ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОВОЛНОВЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ СОЛНЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАСС ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОМАГНИТНЫХ ИНДЕКСОВ

О.А. Шейнер

НИРФИ ННГУ им.Н.И.Лобачевского (НИРФИ ННГУ), 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

Одним из важных направлений изучения солнечных корональных выбросов массы является исследование распространения их в межпланетном пространстве, взаимодействия с атмосферой Земли и возможной геоэффективности указанных явлений, т.е. свойств явлений, позволяющих им быть источниками геомагнитных возмущений. Для исследования геоэффективности солнечных явлений, как показало проведённое ранее сравнение опубликованных методов и результатов анализа явлений на Солнце, в межпланетной среде и магнитосфере Земли, необходимо первоначально отбирать явления на Солнце и затем сопоставлять с явлениями на следующем звене цепочки: солнечные источники корональных выбросов— межпланетные выбросы— геоэффективные явления.

Проведённый корреляционный анализ связи наблюдаемых начальных параметров потенциально геоэффективных корональных выбросов массы с характеристиками межпланетных выбросов показал, что в межпланетных выбросах, непосредственно воздействующих на магнитосферу Земли, сохраняется информация о солнечных источниках приходящих возмущений.

Сформулированное положение является основанием для утверждения, что процессы, которые предшествуют и сопутствуют формированию корональных выбросов на Солнце и проявляются в характеристиках электромагнитного излучения, в т.ч. и в радиодиапазоне, отражаются на характеристиках геоэффективности корональных выбросов массы.

На основе анализа временных и спектральных данных микроволнового солнечного излучения в широком диапазоне частот (от сотен до 15 000 МГц) в период, предшествующий корональному выбросу, создан способ краткосрочного прогноза времени регистрации коронального выброса на коронографе (Шейнер, Фридман, 2017). Полная реализация способа предусматривает схему, использующую несколько связанных процедур, последняя из которых – совокупность всплесковых явлений со взрывным ростом (от долей до десятков секунд) на интервале за 2 ч до события в виде подобного поведения спорадической компоненты радиоизлучения на различных частотах.

Для корональных выбросов массы, обладающих наибольшей потенциальной геоэффективностью, воздействие которых на околоземное пространство проявляется в изменениях геомагнитных индексов Kp и Dst, установлены следующие закономерности существования радиопредвестников:

- *наличие широкополосного радиоизлучения радиопредвестников корональных выбросов, по крайней мере, в одном из диапазонов: сантиметровом или дециметровом;*
- *длительность радиопредвестников более 10 мин.*

Таким образом, наличие у корональных выбросов массы микроволновых предвестников с вышеупомянутыми свойствами может быть использовано для возможной оценки возникновения изменений геомагнитных индексов.

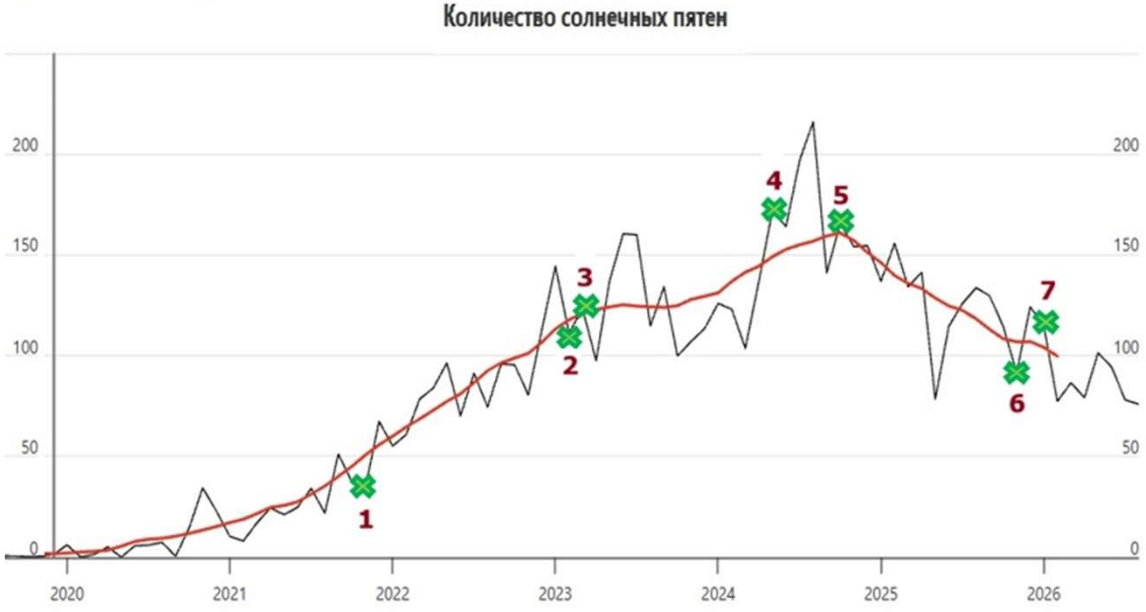
Данные и метод

В данной работе проанализирована связь изменений геомагнитных индексов с корональными выбросами масс и микроволновыми предвестниками перед ними на примере данных наблюдений нескольких наиболее мощных геоэффективных событий 25 цикла солнечной активности.

