ОСОБЕННОСТИ ОТКЛИКА ИОНОСФЕРЫ НА КАННИБАЛИЗМ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

О.А. Шейнер[1], Ф.И.Выборнов[1,2]

1 НИРФИ ННГУ им.Н.И.Лобачевского, (НИРФИ ННГУ), Нижний Новгород

2 ФГБОУ ВО «ВГУВТ», Нижний Новгород

rfj@nirfi.unn.ru

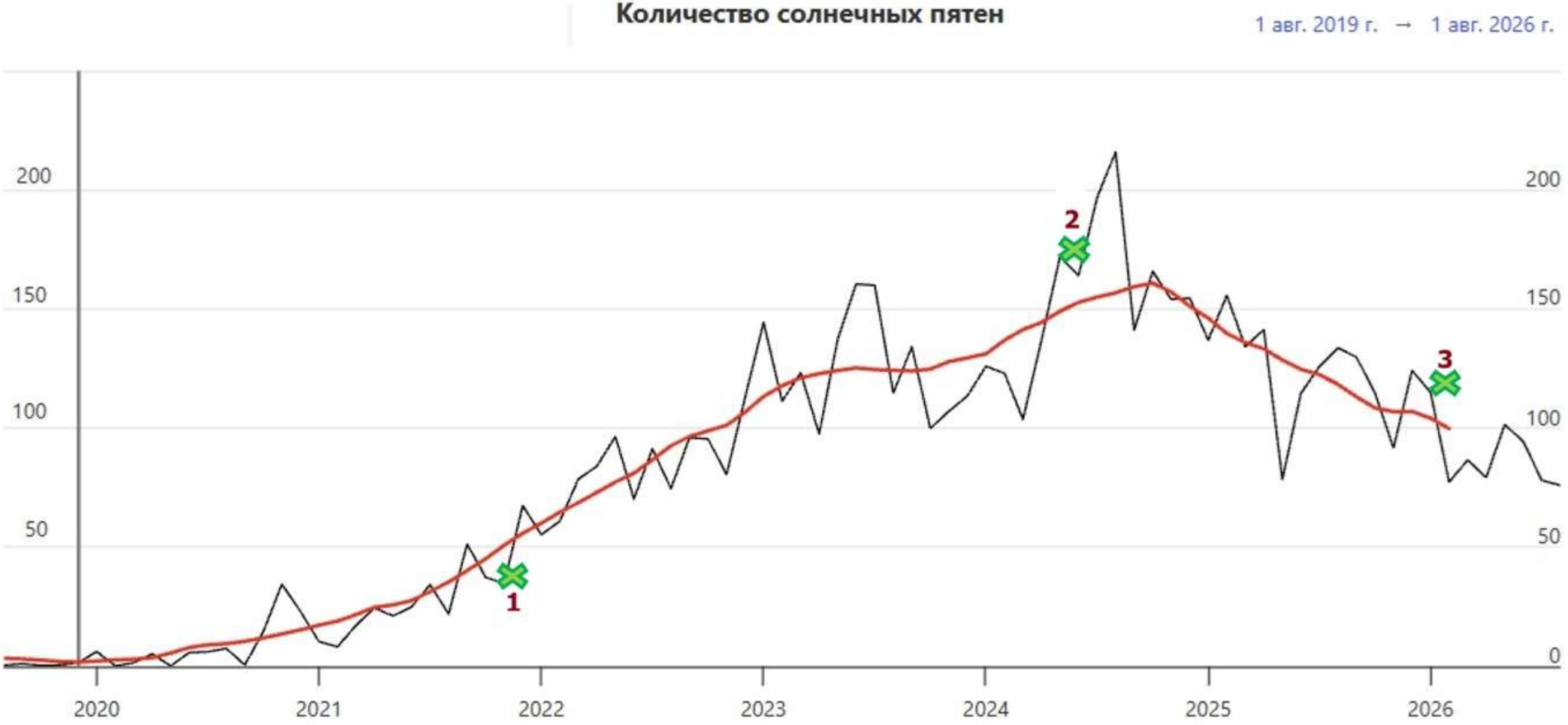
Работа выполнена по проекту FSWR 2026-0011 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Введение

Исследованиям отклика ионосферы на различные явления солнечной активности посвящено много работ. В большинстве случаев прослеживается связь между вариациями солнечного излучения, измеренными с помощью искусственных спутников, и параметрами, относящимися к верхним слоям атмосферы Земли. Влияние интенсивных солнечных вспышек на ионизацию верхней атмосферы подтверждается связью между поведением критической частоты слоя F2 ионосферы (*f*0F2) и солнечными вспышками. В то же время такие нерегулярные мощные явления солнечной активности, как корональные выбросы массы (КВМ), оказывают наибольшее влияние на характеристики ионосферы, что подтверждается предыдущими исследованиями авторов на основе наблюдений ионосферы с помощью наклонного и вертикального зондирования.

Исследование распространения корональных выбросов в межпланетном пространстве показало, что при распространении корональных выбросов в межпланетном пространстве может произойти поглощение одного КВМ другим. Речь идёт о так называемом «каннибализме» корональных выбросов массы: быстрый выброс догоняет медленный в короне или в межпланетном пространстве, их структуры сталкиваются и сливаются, образуя облако плазмы и магнитного поля («complex ejecta», cannibal CME). За все время наблюдений корональных выбросов массы на спутнике SOHO было зарегистрировано несколько таких случаев.

В данном докладе анализируется отклик ионосферы на «каннибализм» корональных выбросов массы на различных фазах 25 цикла солнечной активности (см. рисунок на следующем слайде): роста (ноябрь 2021г. - **1**), максимума (май 2024г. - **2**) и спада (январь 2026г - **3**). В качестве параметров ионосферы рассматривается поведение во времени критической частоты *f*0F2 слоя F2 ионосферы, используя предложенный нами ранее ионосферный индекс.


Количество солнечных пятен
1 авг. 2019 г. → 1 авг. 2026 г.
200
150
100
50
0
1
2
3
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026

2. Метод

Как было показано в *Sheiner, et al. Adv. Space Res. 2020*, для повышения точности предпочтительно анализировать поведение во времени величин отклонения измеренных значений частот от их средних значений по предложенной методике для исследования возмущений критической частоты ионосферного слоя F2 (D*f0*F2).

При регулярных наблюдениях регистрация ионограмм обеспечивает непрерывную временную запись критических частот в течение дня. Каждое измеренное значение отмечается как $f0_{jk}$, где j – номер точки в течение дня, k – номер дня в месяце. Девиация критических частот ионосферы рассчитывается как:

$$\Delta f0_{jk} = f0_{jk} - \overline{f0}_j, \quad \text{где}$$

$$\overline{f0_j} = \sum_{k=1}^{N} f0_{jk} / N \qquad N \text{ - количество дней в месяце}$$

Дифференциальный параметр, предлагаемый нами для исследования данных вертикального зондирования ионосферы, позволяет повысить чувствительность и устранить стационарные зависимости (например, исключить суточное поведение), а используемая цветовая гамма – продемонстрировать чувствительность определения девиации Δf_0 в зависимости от времени суток и дня месяца.

3. Данные

Для изучения отклика ионосферы на нерегулярные мощные явления солнечной активности корональные выбросы массы мы используем данные о регистрации корональных выбросов массы со спутника SOHO (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

Информация о геомагнитных индексах Dst и Kp доступна на сайтах WDC for Geomagnetism, Kyoto и Helmholtz Zentrum, Potsdam.

В качестве параметров ионосферы в ***ноябре 2021г***. используются данные вертикального зондирования ионосферы (критическая частота ионосферного слоя F2 (*f*0F2, в МГц)) , полученные из регулярных наблюдений в среднеширотной ионосферной и радиоастрономической обсерватории НИРФИ ННГУ «Васильсурск» (56.15° с.ш., 46.10° в.д., близ Нижнего Новгорода). Регулярные наблюдения в среднеширотной ионосферной и радиоастрономической обсерватории НИРФИ ННГУ «Васильсурск» проводились на усовершенствованном цифровом ионозонде в пятнадцатиминутном режиме зондирования ионосферы в диапазоне частот от 1 до 12 МГц.

В исследовании событий ***мая 2024г***. использованы данные вертикального зондирования ионосферы нескольких ионосферных станций. Координаты пунктов наблюдений за ионосферой приведены в Таблице, расположение схематично показано на следующем слайде.

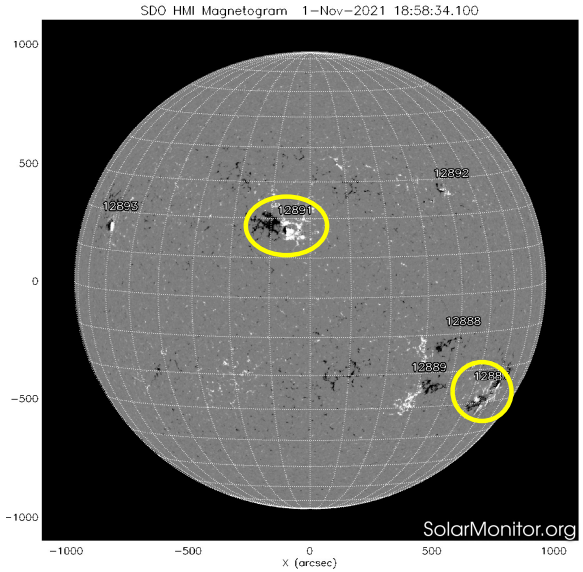
Данные Tromso, Juliusruh, Pruhonice, Sopron и Athens (в пятиминутном режиме зондирования) получены из базы данных Digital Ionogram Data Base (DIDBase). Регулярные наблюдения в среднеширотной ионосферной и радиоастрономической обсерватории НИРФИ ННГУ «Васильсурск» проводились в аналогичном наблюдениям 2021г. режиме.

