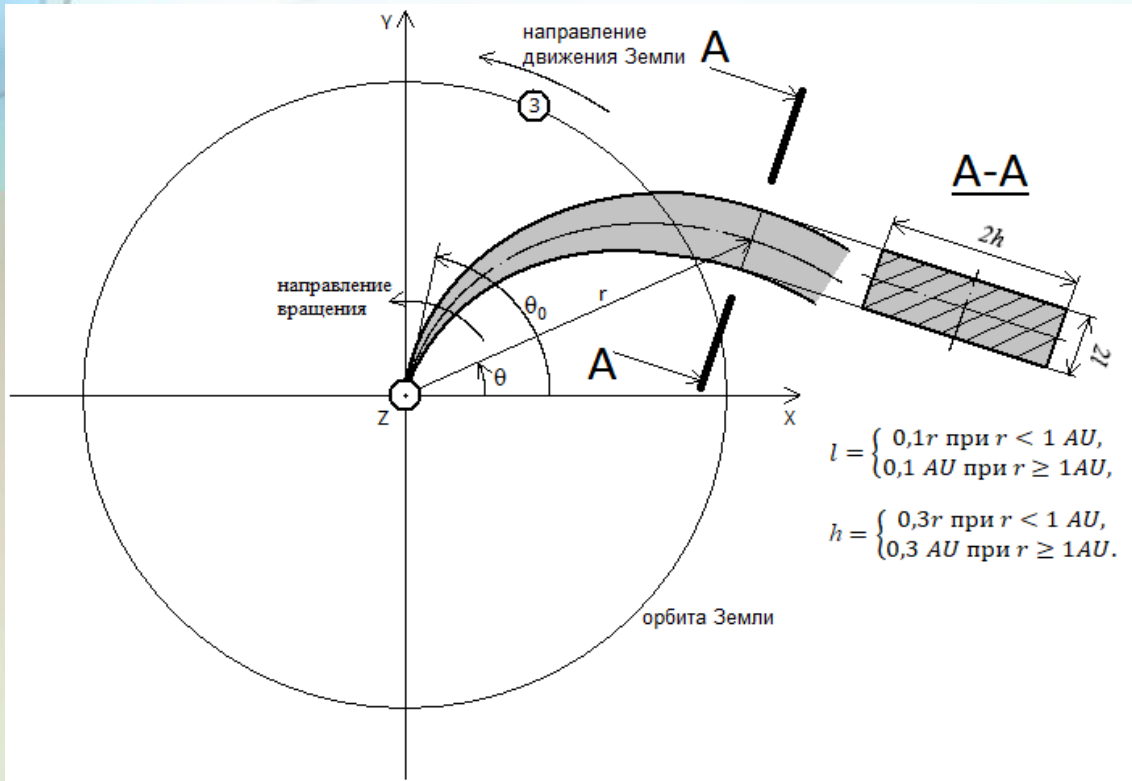
Усиление мерцаний наблюдается, как правило, в утренней области, а затем в тот же день – в вечерней до прихода СМЕ к Земле;

При наблюдении серии вспышек наблюдаемые усиления мерцаний стоит привязывать к более сильным и длительным вспышкам.

4. Модель распространения CIR в межпланетном пространстве и обоснование возможности ее применения к прогнозу космической погоды

Моделирование CIR

Ось CIR: $r = a(\theta_0 - \theta)$



Предполагается $\theta_0 - \theta = \frac{\pi}{4}$ при $r = 1 \text{ AU}$, $N = 3$

$$m^2 = 2\pi \int_{-1 \text{ AU} \cos \varepsilon}^{+\infty} dz \int_0^{+\infty} C q^{1-n} \sin^2 \left(\frac{q^2 z'}{2k} \right) dq,$$

$n = 3,6$ – индекс турбулентности,

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, $\lambda = 2,7 \text{ м}$ – длина волны,

$z' = z + 1 \text{ AU} \cos \varepsilon$,

z – от прицельной точки, z' – от наблюдателя,

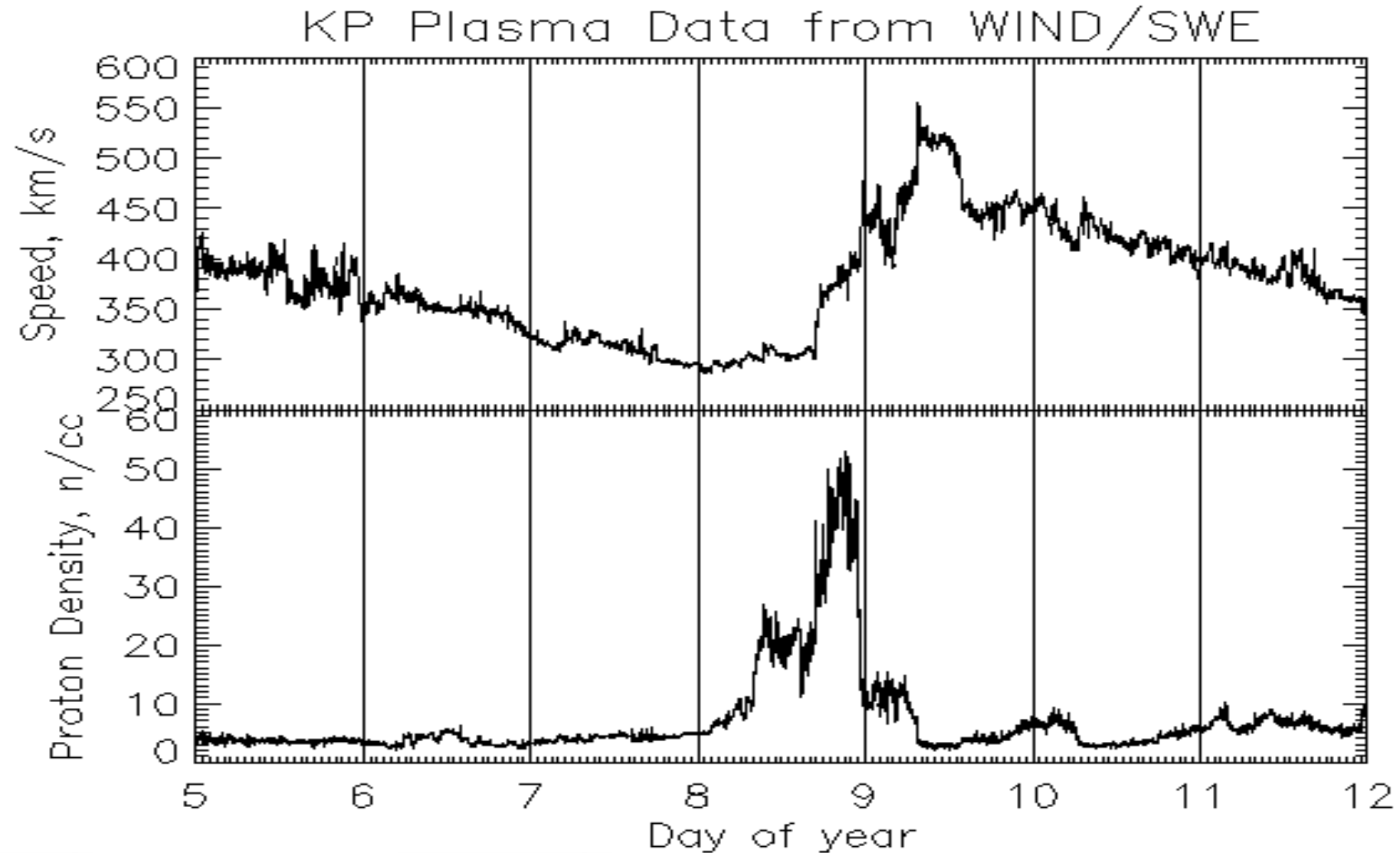
$$C = \begin{cases} C_0 r^{-4} & \text{вне CIR}, \\ C_0 r^{-4} N^2 & \text{внутри CIR}. \end{cases}$$