Информация о геомагнитных индексах Dst и Kp доступна на сайтах WDC for Geomagnetism, Kyoto и Helmholtz Zentrum, Potsdam, о регистрации корональных выбросов – в каталоге SOHO LASCO CME CATALOG.
Данные Мировой службы Солнца содержали данные солнечных обсерваторий Learmonth (LEA), Sagamore Hill (SAG), Palehua (PAL), San Vito (SVI). Результаты наблюдений на спектрографах доступны на сайте International Network of Solar Radio Spectrometers (e-CALLISTO).

Для примера на слайдах ниже приводятся магнитограммы Солнца по данным SDO HMI, изображения зарегистрированных корональных выбросов по данным LASCO C2 и временные изменения потока радиоизлучения *S* в форме схематических профилей. На профилях справа указаны частоты наблюдений в МГц, правая граница горизонтальной оси соответствует моменту регистрации выбросов на коронографе LASCO C2.

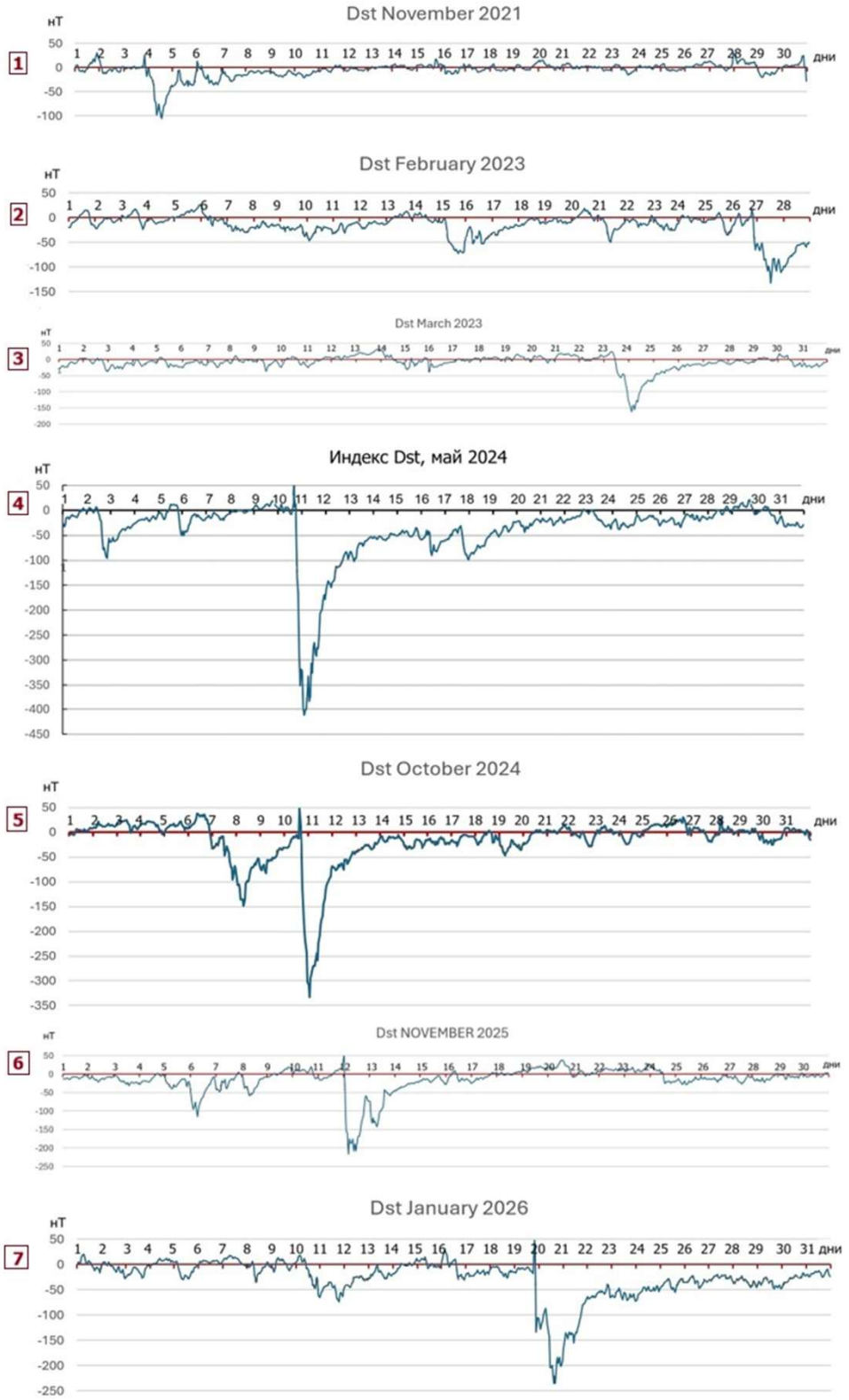
25 цикл солнечной активности характеризуется несколькими мощными геоэффективными событиями. На рисунке ниже показаны отдельные, наиболее мощные, выбранные нами для рассмотрения.