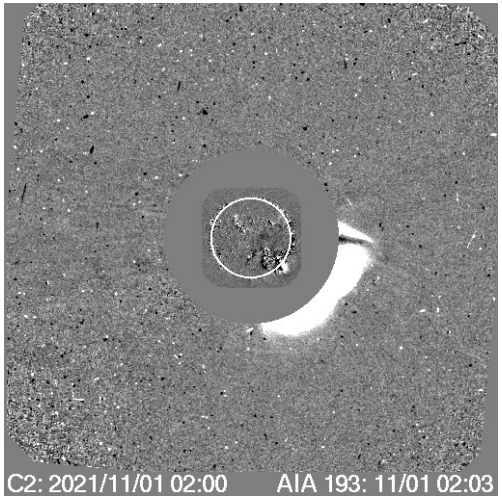


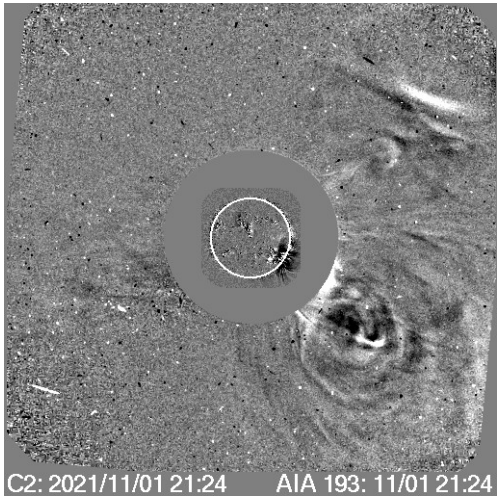
Ионозонд	Координаты
TROMSO	69.60N, 19.20E
VASILSURSK	56.15N, 46.10E
JULIUSRUH	54.60N, 13.40E
PRUHONICE	50.00N, 14.60E
SOPRON	47.60N 16.70E
ATHENS	38.00N 23.50E

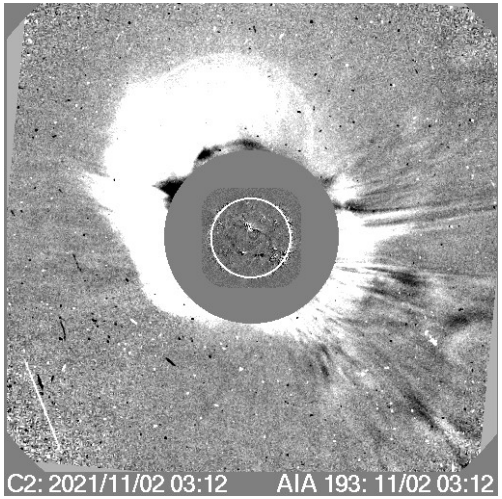
При анализе событий ***января 2026г***. использованы данные вертикального зондирования ионосферы станции Juliusruh в пятиминутном режиме зондирования ионосферы и Васильсурск в пятнадцатиминутном режиме зондирования. Данные наклонного зондирования на Трассе Кипр – Нижний Новгород регистрировались от 8 до 30 МГц раз в 15 минут при скорости перестройки частоты 100 кГц/с.

4. НОЯБРЬ 2021г.







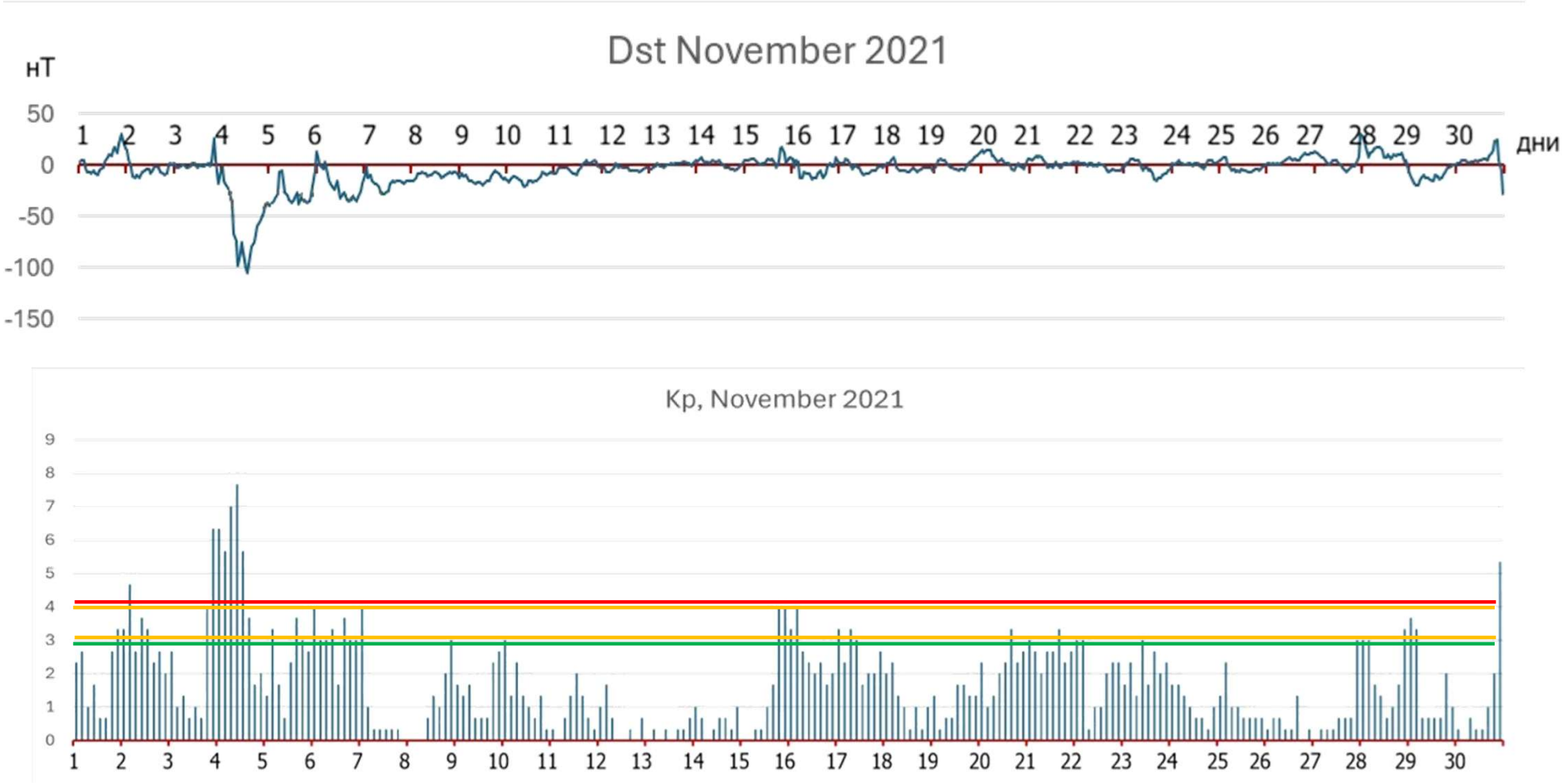


Активные области AR2887 и AR2891 стали источниками трех КВМ 1–2 ноября 2021 г.