r – расстояние от точки до Солнца,

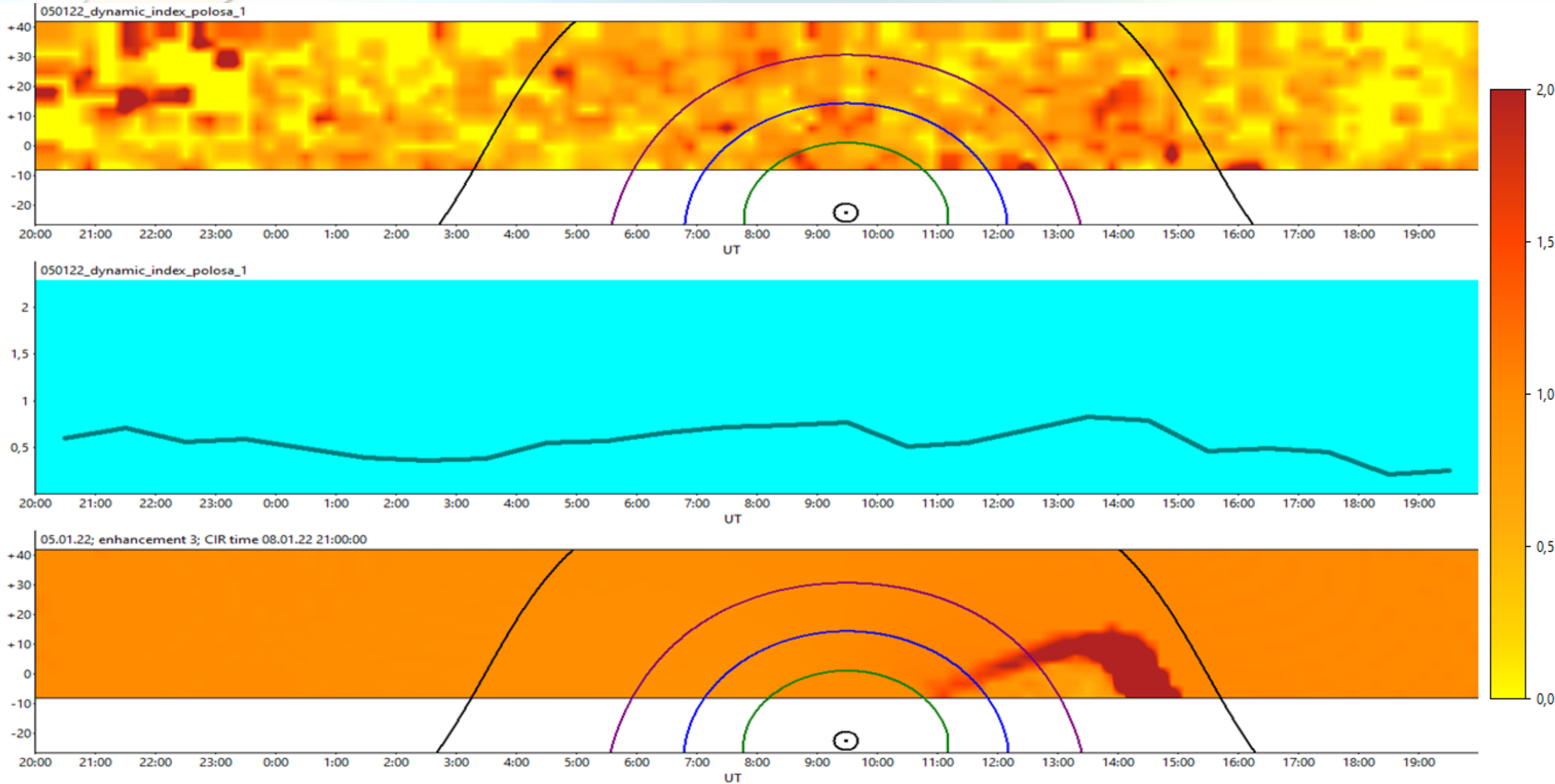
N – увеличение электронной плотности внутри CIR,

C_0 – константа, находящаяся из условия, что $m^2 = 0,6$ при $\varepsilon = 25^\circ$ и отсутствия CIR.

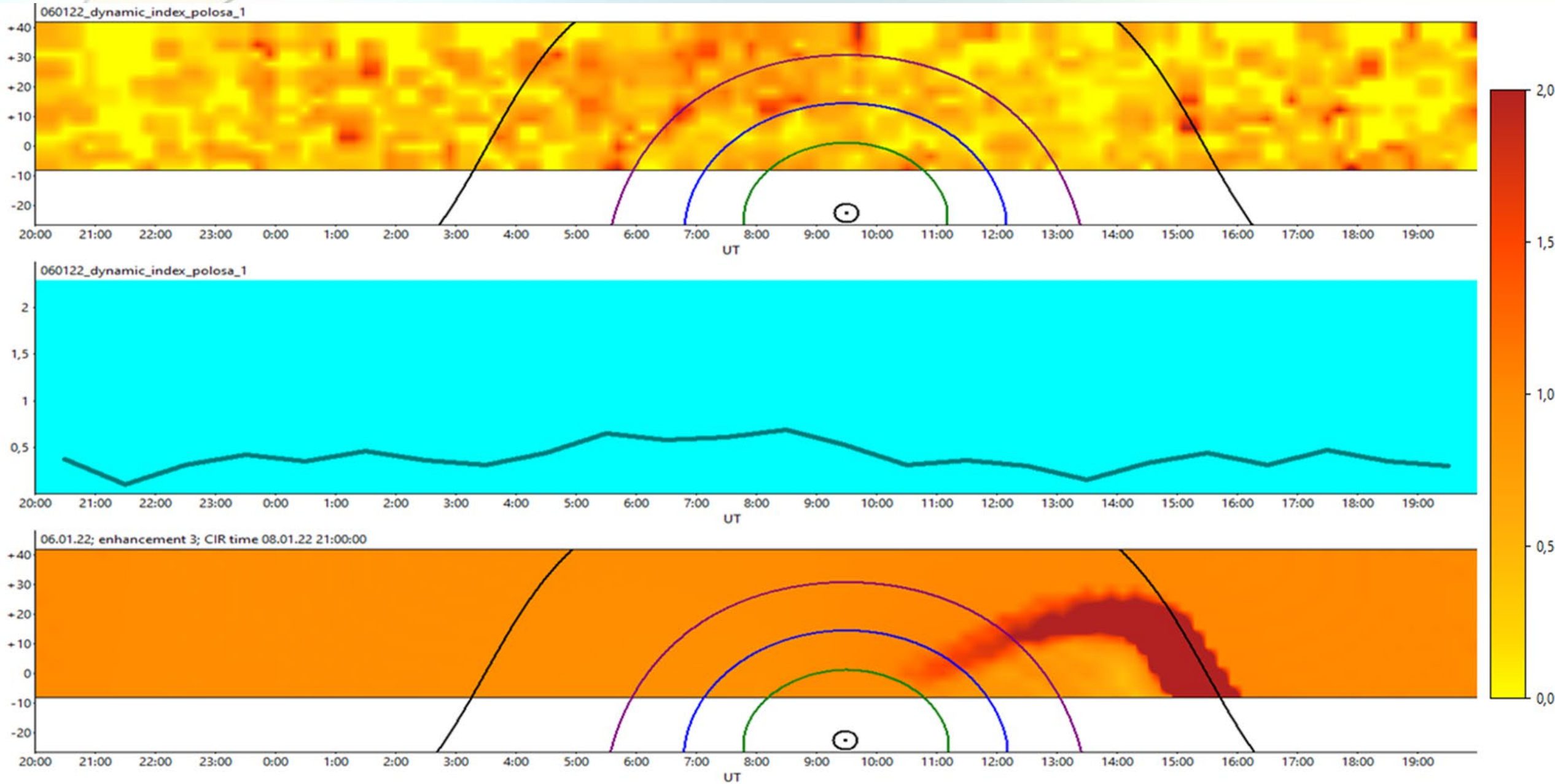
Буря 8 января 2022 г. График скорости солнечного ветра и протонной плотности по данным WIND на интервале с 5 по 11 января 2022 г.