Выбранные события характеризуют фазы минимума, подъема, максимума и спада солнечной активности во время 25 цикла.

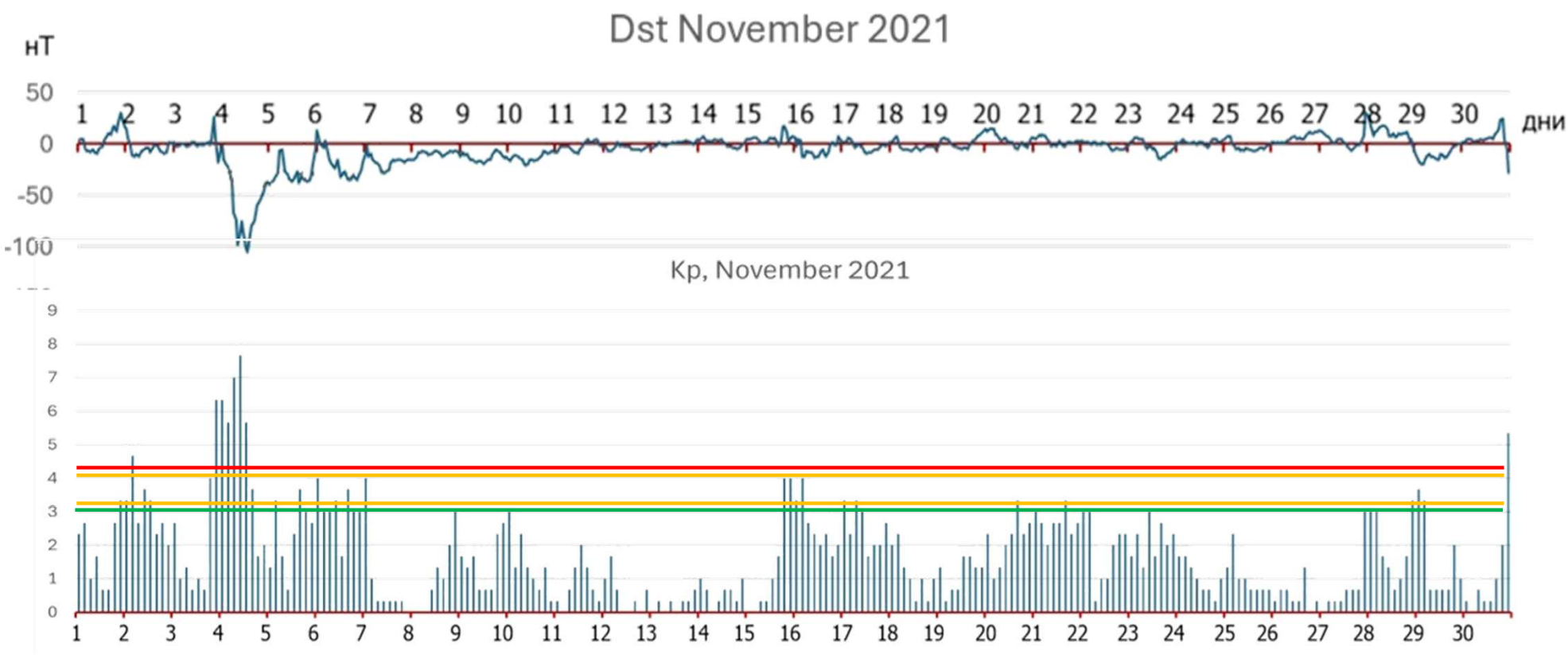
Сопоставление уровня геомагнитной активности на примере поведения индекса Dst показывает, что максимальные изменения регистрируются в максимуме цикла, а на спаде цикла изменения больше, чем на подъеме.

Рассмотрим каждое событие отдельно.