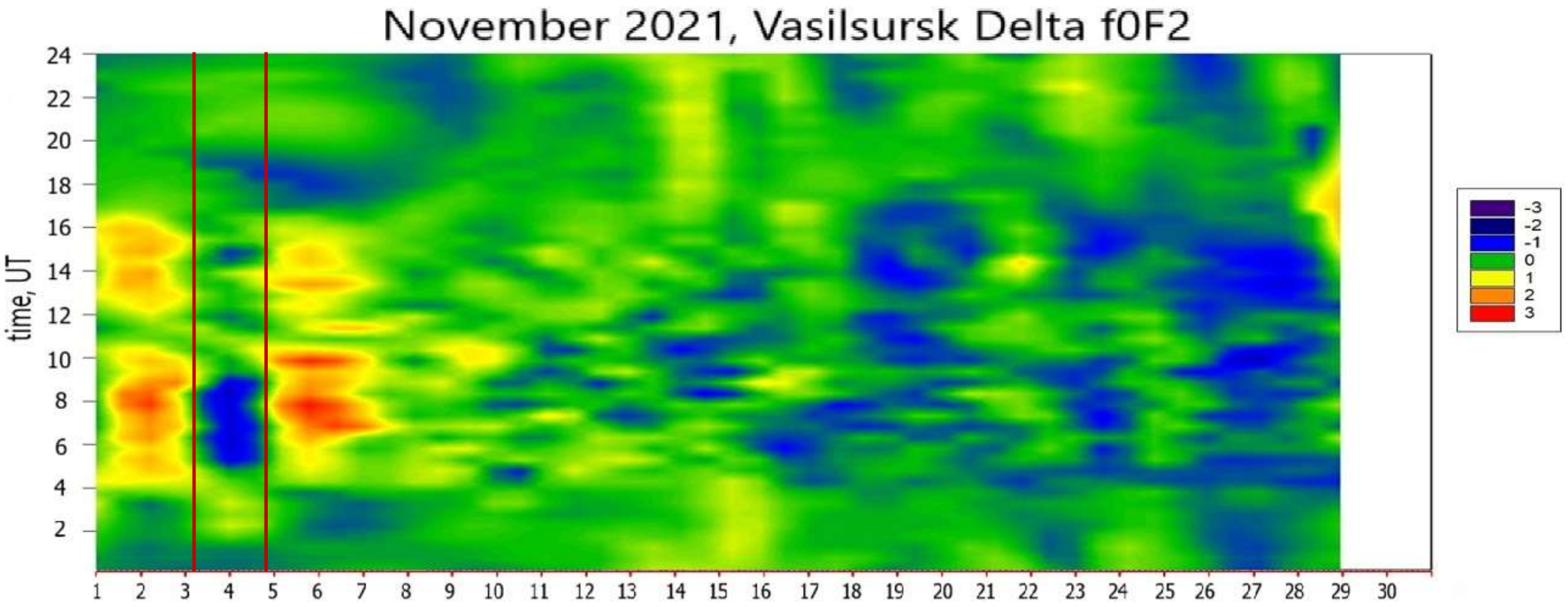
Более быстрый выброс 2 ноября (02:48 UT) догнал и частично поглотил два предыдущих 1 ноября (02:00 и 21:24 UT), сформировав крупную объединённую структуру, направленную к Земле.

First C2 Appearance Date Time [UT]		Central PA [deg]	Angular Width [deg]	Linear Speed [km/s]	2nd-order Speed at final height [km/s]	2nd-order Speed at 20 Rs [km/s]	Accel [m/s^2]	Mass [gram]	Kinetic Energy [erg]	MPA [deg]	Movies, plots, & links	Remarks
2021/11/01	02:00:06	201	274	753	657	691	-10.2	7.4e+15*2	2.1e+31*2	231	C2 C3 PHTX DST Java Movie	Partial Halo
2021/11/01	21:24:05	246	162	830	766	805	-5.9	9.7e+15*2	3.3e+31*2	263	C2 C3 PHTX DST Java Movie	Partial Halo
2021/11/02	02:48:05	Halo	360	1473	1302	1397	-31.1	6.1e+15*2	6.6e+31*2	28	C2 C3 PHTX DST Java Movie	

Объединённый КВМ пришёл 3–4 ноября и вызвал геомагнитный шторм уровня G3, с заметными возмущениями энергосистем и ориентации спутников, а также с расширением зоны полярных сияний до средних широт (США, Канада, Северная Европа). Возмущения отображены на временном поведении индексов DST и Кр ниже.



Данные вертикального зондирования ионосферы на станции Васильсурск представлены в виде частотно-временной диаграммы.

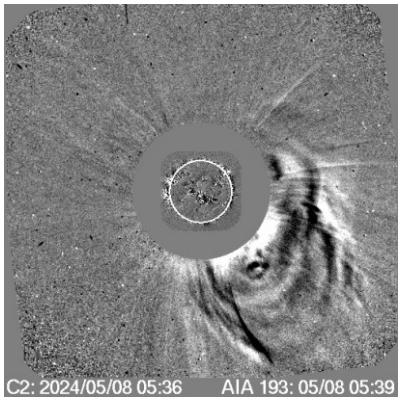


Вертикальными линиями обозначен интервал регистрации объединенного КВМ и отклика ионосферы на него. Возмущения в ионосфере проявляются в виде резкого уменьшения величины $\Delta f0$F2.

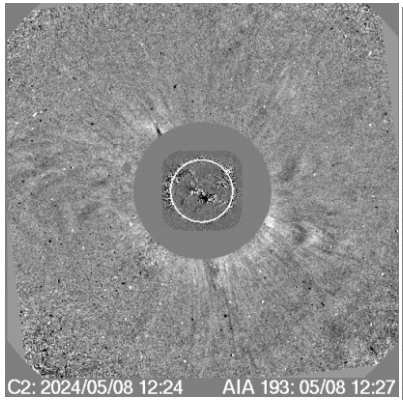
Уровень уменьшения $\Delta f0$F2 небольшой, наименьшая величина -1.57 МГц.

5. МАЙ 2024г.

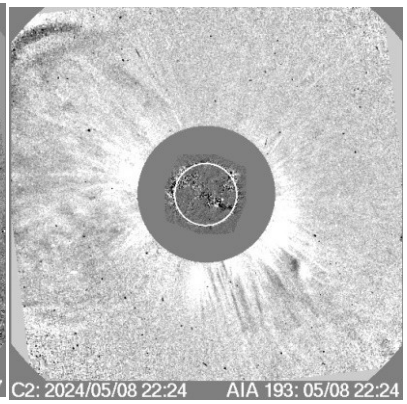
Редкий «каннибалистический» шторм наблюдался 08-11.05 2024. В данном случае зарегистрировано несколько КВМ, которые взаимодействуют группами.



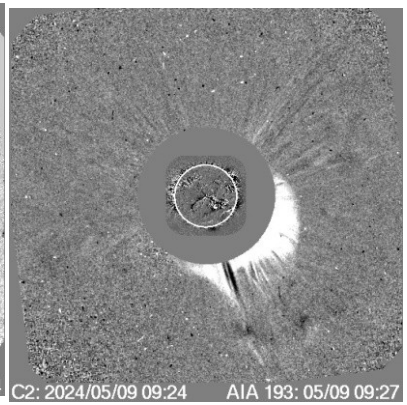
V1= 530 км/с



V2= 677 км/с

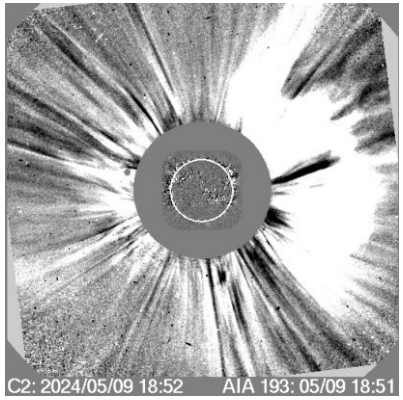


V3= 952 км/с

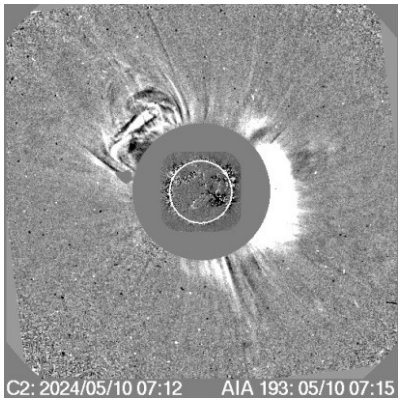


V4= 12801 км/с

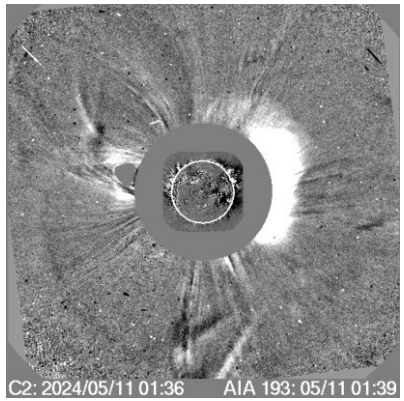
Сначала первые четыре корональных выброса массы типа гало (*08.V.2024 в 05.36 UT; 08.V.2024 в 12.24 UT; 08.V.2024 в 22.24 UT и 09.V.2024 в 05.36 UT*) накапливаются, взаимодействуют друг с другом по мере приближения к Земле и образуют первый сложный выброс.