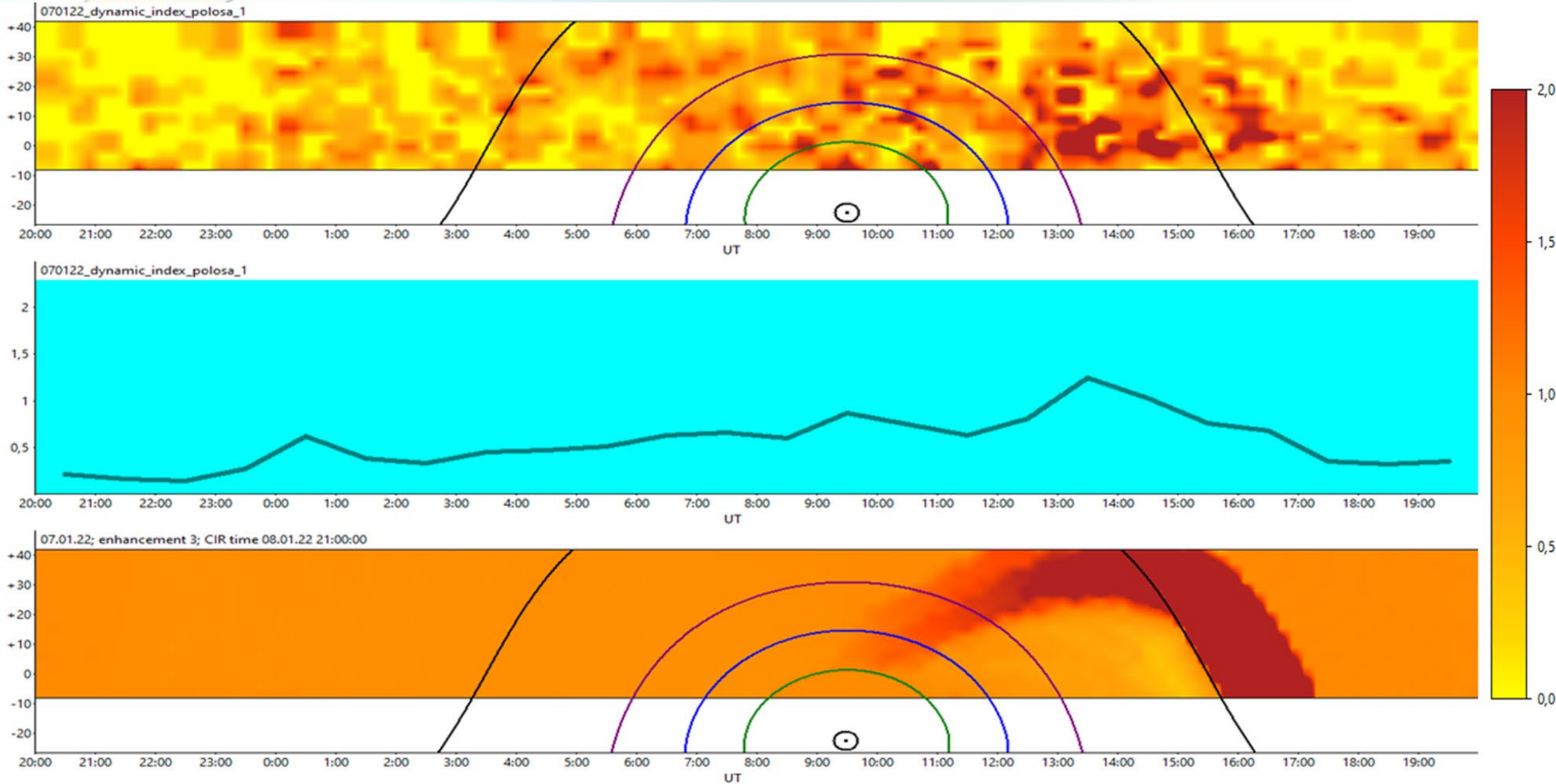
Буря 8 января 2022 г. Карты за 5 января



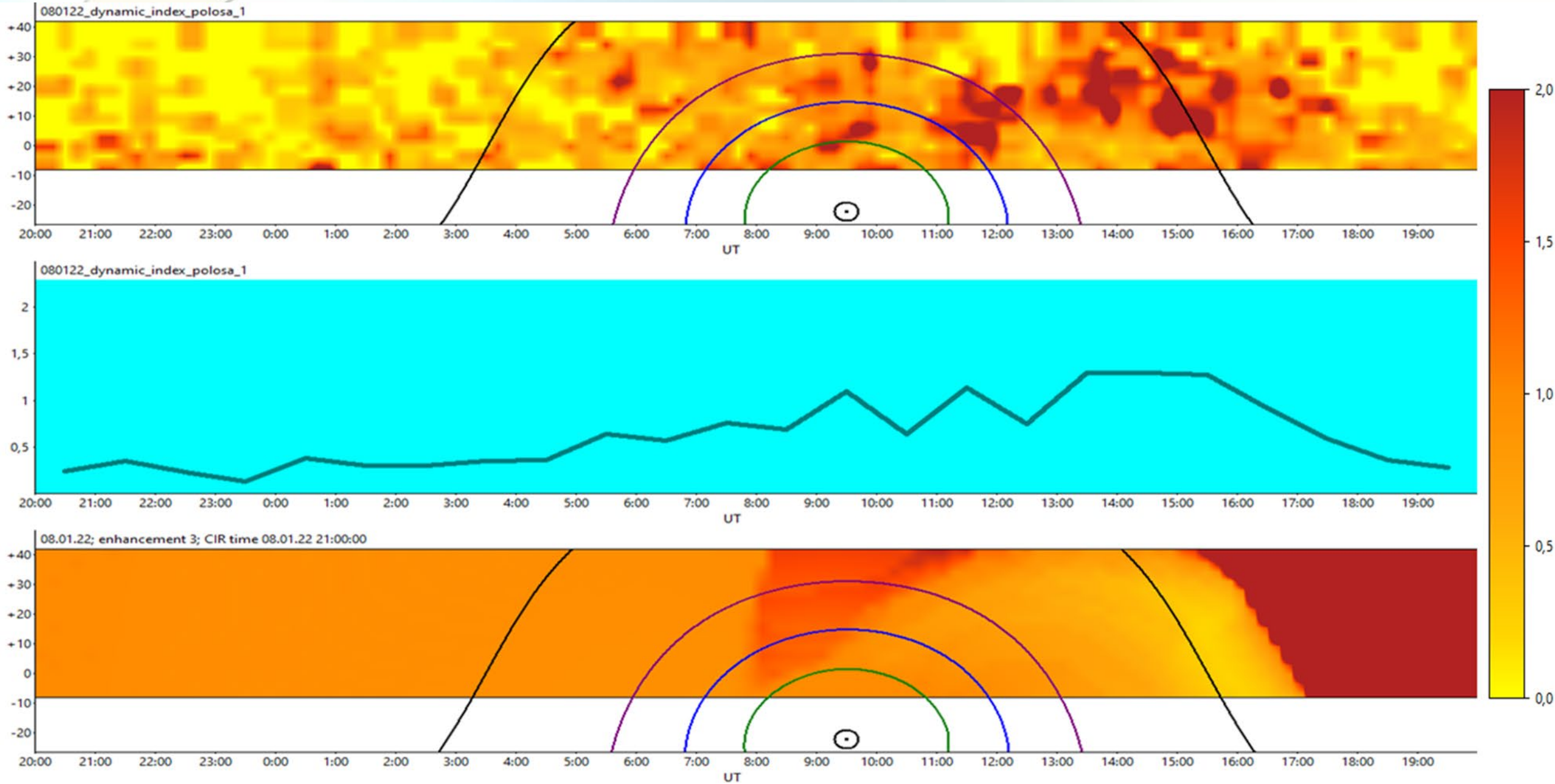
Буря 8 января 2022 г. Карты за 6 января



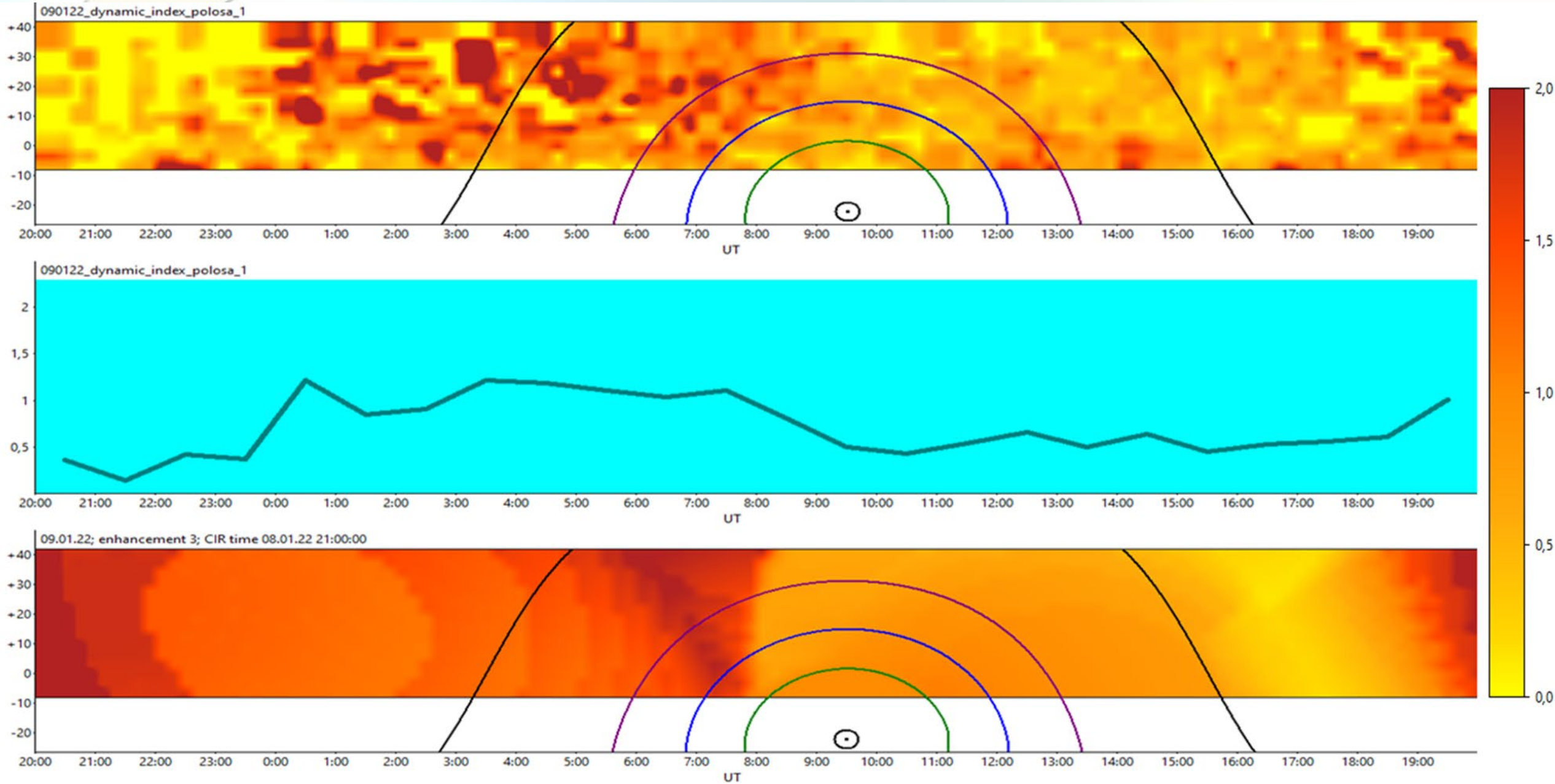
Буря 8 января 2022 г. Карты за 7 января