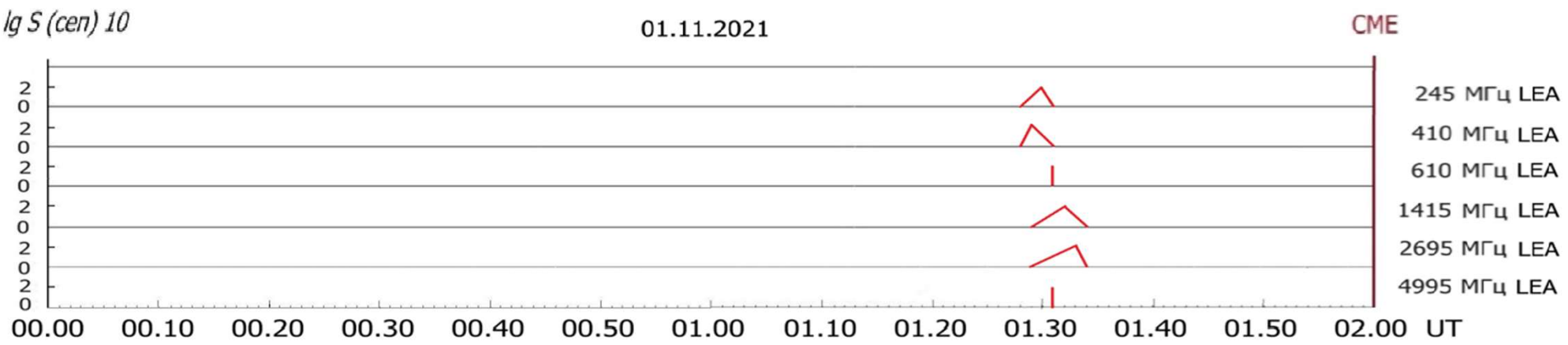


1. Ноябрь 2021

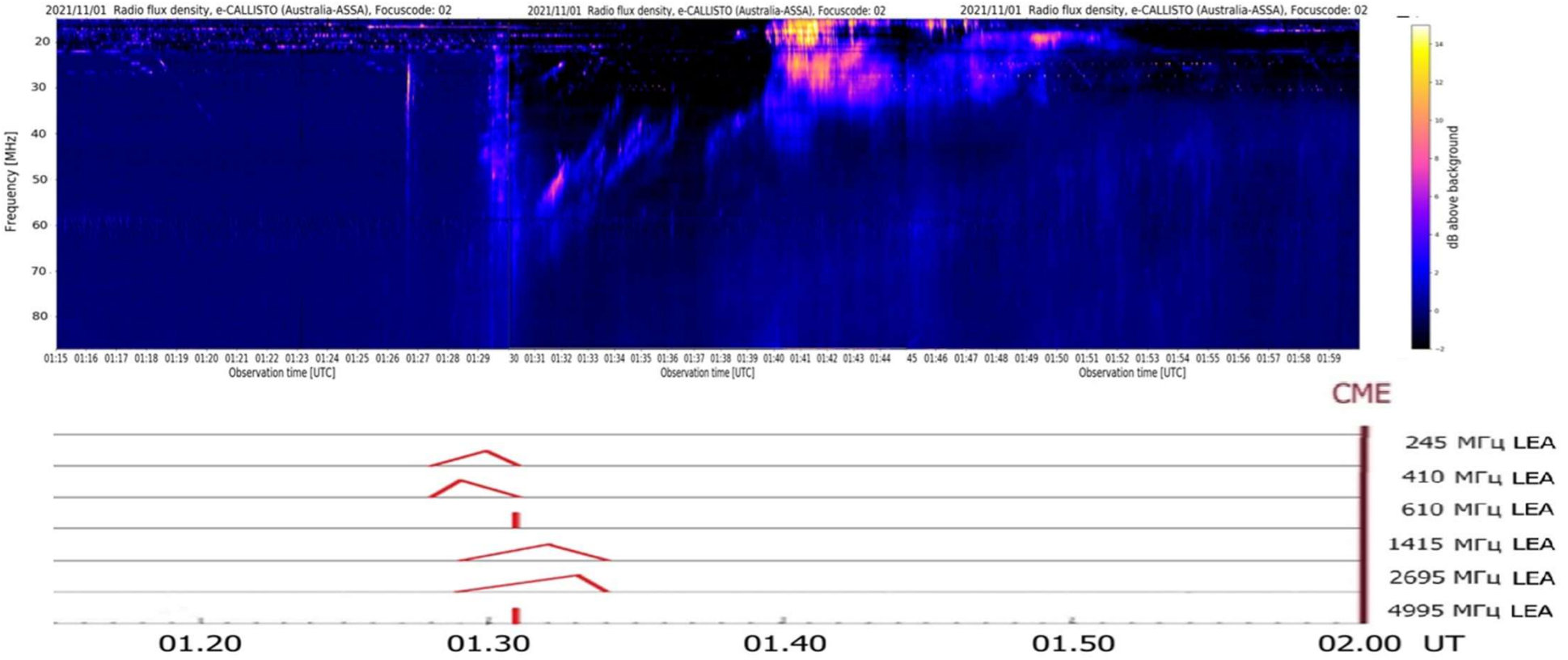
Возмущения в геомагнитных индексах Kp и Dst, показанные ниже, были вызваны объединённым корональным выбросом, пришедшим 3-4 ноября. Он образовался в результате взаимодействия трех КВМ 1-2 ноября, когда более быстрый выброс 2 ноября (02:48 UT) догнал и частично поглотил два предыдущих 1 ноября (02:00 и 21:24 UT), сформировав крупную объединённую структуру.