V1=1024 км/с



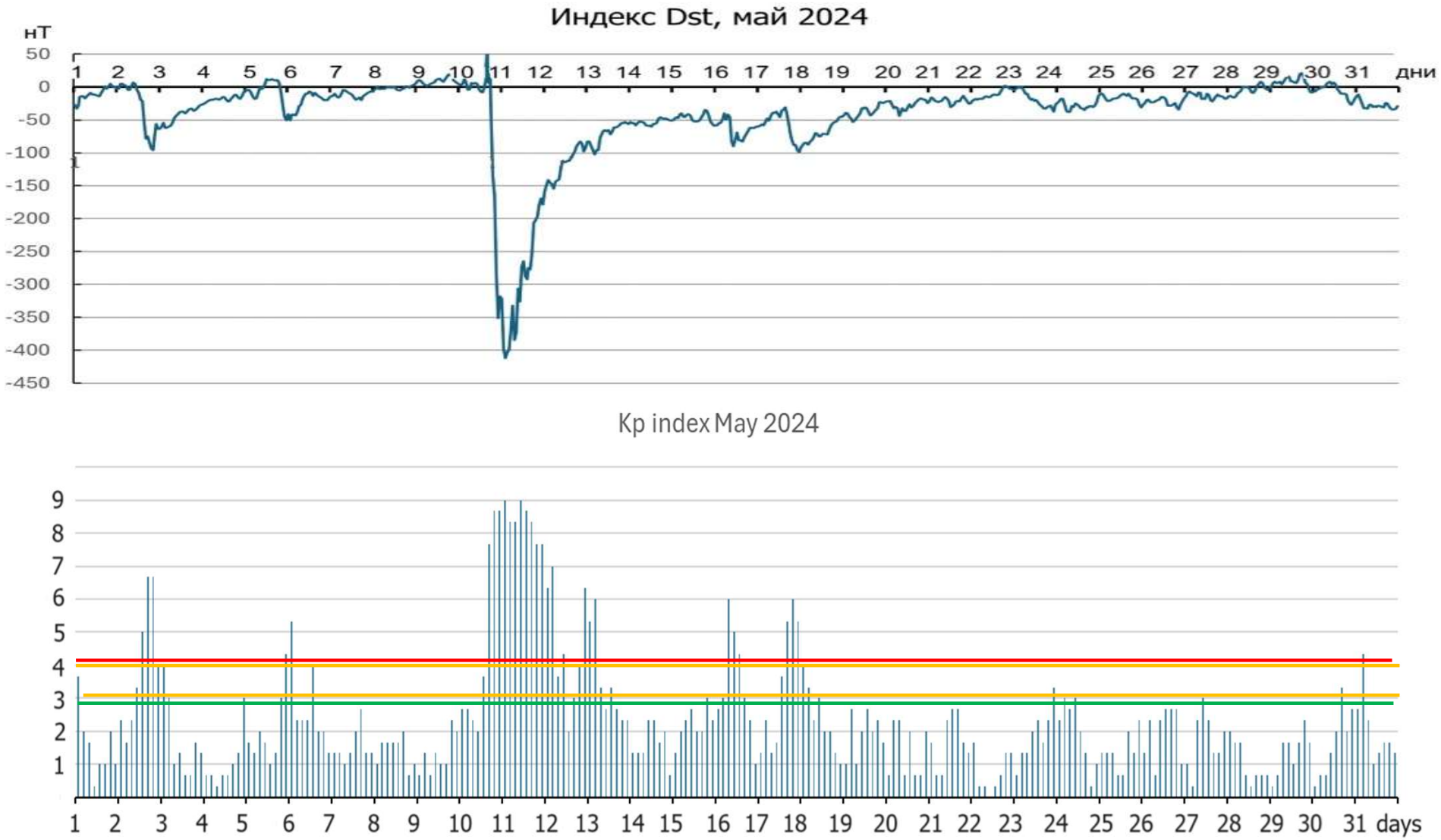
V2= 953 км/с



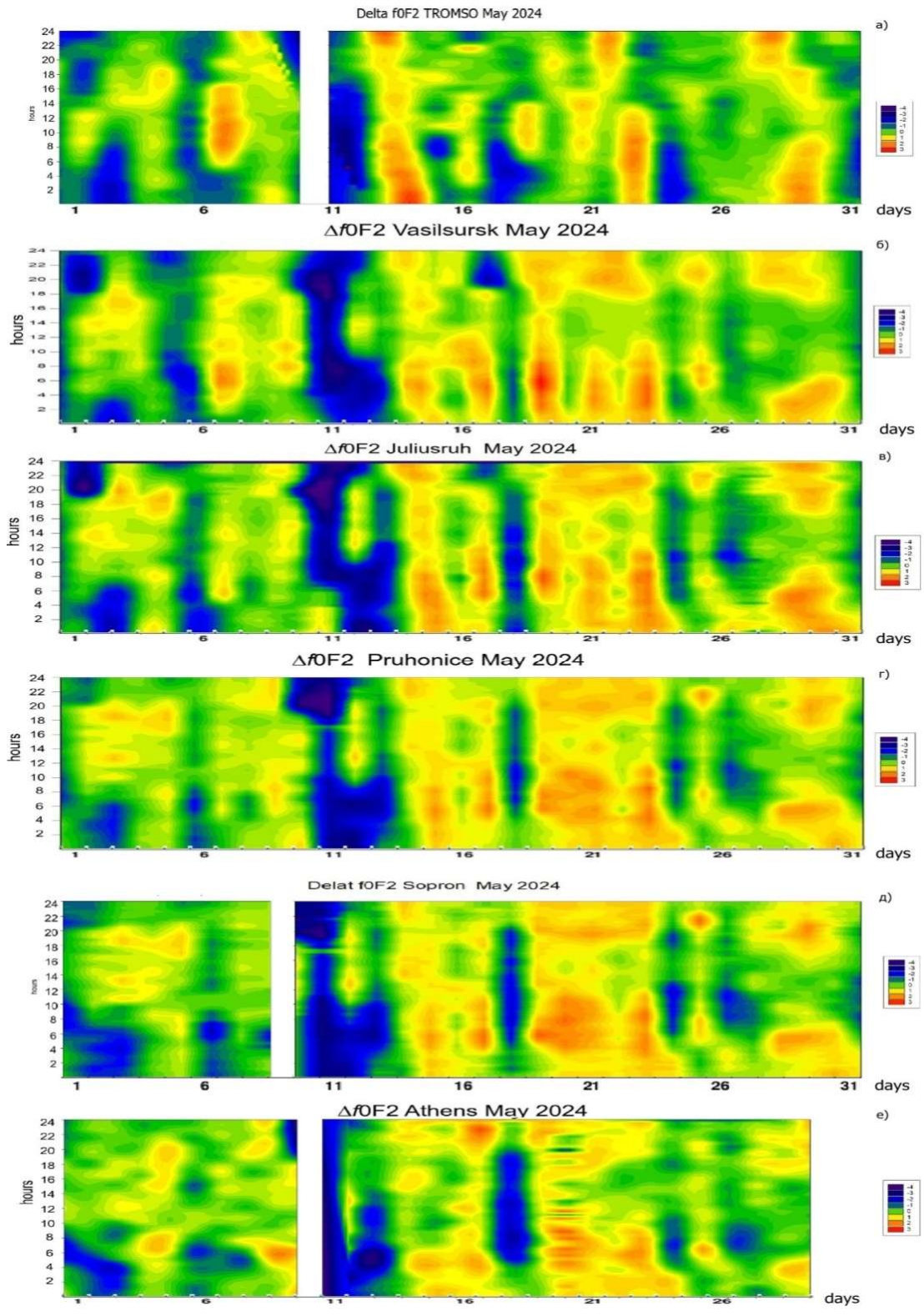
V3= 1614 км/с

Потом формируется и следующий сложный выброс от слияния следующих трех корональных выбросов массы типа гало (*09.V.2024 в 18.52 UT, 10.V.2024 в 07.12 UT и 11.V.2024 в 01.36 UT*).

Из-за быстрой последовательности и различных скоростей запусков корональных выбросов массы, несколько корональных выбросов массы слились и взаимодействовали, проходя через межпланетную среду.



Взаимодействие корональных выбросов привело к сильному геомагнитному отклику, показанному на графиках временного поведения DST и Кр.