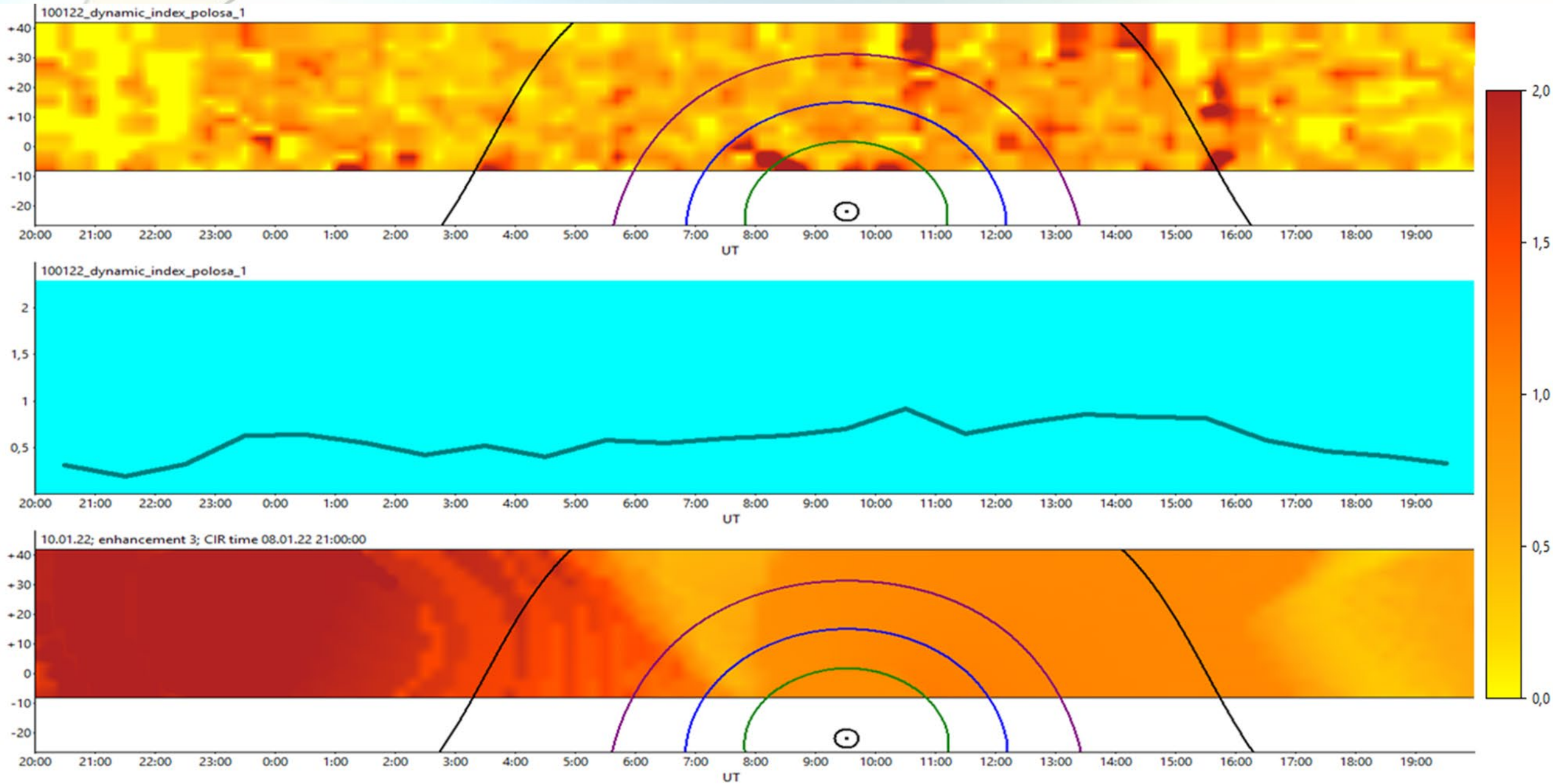
Буря 8 января 2022 г. Карты за 8 января



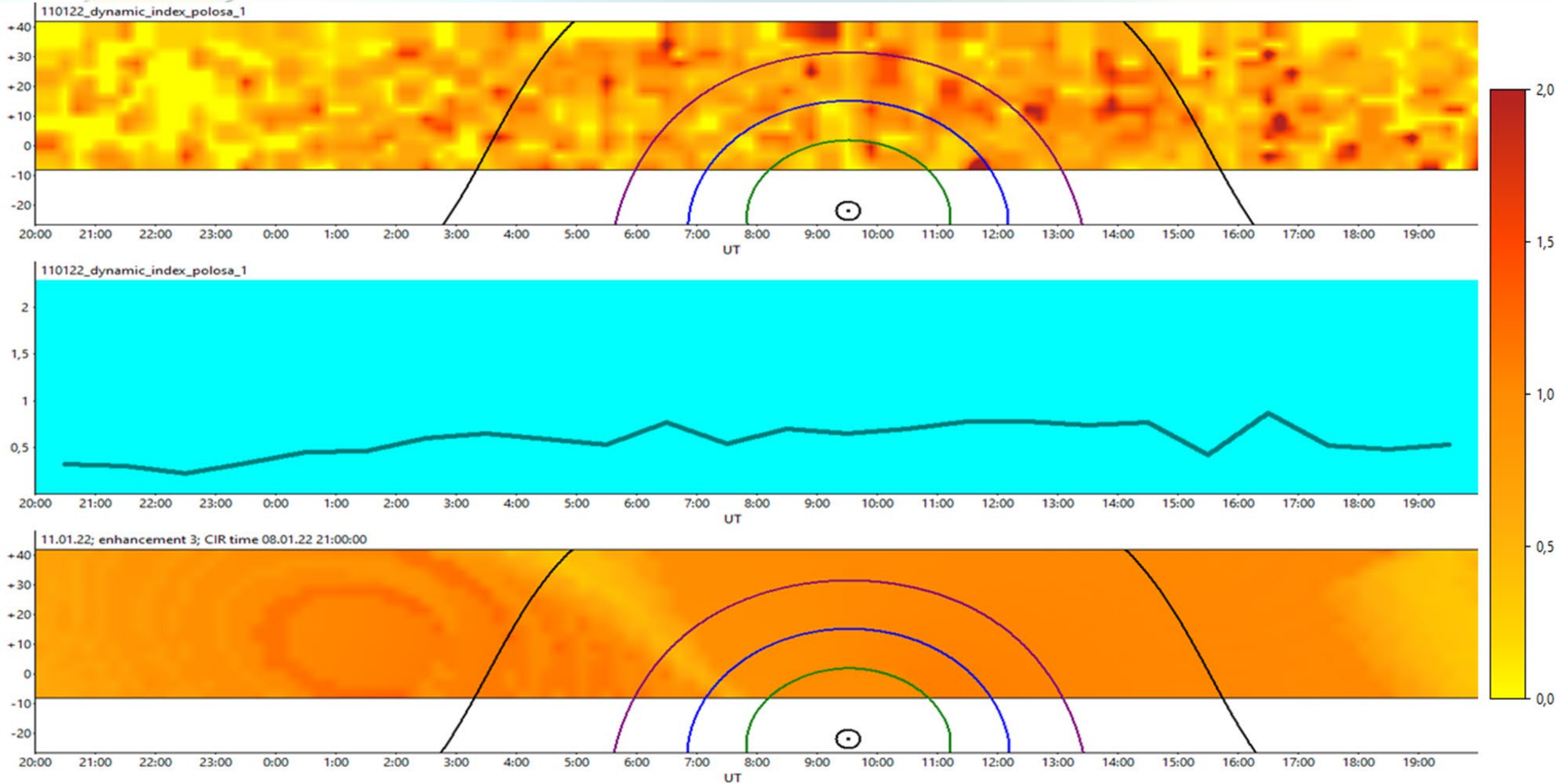
Буря 8 января 2022 г. Карты за 9 января



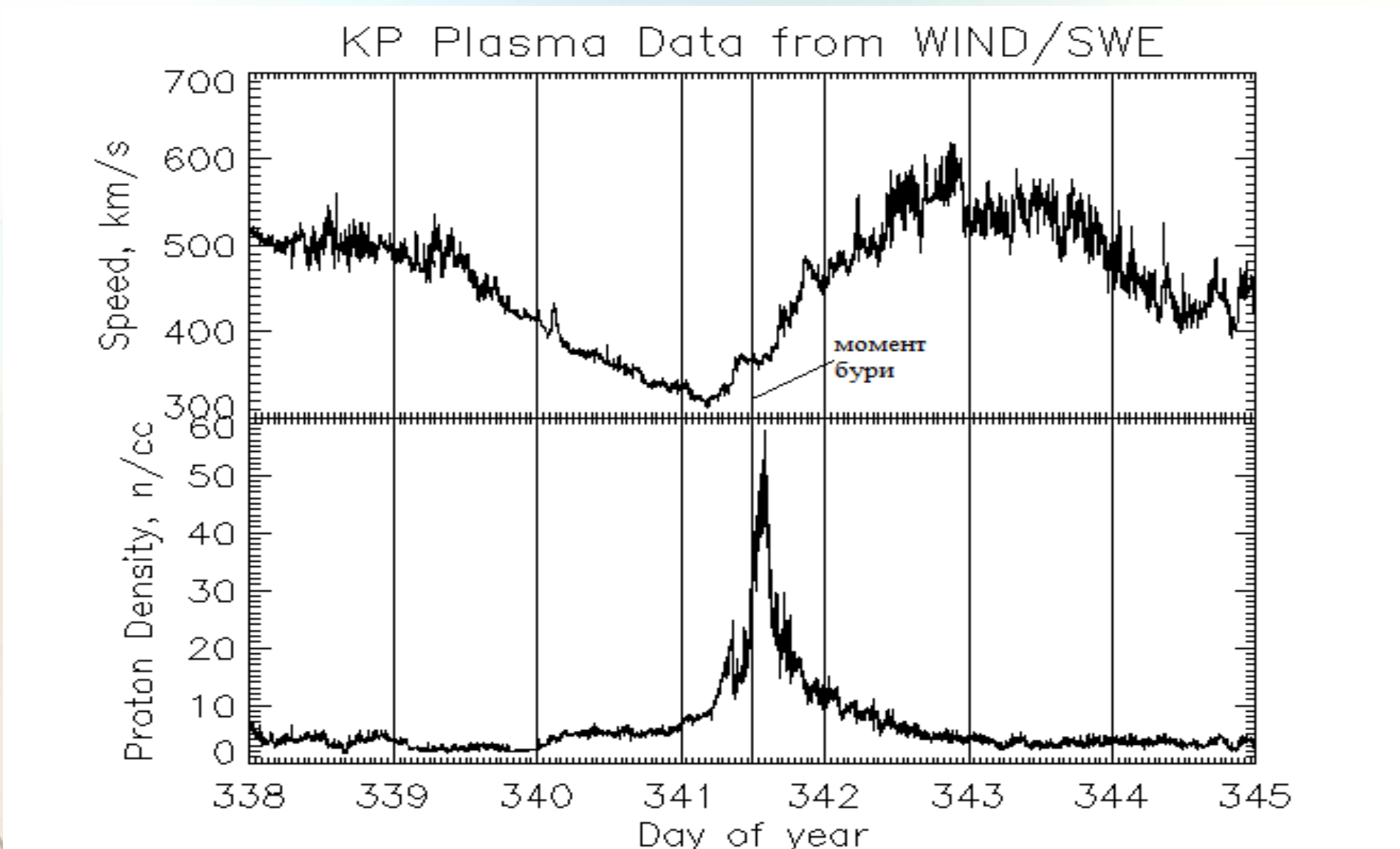
Буря 8 января 2022 г. Карты за 10 января