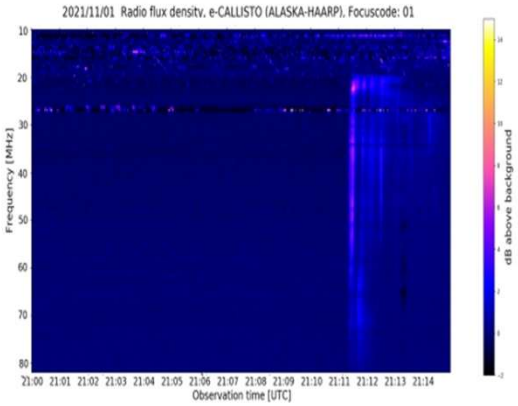
Проследим поведение радиопредвестников перед каждым из взаимодействующих КВМ: 01.11.2021 в 02:00 UT и в 21:24 UT и 02.11.2021 в 02:48 UT.



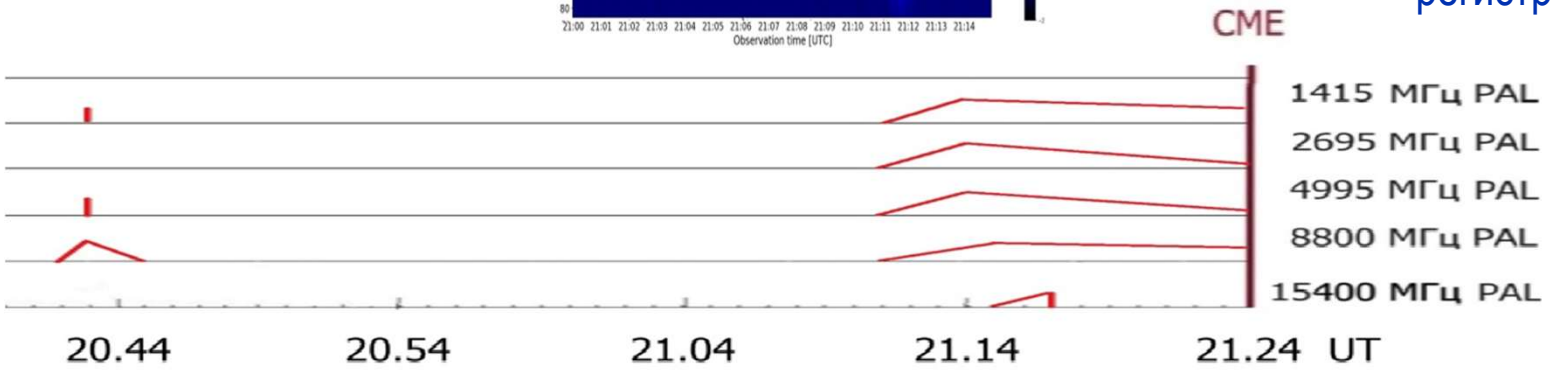
На интервале 2 часа до регистрации КВМ на LASCO C2 импульсные микроволновые предвестники регистрируются за 30 мин.



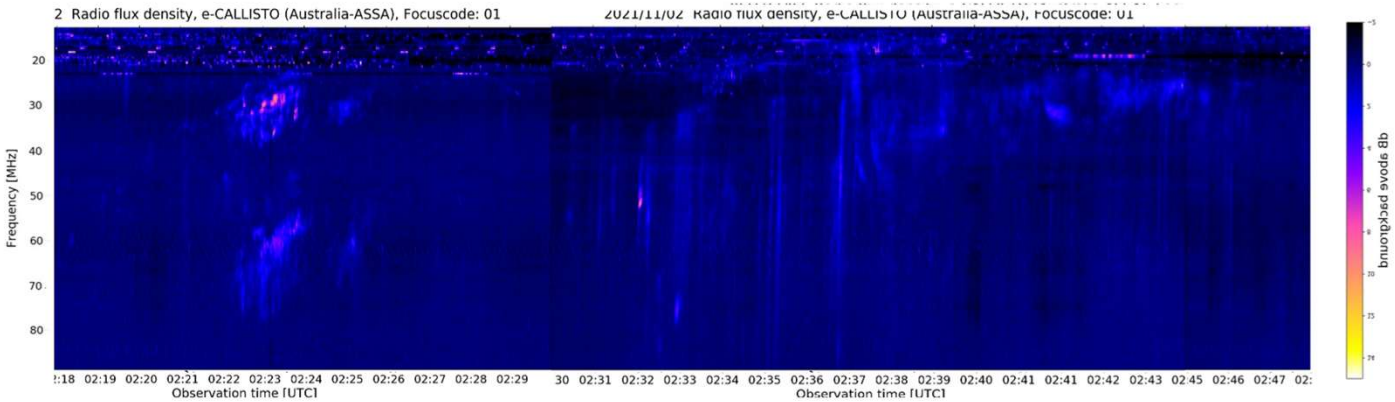
Совместные схемы потоков радиоизлучения, наблюдаемых на фиксированных частотах, и наблюдений на спектрографе 10-80 МГц Australia ASSA демонстрируют существование радиопредвестников во всей атмосфере Солнца.