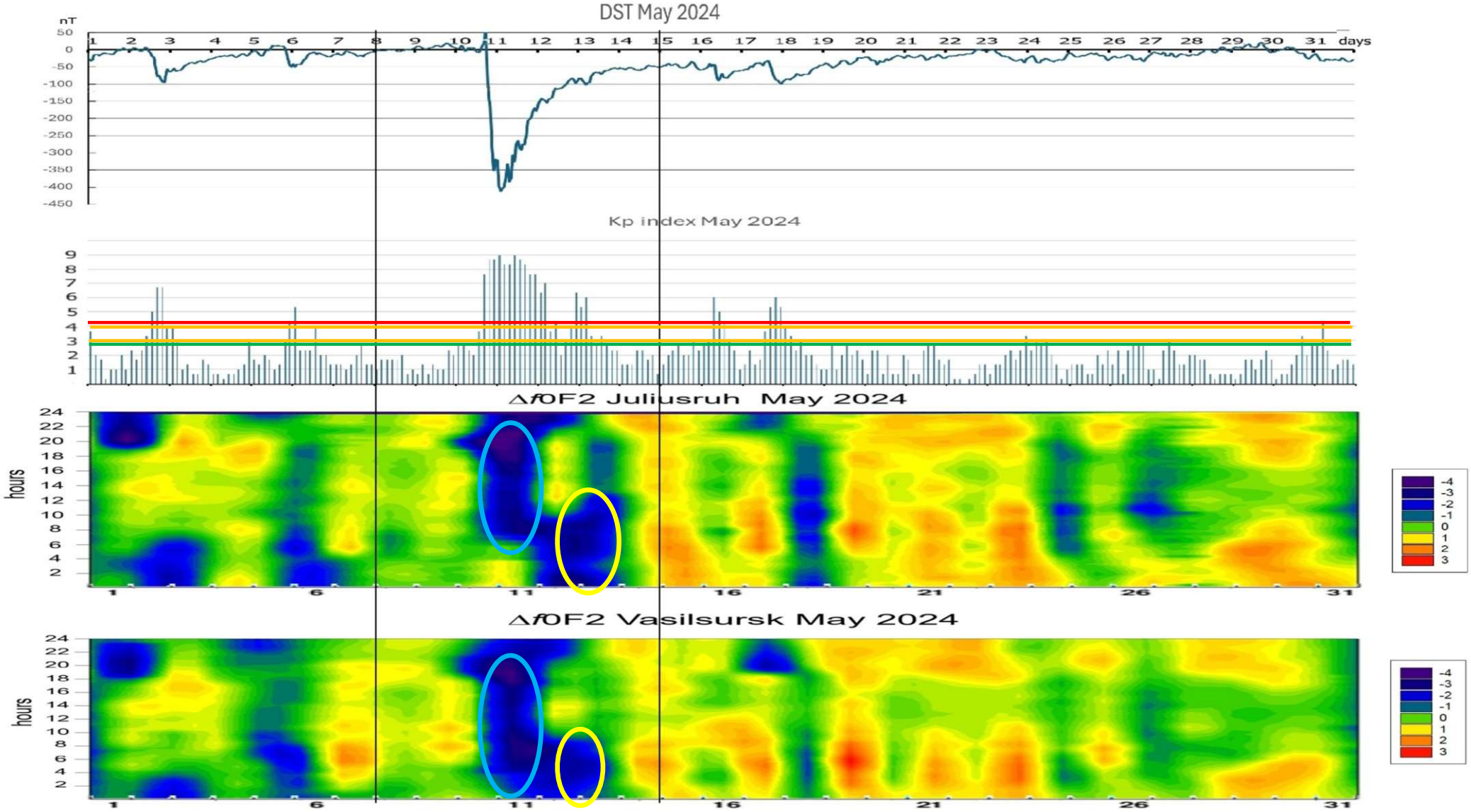


	LAT	LONG
TROMSO	69.60	19.20
VASILSURSK	56.15	46.10
JULIUSRUH	54.60	13.40
PRUHONICE	50.00	14.60
SOPRON	47.63	16.72
ATHENS	38.00	23.50

Анализ данных вертикального зондирования ионосферы, полученных на станциях, приведенных в таблице, показывает: самые большие изменения в ионосфере наблюдаются как реакция на объединенную из двух сложных выбросов крупную структуру на всех станциях практически одновременно.

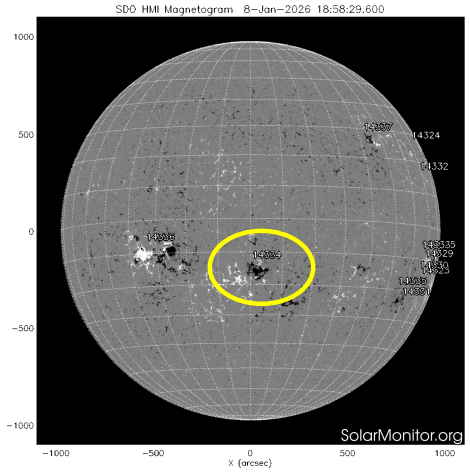
Значительные уменьшения девиации критических частот (от -4.35 до -5.21 МГц на разных станциях) наблюдались, начиная с 10 мая вплоть до 13 мая, на всех используемых станциях.

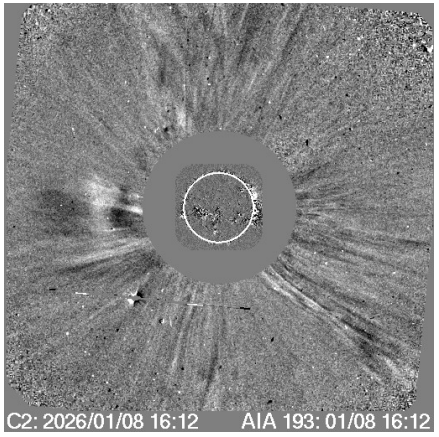
Заметим. Каждый из сложных выбросов может быть рассмотрен, как пример каннибализма более мелких КВМ. Причем, отклик в ионосфере на каждый из сложных выбросов также хорошо прослеживается. Для примера ниже приведено сопоставление результатов обработки данных обсерваторий Vasilsursk и Juliusruh, отклики каждой группы выбросов КВМ обозначены овалами разных цветов.

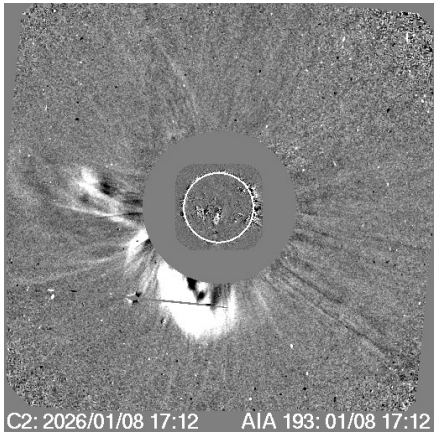


Уровень уменьшения $\Delta f0F2$ значительный: до -4.83 МГц в Juliusruh и до -4.7 МГц в Vasilsursk.

6. ЯНВАРЬ 2026г.





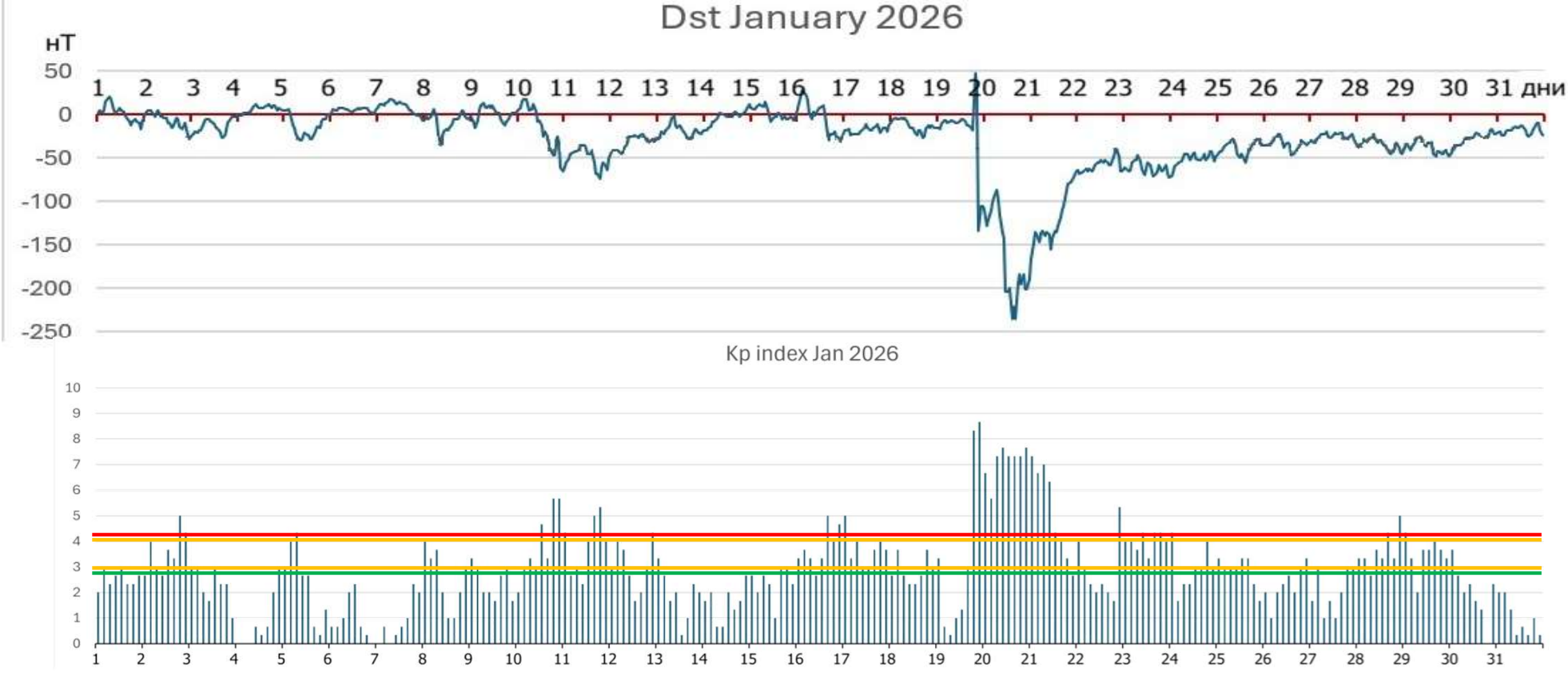


8 января 2026 г. корональный выброс типа частичное гало (зарегистрирован на коронографе в 17:00 UT) от вспышки C5.6 в AR 4334 объединился на пути к Земле с предыдущим КВМ, идущим из-за лимба(зарегистрирован в 15:48 UT).