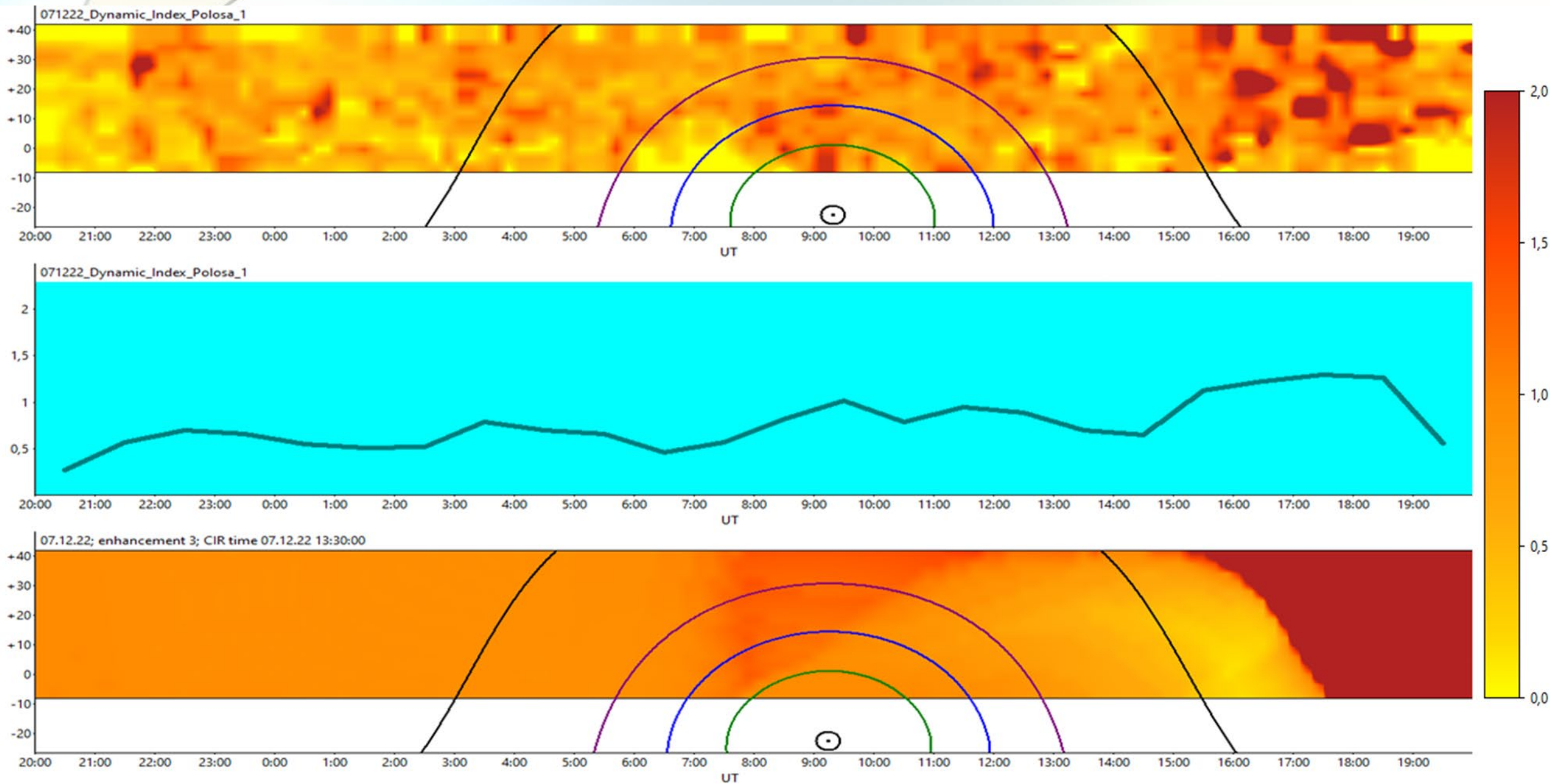
Буря 8 января 2022 г. Карты за 11 января



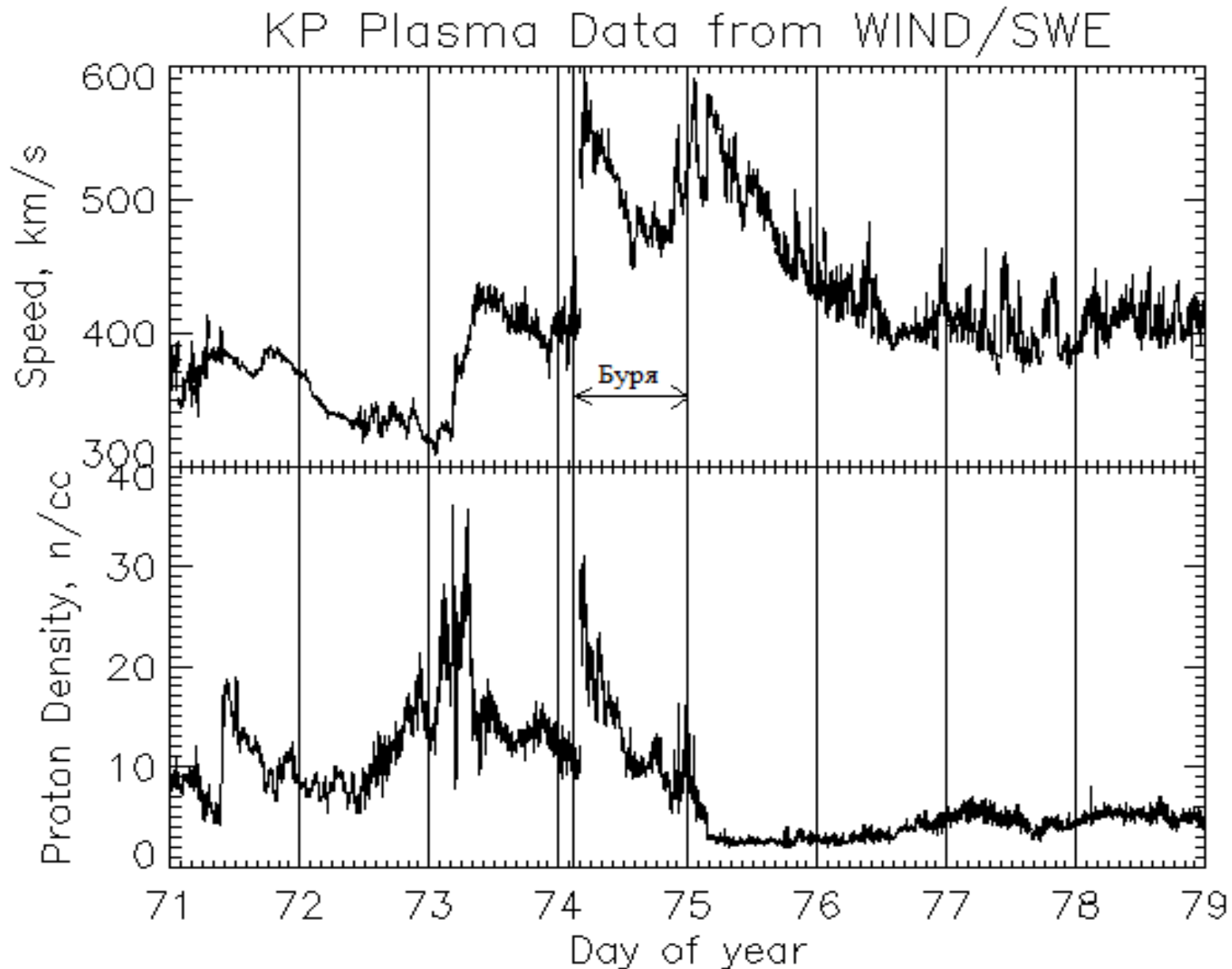
Буря 7 декабря 2022 г. График скорости солнечного ветра и протонной плотности по данным WIND на интервале с 4 по 10 декабря 2022 г.