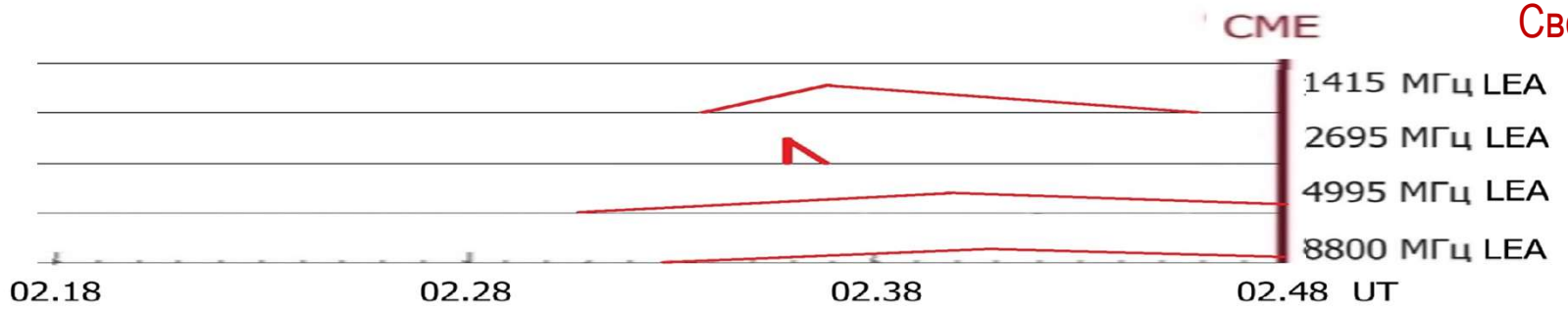
Характерной особенностью коронального выброса 01 ноября в 21:24 UT является почти одновременное присутствие постепенных микроволновых предвестников в течение 13 мин до регистрации КВМ..



Причем предвестники распространяются из нижних слоев атмосферы Солнца, вплоть до небольшого проявления в метровом диапазоне излучения.