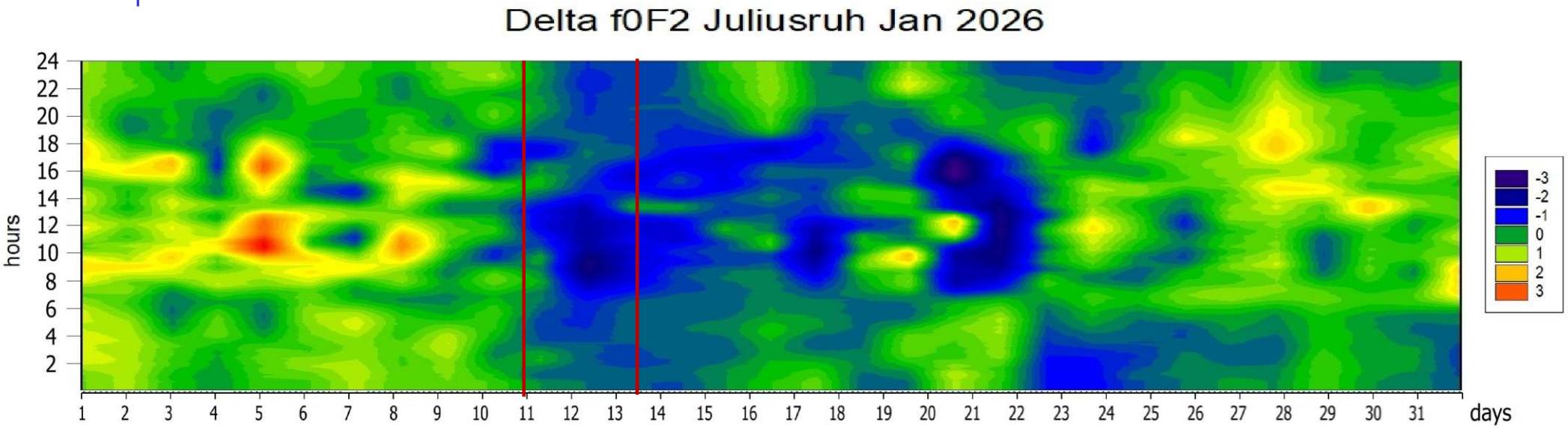
V1= 487 км/с

V2= 842 км/с

10 января 2026г. в ~20:30 UT удар объединенного коронального выброса по магнитосфере Земли вызвал умеренную геомагнитную бурю с сильными полярными сияниями.



Ниже приведена частотно-временная диаграмма данных вертикального зондирования ионосферы на станции Juliusruh.



Объединенный корональный выброс вызвал отрицательные изменения критических частот в ионосфере (до -2.7 МГц) незначительно отличаясь уровнем и распределением в течение суток..

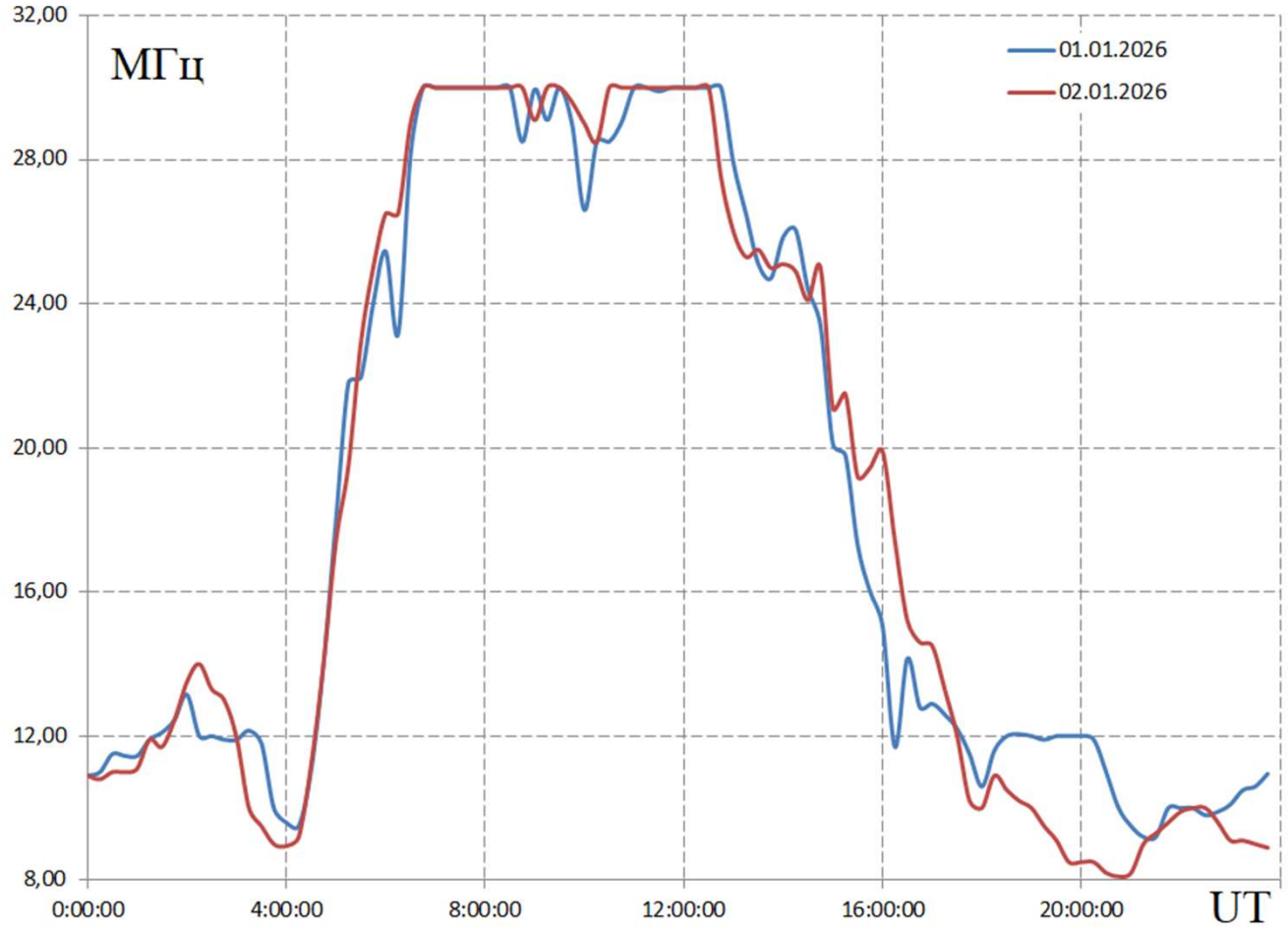
Вертикальными линиями обозначен интервал регистрации объединенного КВМ и отклика ионосферы на него.

Заметим. На частотно-временной диаграмме наблюдаются существенные понижения девиации критической частоты F2 слоя ионосферы до -3.6 МГц на интервале 20-23 января 2026г.

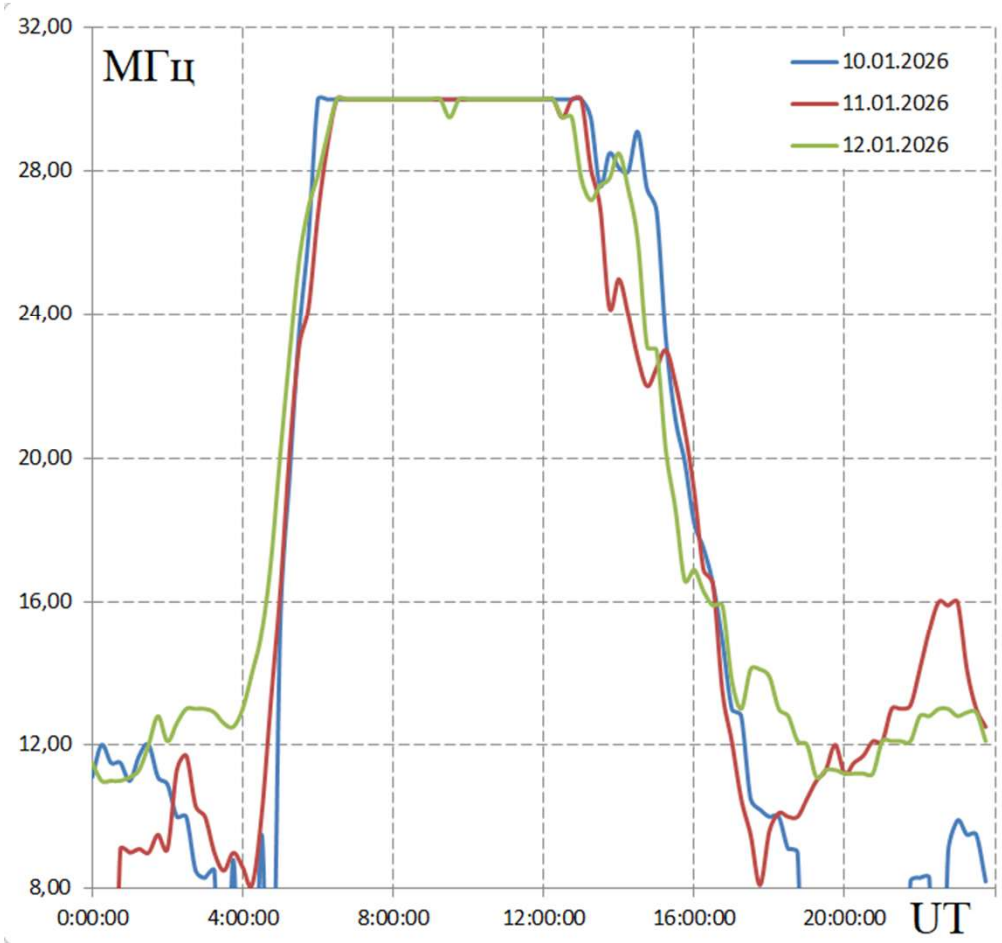
Эти изменения – следствие другого значимого события, но в доступных источниках оно не описывается как каннибалистическое.