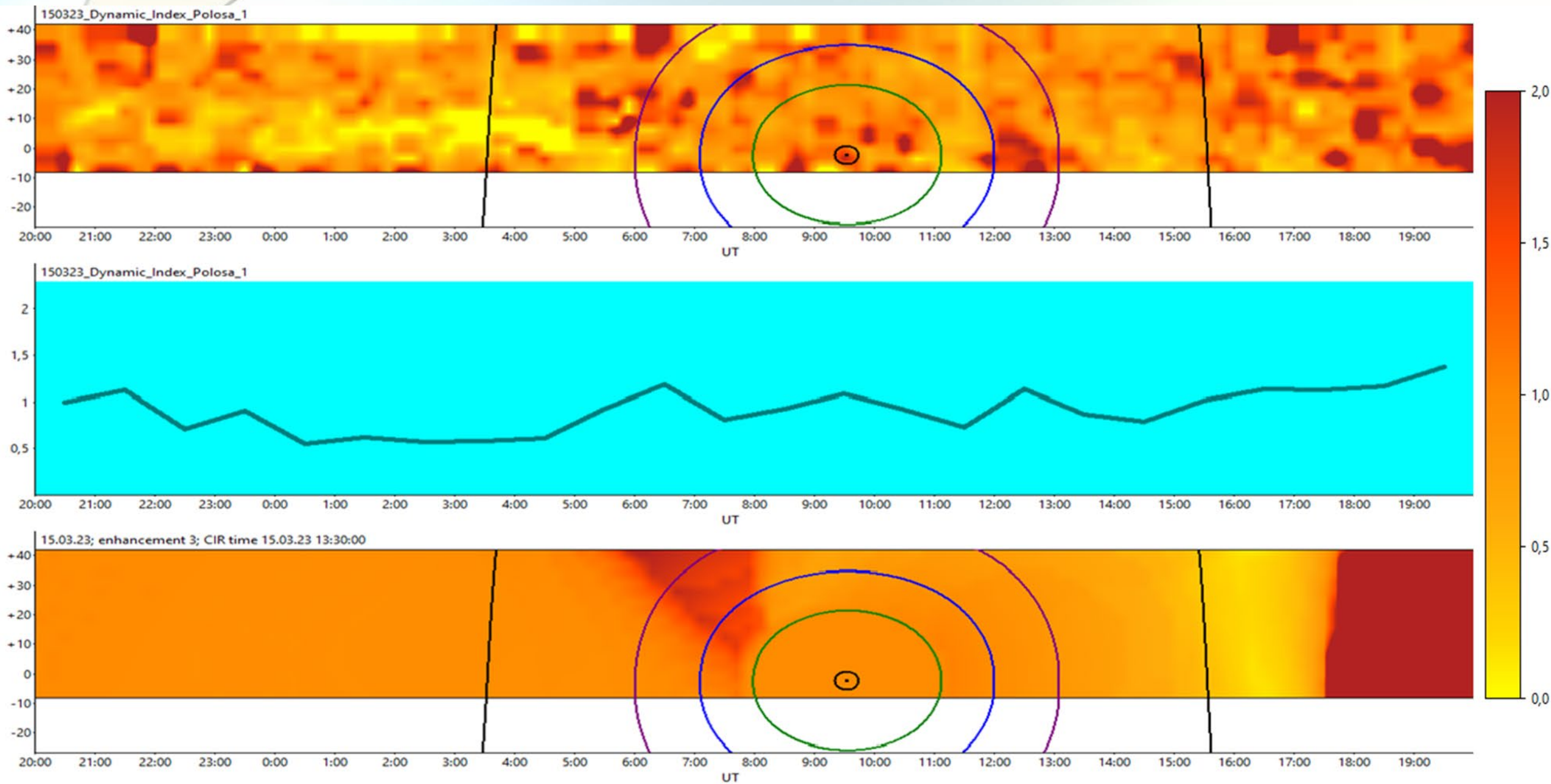
Буря 7 декабря 2022 г. Карты за 7 декабря



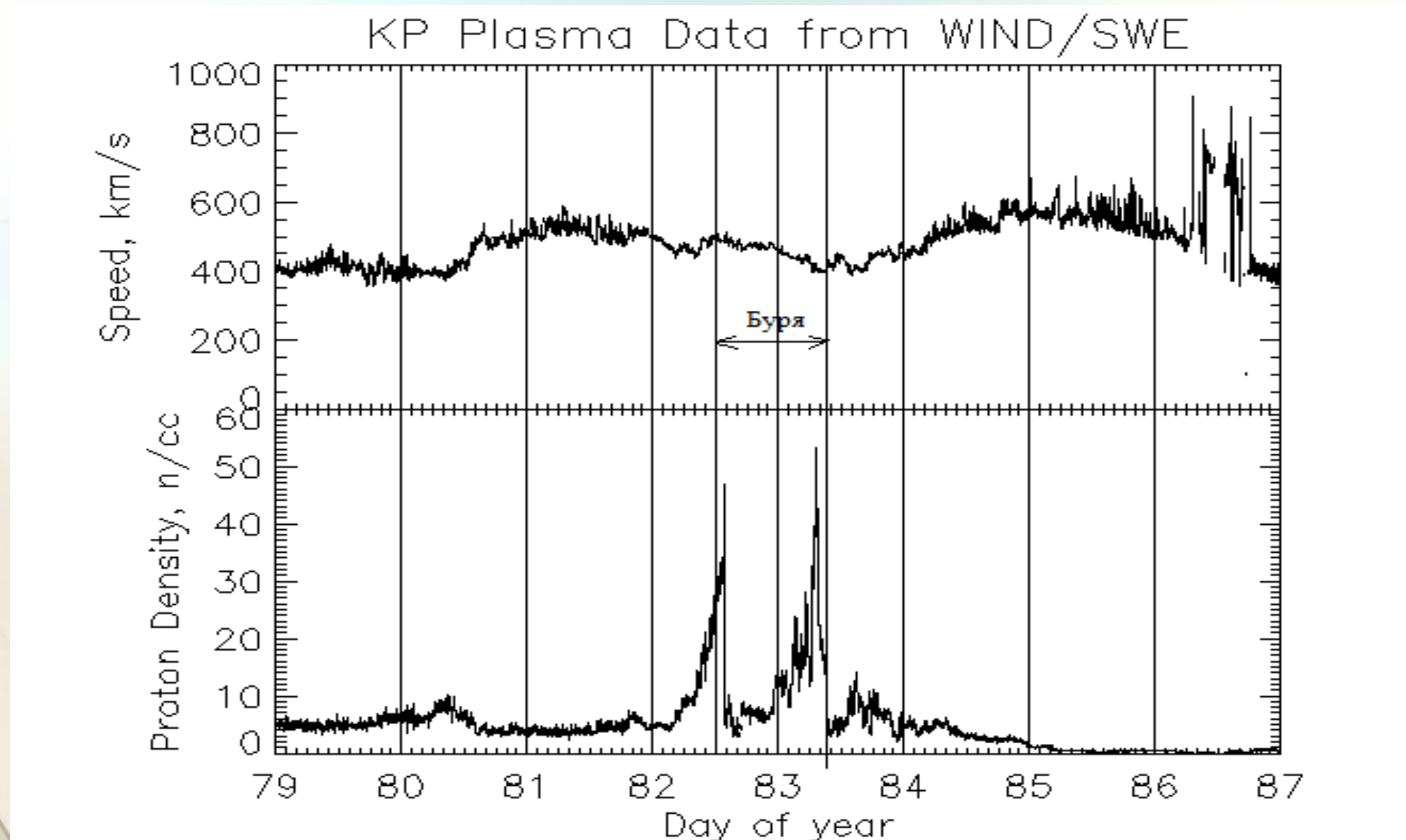
Буря 15 марта 2023 г. График скорости солнечного ветра и протонной плотности по данным WIND на интервале с 12 по 19 марта 2023 г.



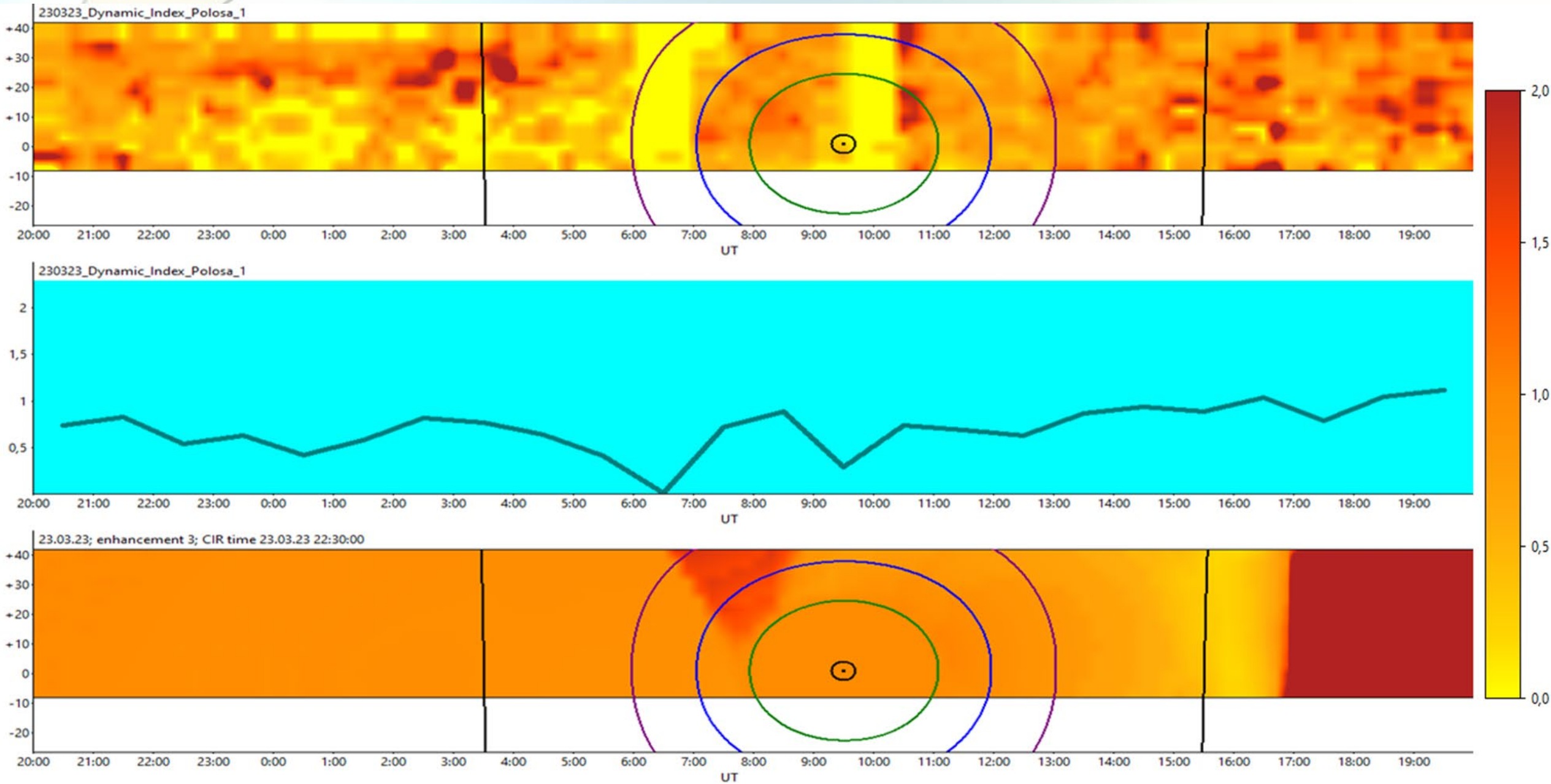
Буря 15 марта 2023 г.