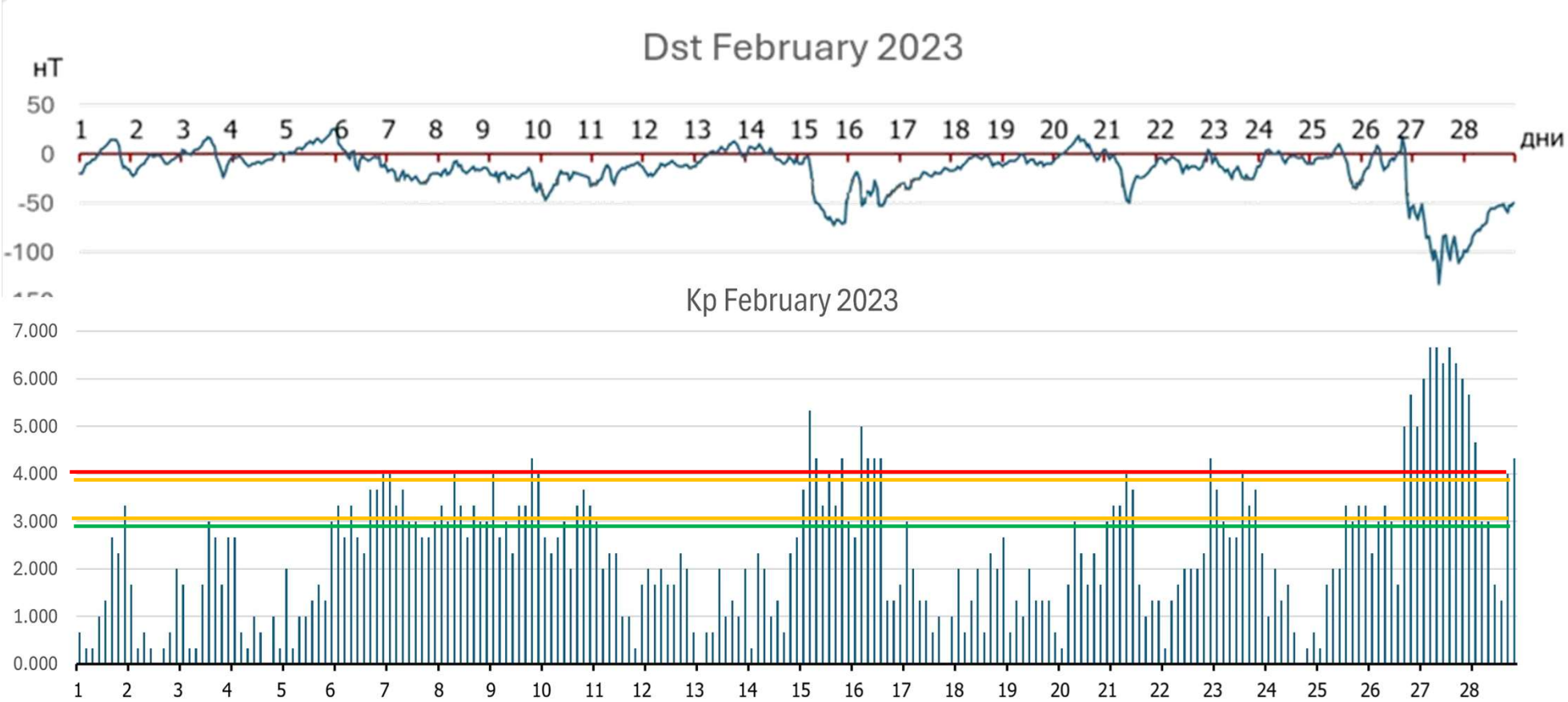


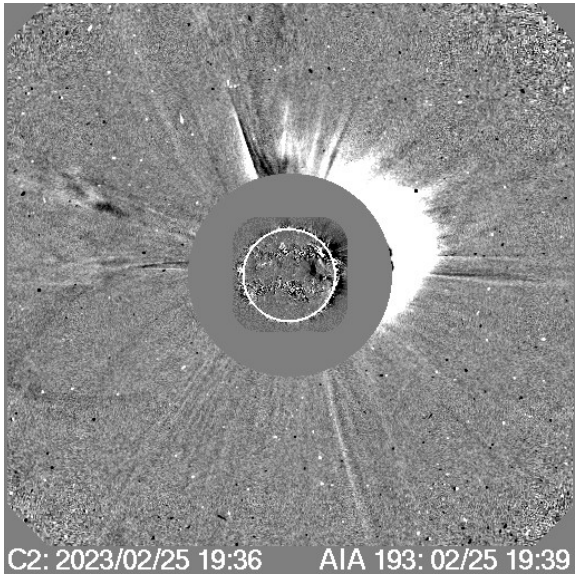
Радиопредвестники самого быстрого из взаимодействующих КВМ наблюдаются сначала в метровом диапазоне излучения ~за 25 мин до регистрации КВМ. Микроволновые предвестники возникают через 10 мин и длятся ~15 мин до регистрации КВМ.



Свойства радиопредвестников указанных двух КВМ удовлетворяют условию последующего изменения геомагнитных индексов.