18 января 2026. Вспышка X1.9 с быстрой гало-CME (~2000 км/с), вызвавшая геомагнитную бурю G4 и радиационную бурю, сильнейшую с 2003 года.

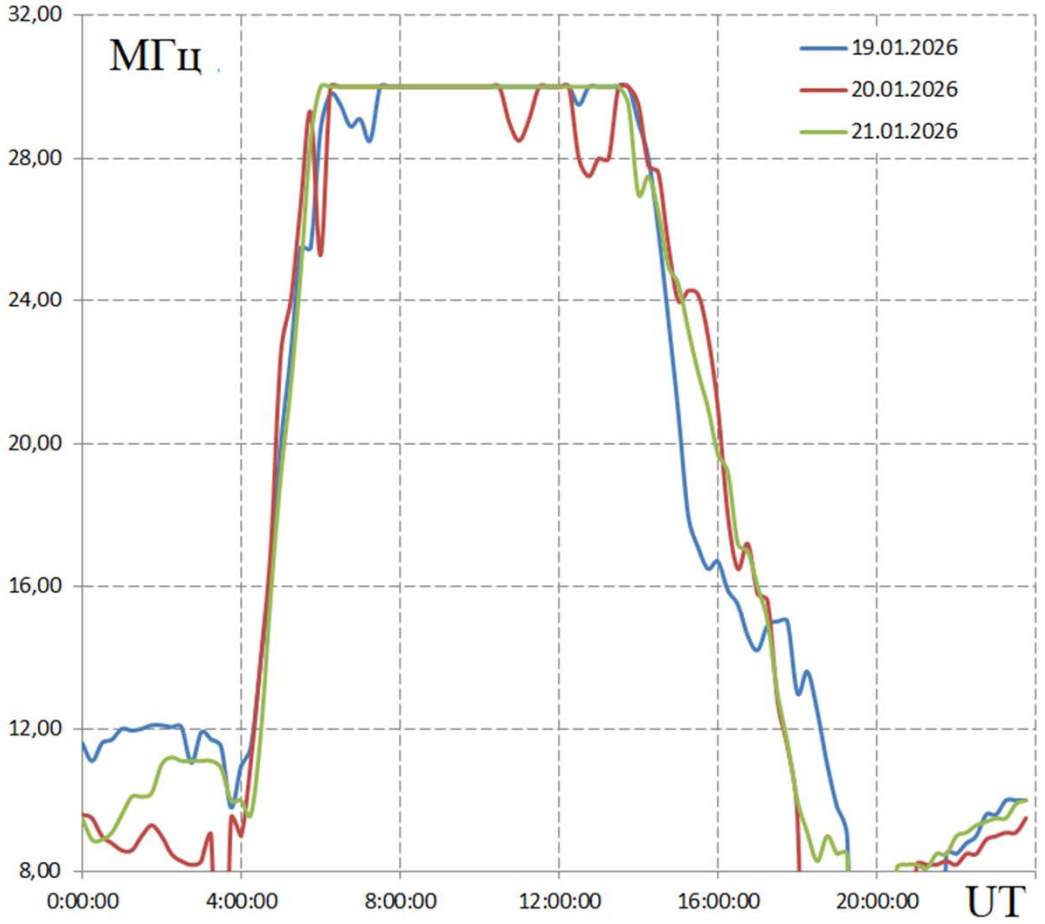
В январе 2026 г. нами в Нижнем Новгороде проводился прием ЛЧМ сигналов передатчиков, расположенных на Кипре. Ниже на рисунках приводятся графики максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) F-слоя ионосферы для односкачковой трассы от времени для 1-2 , 11-13 и 20-22 января 2026 г., когда наблюдалась существенно различная геомагнитная активность (см. слайд 14). Сигнал принимался в диапазоне от 8 до 30 МГц раз в 15 минут. Область односкачкового отражения находилась над г. Ростов-на-Дону. В дневное время наблюдались отражения на частотах, превышающих рабочий диапазон частот нашей приемной ЛЧМ станции (т.е. более 30 МГц).



Заметим, что стандартные ЛЧМ-станции (как правило) имеют диапазон рабочих частот 1-30 МГц, что явно недостаточно для проведения измерений, особенно в зимний период. Нами давно предлагается расширить рабочий диапазон ЛЧМ станций до 60 МГц!



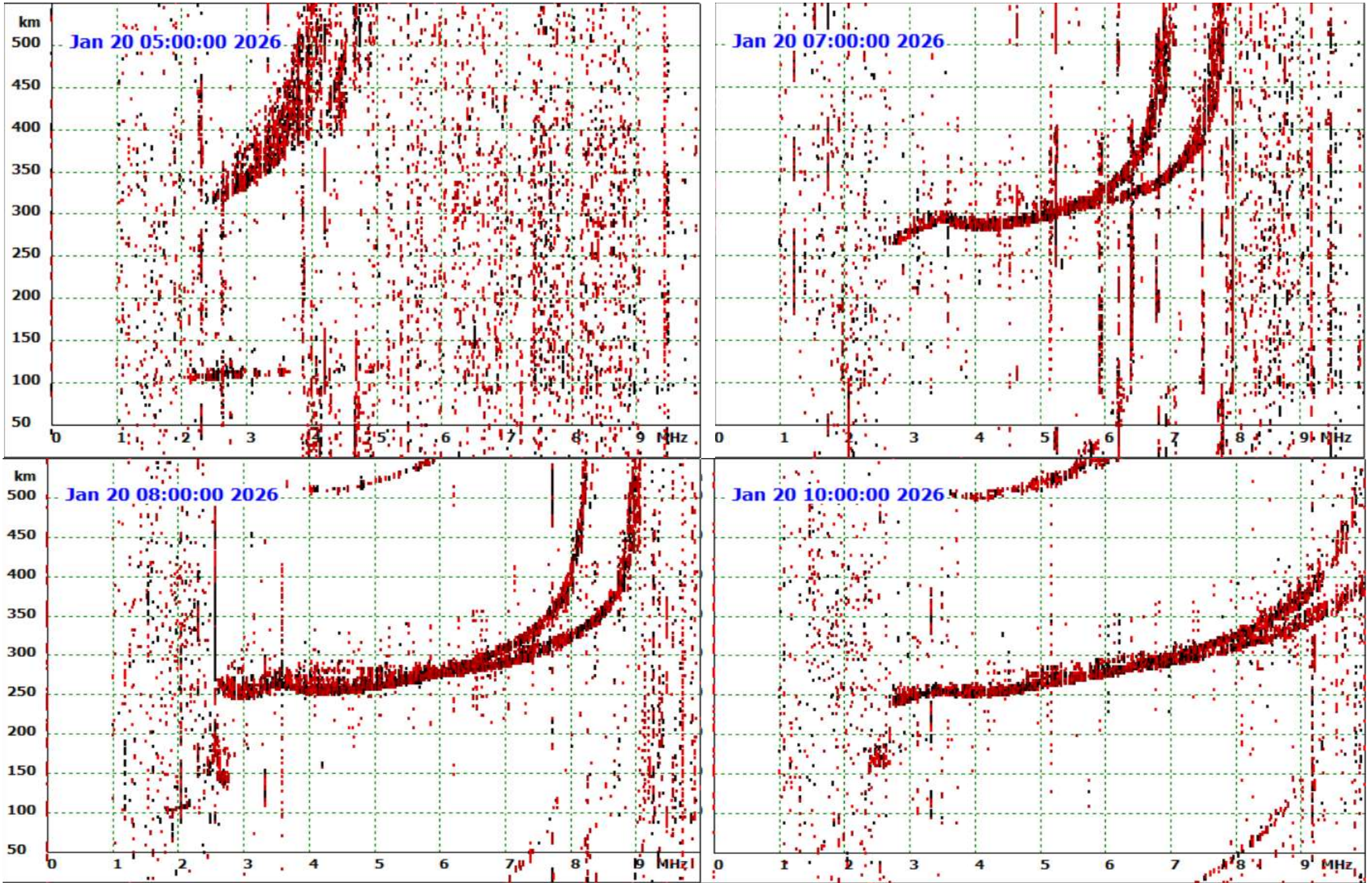
10-12 января 2026 г.