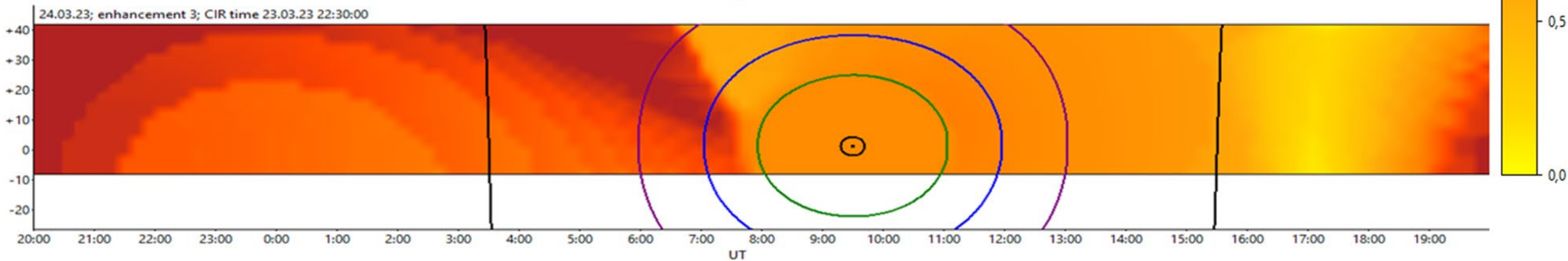
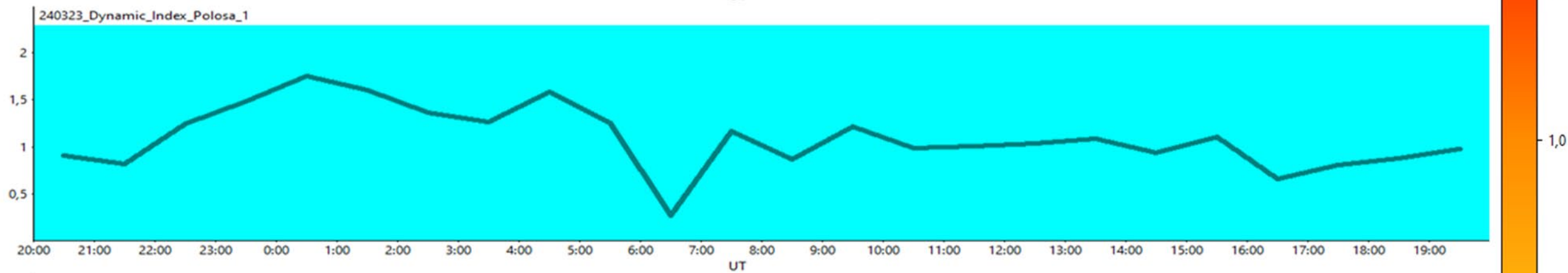
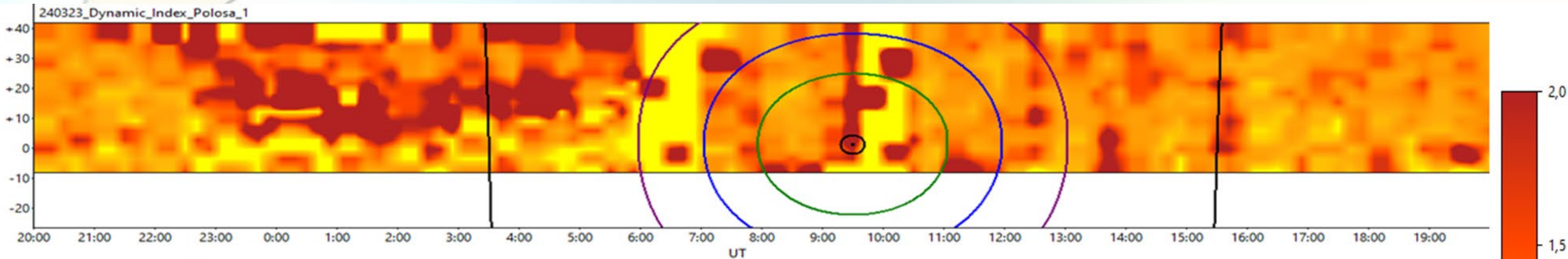
Буря 23-24 марта 2023 г. График скорости солнечного ветра и протонной плотности по данным WIND на интервале с 20 по 27 марта 2023 г.



Буря 23-24 марта 2023 г. Карты за 23 марта



Буря 23-24 марта 2023 г. Карты за 24 марта



Краткосрочный прогноз прихода CIR к Земле

Возможна следующая динамика мерцаний перед приходом CIR к Земле: начало усиления мерцаний за 2 – 3 суток до прихода CIR в районе 13 – 15 часов по московскому времени, затем начало усиления смещается в чуть более раннее время и растягивается во времени, усиление в утренней области отсутствует до прихода коротирующего возмущения;

За 2-3 суток до прихода наблюдается ослабление ночных мерцаний, связанное с пониженным абсолютным уровнем мелкомасштабной турбулентности в достаточно протяженной области перед сжатой частью CIR, что не учитывалось в модели для упрощения;

27-суточная периодичность прихода CIR к Земле.

Возможные причины несоответствия наблюдательных карт модельным

- Неизвестна точная модель межпланетной среды. Возможно, она отличается от сферически-симметричной, возможно влияние токового слоя;
- Неизвестна форма и размер возмущений, неизвестно как меняется электронная плотность внутри области возмущений;
- Модели рассматривают распространение только одиночных возмущений, игнорируя другие возмущения, взаимодействия с ними;
- Необнаружение возмущения ввиду ограниченности возможности наблюдения телескопа;
- Не учитывается торможение выброса на расстояниях от 0,5 до 1 а.е.;
- Помехи радиотелескопа.

Возможное решение

- Использование нескольких инструментов для наблюдений межпланетных мерцаний на разных географических долготах;
- Использование антенных решеток типа LOFAR/MWA, позволяющих строить часовые карты индексов мерцаний.

Также желательны данные о компоненте межпланетного магнитного поля B_z

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Исследования глобальной структуры солнечного ветра указывают на существенное отличие пространственного распределения межпланетной плазмы от сферически симметричного, в частности из данных наблюдений сделан вывод о наличии плотного приэкваториального токового слоя как в минимуме, так и в максимуме солнечной активности, причем в максимуме солнечной активности толщина слоя по полученным оценкам оказывается вдвое больше, чем в минимуме.
2. Значимая антикорреляция скорости солнечного ветра и индекса мерцаний в наблюдениях индивидуального радиоисточника проявляется при усреднении на временных промежутках порядка года, поэтому для исследования глобальной структуры солнечного ветра по данным мерцаний на более коротких временных интервалах необходимы одновременные наблюдения большого числа компактных радиоисточников.
3. Предложена простая кинематическая модель распространения СМЕ в межпланетном пространстве. Обоснована возможность использования данной модели и двумерных динамических карт распределения уровня мерцаний для оценки времени прихода возмущения к Земле за 15 – 20 ч.
4. Предложена простая кинематическая модель крупномасштабных возмущений типа CIR. Качественно определены признаки, по которым возможно обнаружить CIR в данных наблюдений межпланетных мерцаний до его прихода к Земле вместе с ослаблением ночных мерцаний за 2 – 3 суток до прихода, а также 27-суточной периодичностью прихода.

Статьи в журналах из перечня ВАК:

1. Chashei I. V., Lukmanov V. R., Tyulbachev S. A., Tokumaru M. Comparison of Solar Wind Speed Estimates from Nearly Simultaneous IPS Observations at 327 and 111 MHz. // Solar Physics. – 2021. – V. 296. – Article 63. – 14P.
2. Chashei I. V., Tyulbachev S. A., Lukmanov V. R., Subaev I. A. ICMEs and CIRs monitored in IPS data at a frequency of 111 MHz. // Advances in Space Research. – 2022. – DOI: 10.1016/j.asr.2022.05.050.
3. Лукманов В. Р., Чашей И. В. Вариации радиальной зависимости уровня межпланетных мерцаний на фазе спада 24 цикла солнечной активности. // Астрономический журнал. – 2022. – Т. 99. – С. 160 – 164.
Lukmanov V. R., Chashei I. V. Variations in the Radial Dependence of the Interplanetary Scintillation Level in the Descending Phase of Solar Cycle 24. // Astronomy Reports. – 2022. – V. 66. – P. 174 – 178.
4. Лукманов В. Р., Тюльбашев С. А., Чашей И. В. О возможности краткосрочного прогноза геомагнитных возмущений на примере выброса корональной массы в ноябре 2021 г. // Ученые Записки Физического Факультета Московского Университета. – 2022. - № 4. – 2240201. – С. 1 – 5.
5. Лукманов В. Р., Чашей И. В., Тюльбашев С. А. О корреляции уровня межпланетных мерцаний и скорости солнечного ветра. // Астрономический журнал. – 2022. – Т. 99. – С. 1280 – 1283.
Lukmanov V. R., Chashei I. V., Tyulbashev S. A. On Correlation of the Interplanetary Scintillation Level and Solar Wind Speed. // Astronomy Reports. – 2022. – V. 66. – P. 1325 – 1328.
6. Лукманов В. Р., Чашей И. В., Тюльбашев С. А., Субаев И. А. Анализ возможностей краткосрочного прогноза геомагнитных возмущений по наблюдениям корональных выбросов массы на радиотелескопе БСА ФИАН. // Астрономический журнал. – 2023. – Т. 100. – С. 535 – 545.
Lukmanov V. R., Chashei I. V., Tyulbashev S. A., Subaev I. A. Analysis of the Possibilities of Short-Term Prediction of Geomagnetic Perturbations from Observations of Coronal Mass Ejections at the BSA LPI Radio Telescope. // Astronomy Reports. – 2023. – V. 67. – P. 607 – 617.
7. Лукманов В. Р., Чашей И. В., Тюльбашев С. А. Выбросы корональной массы и магнитная буря 27 февраля 2023 года по наблюдениям межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН. // Краткие сообщения по физике. – 2023. – Т. 50. - № 7. – С. 3 – 12.
Lukmanov V. R., Chashei I. V., Tyulbashev S. A. Coronal Mass Ejections and the Magnetic Storm on February 27, 2023 from Interplanetary Scintillation Observations with the BSA LPI Radio Telescope. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2023. – V. 50. – P. 259 – 265.
8. Лукманов В. Р., Чашей И. В., Тюльбашев С. А., Субаев И. А. Короткие возмущения солнечного ветра в данных мониторинга межпланетных мерцаний: моделирование и наблюдения. // Астрономический журнал. – 2023. – Т. 100. – С. 546 – 556.
Lukmanov V. R., Chashei I. V., Tyulbashev S. A., Subaev I. A. Corotating Disturbances of the Solar Wind in the Monitoring Data of Interplanetary Scintillations: Simulation and Observation. // Astronomy Reports. – 2023. – V. 67. – P. 618 – 628.