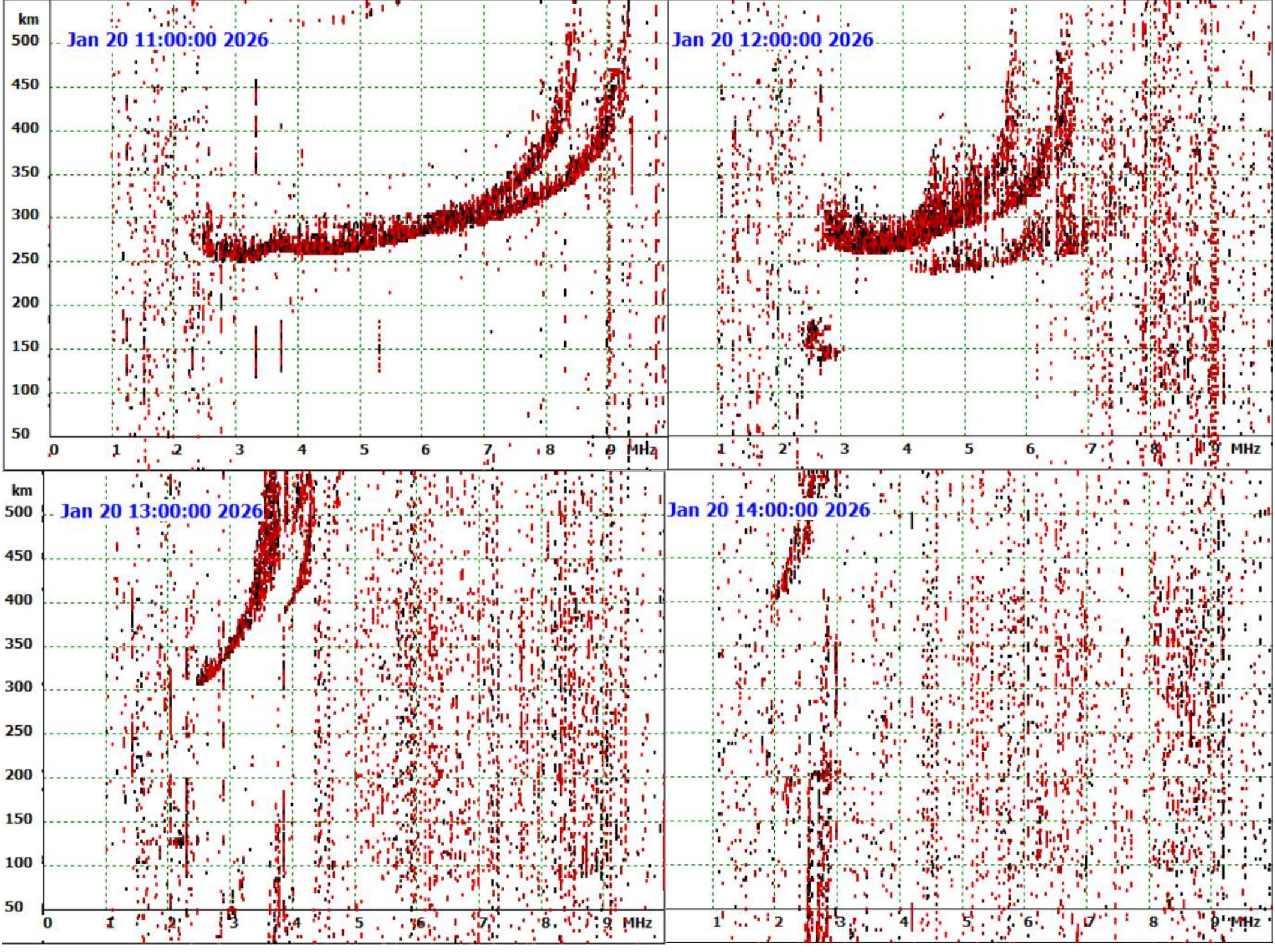


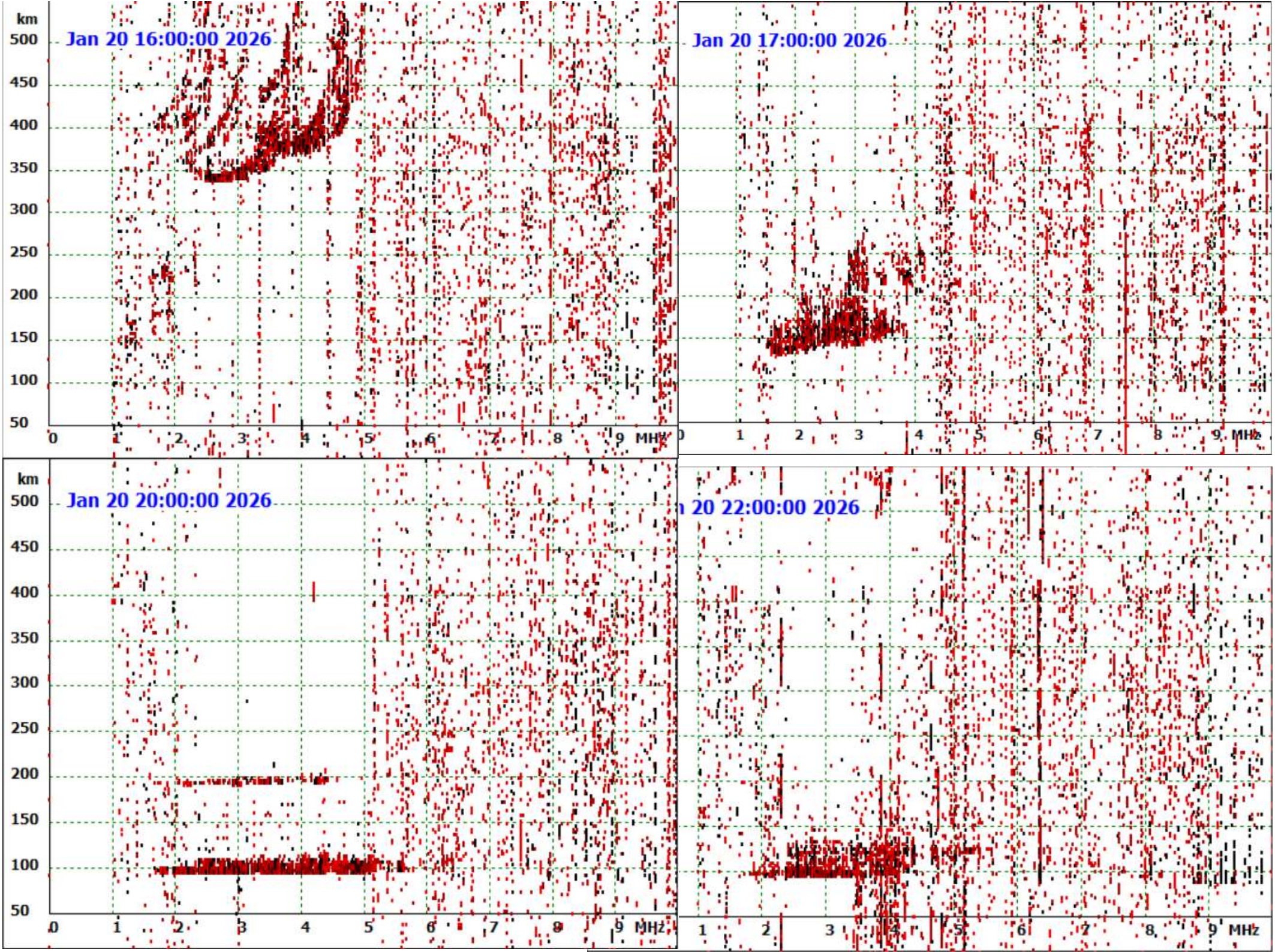
19-21 января 2026 г.

Тем не менее, в восходно-заходный интервалы времени 20-21 января 2026 г. МНЧ по данной трассе оказываются на 2-4 МГц меньше, чем 10-12 и 1-2 января. При этом для интервала времени с 6 до 14 UT 20 января отмечаются вариации МНЧ, которые практически не отмечаются 10-12 января. По нашему мнению, это обусловлено влиянием геомагнитной бурей 20-22 января (см. слайд 14) .

В январе 2026 г. на полигоне НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского продолжала работать ионосферная станция CADI. Ниже приводится несколько ионограмм вертикального зондирования ионосферы во время сильной геомагнитной возмущенности 20 января 2026 г. (см. слайд 14).




km
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
Jan 20 11:00:00 2026
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 MHz
Jan 20 12:00:00 2026
1 2 3 4 5 6 7 8 9 MHz
km
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
Jan 20 13:00:00 2026
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 MHz
Jan 20 14:00:00 2026
1 2 3 4 5 6 7 8 9 MHz


Jan 20 16:00:00 2026
Jan 20 17:00:00 2026
Jan 20 20:00:00 2026
20 22:00:00 2026
km
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
MHz

Заключение

В данном докладе проведен анализ отклика ионосферы на «каннибализм» корональных выбросов массы на различных фазах 25 цикла солнечной активности. В качестве параметров ионосферы рассматривалось поведение во времени критической частоты f0F2 слоя F2 ионосферы, используя предложенный нами ранее ионосферный индекс.

Показано, что объединённые корональные выбросы массы, вызывающие геомагнитные бури уровня G3 и выше, отражаются на значительных изменениях критической частоты слоя F2 ионосферы.

В то же время,18 января 2026 года одиночный быстрый гало-КВМ (~2000 км/с), вызвавший сильнейшую геомагнитную бурю, привел к бóльшим изменениям Δf0F2.

Для января 2026 г. были представлены результаты приема ЛЧМ сигналов передатчиков, расположенных на Кипре. Приведены графики максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) F-слоя ионосферы для односкачковой трассы от времени для 2-3 января, 10-12 и 20-22 января 2026 г.

Отмечено, что стандартные ЛЧМ-станции имеют диапазон рабочих частот 1-30 МГц, что не позволяет проводить полноценные измерения в зимний период. Предлагается использовать для ионосферных измерений по трассам наклонного зондирования ионосферы рабочий диапазон ЛЧМ станций от 1 до 60 МГц.

Приводится серия ионограмм вертикального зондирования ионосферы, которая иллюстрирует динамику развития ионосферных возмущений 20 января 2026 года.