Аппробация работы

1. XVI ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 2021).
2. XXVIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2021» (Москва, 2021).
3. Всероссийская астрономическая конференция «ВАК – 2021» (Москва, 2021).
4. Всероссийская астрономическая конференция с международным участием "Магнетизм и активность Солнца и звезд - 2021" (Крым-2021).
5. XVII ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 2022).
6. XXIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2022» (Москва, 2022).
7. Всероссийская астрономическая конференция "Магнетизм и активность Солнца – 2022" (Крым-2022).
8. XVIII ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 2023).
9. Семинар ПРАО 14 марта 2023 г. (Пушино, 2023).
10. Симпозиум «Прогноз – 2023» (Троицк, 2023).
11. I конференция им. М. И. Панасюка «Проблемы космофизики» (Дубна, 2023).
12. XXIV межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б. С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (Москва, 2023).

Спасибо за внимание

Ответы на замечания ведущей организации (ИЗМИРАН)

1. Вторая глава диссертации основывается на анализе данных двух мерцающих радиоисточников, описание которых (или хотя бы ссылка на соответствующий каталог) отсутствует в тексте диссертации.

➤ *На самом деле на стр. 46 диссертации дана ссылка [174] на каталог, содержащий 812 источников в виде таблицы, включая 2 упомянутых источника ЗС48 и ЗС298. Возможно, стоило эту ссылку вставить на странице 40 в начале 2 главы при первом упоминании этих источников.*

2. Один из значимых результатов настоящей работы – оценка среднегодовых скоростей СВ, приведенный во второй главе, однако, к сожалению, полученные величины не были сравнены с аналогичными значениями, полученными напрямую со спутников-мониторов СВ (ACE, WIND и пр.).

➤ *Согласен. Однако, мерцания и локальные измерения дают информацию о разных областях солнечного ветра: мерцания – вблизи прицельной точки на луче зрения, локальные измерения – вблизи орбиты Земли.*

3. В диссертации обсуждаются негативные эффекты прихода межпланетных СМЕ или CIR к Земле, в частности, вызываемые ими магнитные бури и их последствия, однако не приведены ссылки на литературу, описывающие эти эффекты (стр. 9). Также в диссертации отсутствуют ссылки на используемые автором индексы геомагнитной активности (см., например, стр. 14).

➤ *Согласен. На стр. 65 диссертации дана ссылка [189], содержащая информацию о Кр-индексах, начиная с 1932 года.*

4. На рис. 1 и 4 диссертации отсутствуют оси и не указаны единицы измерения.

➤ *Согласен*

Ответы на замечания ведущей организации

5. На стр. 42 и 50 имеются упоминания о том, что в процессе работы часть точек была отбракована по среднеквадратичному отклонению, но не указано, сколь большая эта часть и могла ли она повлиять на итоговые результаты анализа.

➤ *Согласен. В каждый год, по памяти, было отбраковано 3-5 точек. Влиять на основные выводы они едва ли могут значительно, т.к. число этих точек сравнительно невелико. Кроме того, неясны причины этих выбросов, возможно, они связаны с влиянием помех. Во всяком случае, разумного физического объяснения сильных выбросов найдено не было, поэтому данные точки были отбракованы.*

6. При описании предложенных моделей CME и CIR в 3 и 4 главах диссертации плотность внутри этих структур задается в 3 раза большей, чем в окружающем межпланетном пространстве. Однако ни в литературном обзоре, ни с помощью статистического сравнения не обосновывается выбор именно такого значения. К тому же для случая CIR распределение плотности не может быть одинаковым и для области взаимодействия и для самого высокоскоростного потока плазмы, согласно наблюдательным данным, внутри такого потока плотность СВ, наоборот, значительно понижена.

➤ *Модели CME и CIR разрабатывались универсальными в перспективе на массовый прогноз прихода возмущений к Земле, и все параметры подбирались таким образом, чтобы модели работали для большей части случаев. В отдельных случаях модель может быть другой. Однако, описанные модели позволяют давать верный прогноз прихода геомагнитных возмущений примерно в 75% случаях.*

Ответы на замечания ведущей организации

7. В тексте диссертации содержатся незначительные опечатки, например, «чисто точек» в Таблице 1 или несогласованные окончания, например, «скорости распространения СМЕ, зарегистрированными космическими аппаратами» на с. 11.

➤ *Согласен.*

Ответы на замечания оппонента Ермолаева Ю.И.

1. Для идентификации событий типа СМЕ используются каталоги вспышек, хотя известно, что сами вспышки не всегда сопровождаются возмущениями в солнечном ветре (и автор сам об этом пишет). Было бы более корректно использовать для этих целей каталоги СМЕ полученные с помощью коронографов.

➤ *Согласен. При рассмотрении отдельного события магнитной бури 26 – 28 февраля 2023 г. после серии М-вспышек учитывались данные каталога Cactus, т.к. там имеется классификация СМЕ (гало или нет).*

2. Автор в недостаточной мере привлекает для проверки результатов прогнозов прямые измерения солнечного ветра, полученные на основе спутниковых данных. В том числе было бы полезно дополнить таблицу 3 данными по скорости солнечного ветра, измеренной на спутниках.

➤ *Согласен*

3. В качестве областей взаимодействия потоков в солнечном ветре рассматриваются только области CIR - области компрессии плазмы, образующиеся на границах высокоскоростных потоков из корональных дыр и медленного солнечного ветра, и наблюдающиеся на орбите Земли с периодичностью 27 суток. Было бы полезно рассмотреть аналогичные области компрессии плазмы на границах ICME и медленного солнечного ветра (Sheath), которые имеют близкие характеристики плазмы, в том числе характеристики турбулентных флуктуаций в них.

➤ *Согласен. Учту в дальнейшей работе*

Ответы на замечания оппонента Ермолаева Ю.И.

4. В работе обсуждаются характеристики спектра турбулентности межпланетной плазмы, но не приводятся сравнения с результатами исследований спектров турбулентности по локальным измерениям межпланетного магнитного поля и плазмы солнечного ветра, которые широко освещаются в литературе в последние годы.

➤ *Согласен. Характеристики спектра турбулентности упомянуты только во введении, сам я не их не исследовал, просто изначально было выдвинуто предположение, что индекс турбулентности $n = 3,6$.*

5. В работе имеются ряд стилистических и терминологических неточностей:

Стр. 16 присутствуют многократные повторения в тексте термина "мерцания": "по наблюдениям межпланетных **мерцаний** сильных **мерцающих** радиоисточников в зоне слабых **мерцаний** путем вписывания теоретических временных спектров **мерцаний** в спектр **мерцаний**" - многократное повторение одного и того же термина (в данном случае 5 раз в одной фразе) делают фразу плохо читаемой и не понятной.

Стр. 9 и далее по тексту используется сокращение СМЕ, тогда как речь идет о межпланетном проявлении коронального выброса массы, которое более корректно обозначить как ICME (interplanetary coronal mass ejections).

Стр. 10 - повтор «...СМЕ.... **связаны** с солнечными вспышками, **связанными** с энерговыделением в короне... ».

Стр. 62 (и далее по тексту) - вместо выражения «угол раскрыва» было бы более корректно использовать выражение «угол раскрытия».

Стр. 84 - жаргон «одногогорбые графики», «двугорбые графики».

➤ *Согласен. Приму к сведению на будущее.*

Ответ на замечание оппонента Писанко Ю.В.

С моей точки зрения диссертацию могло бы украсить привлечение к анализу данных прямых измерений параметров солнечного ветра с борта КА «Parker solar probe plus», запущенного на околосолнечную орбиту 12 августа 2018 года. Перигелий орбиты, наклонённой к плоскости эклиптики на 3.4° , за почти 7 лет существования этого КА приближается к Солнцу с 35 солнечных радиусов (после первого манёвра в гравитационном поле Венеры) до 9.5 солнечных радиусов (после седьмого манёвра в гравитационном поле Венеры). В диссертации анализируются данные о межпланетных мерцаниях с 2014 по 2023 год, так что совместный с данными КА «Parker solar probe plus» анализ напрашивается сам собой.

➤ *Согласен. Сравнение наших данных с данными Parker Solar Probe (близко к Солнцу), а также с данными Wind, ACE (вблизи орбиты Земли, отзыв ведущей организации) представляет отдельную задачу, которая может рассматриваться как предмет для будущих исследований.*

Автор выражает благодарность оппонентам и ведущей организации за полезные замечания, которые будут учтены в дальнейшей работе!