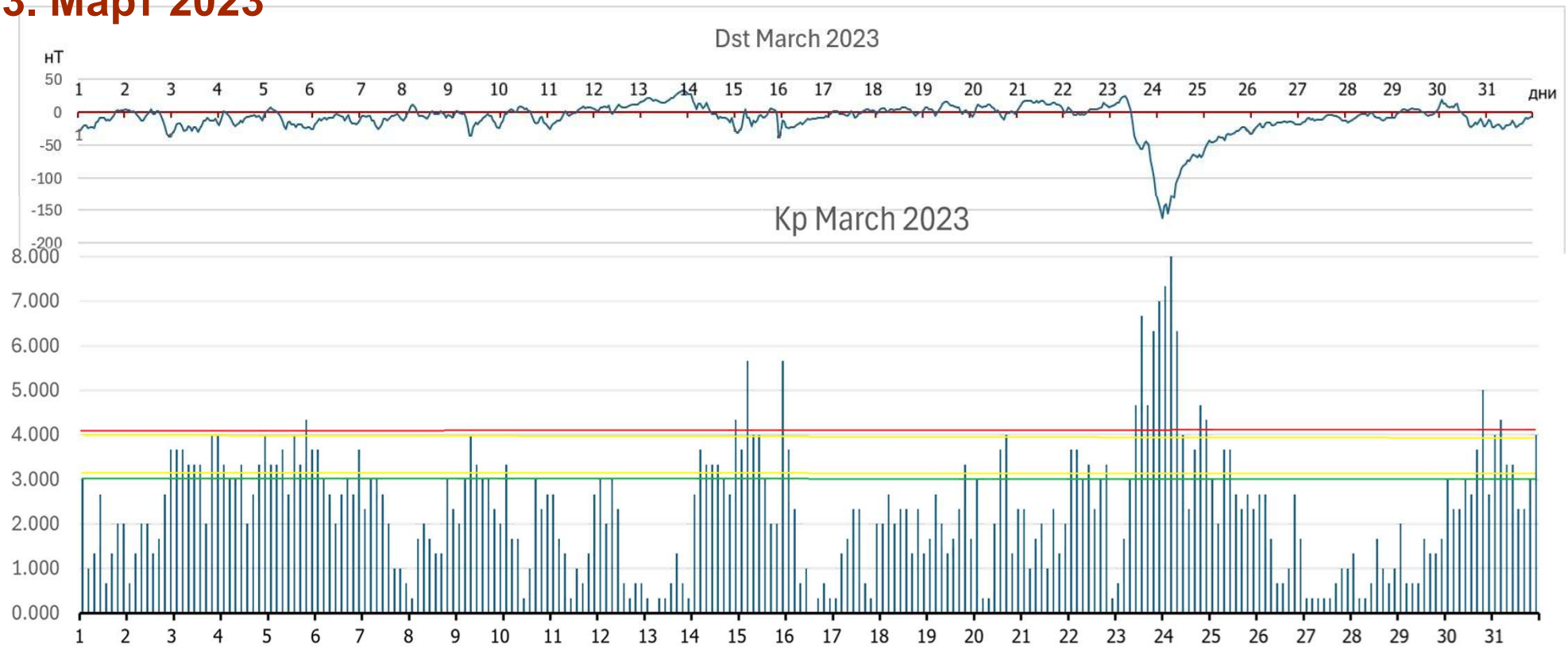
2. Февраль 2023

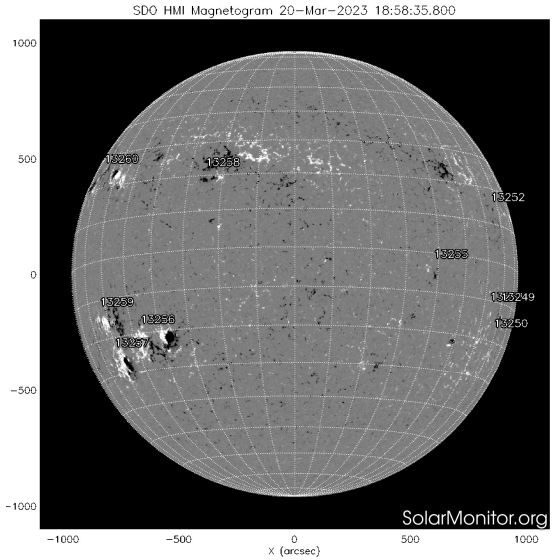


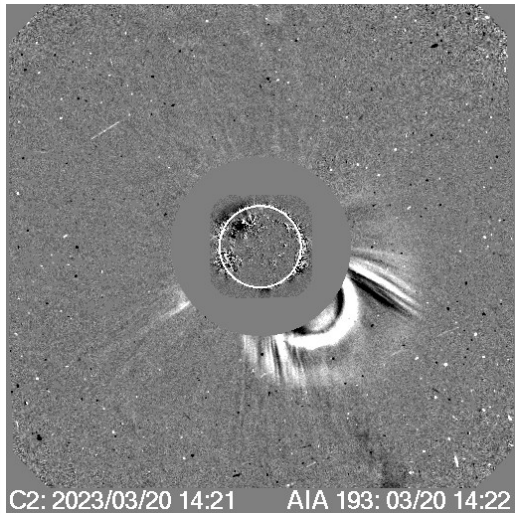


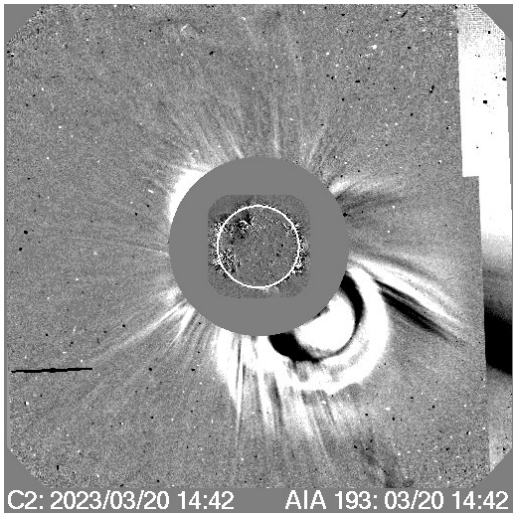
Уменьшение Dst (увеличение Kp) индекса 27-28 февраля, скорее всего, вызвано приходом КВМ типа Гало от 25 февраля в 19:24 UT. За 2 часа до регистрации данного КВМ на LASCO C2 микроволновые предвестники не зарегистрированы, наблюдались отдельные всплески III типа за ~ 110, 50 и 17 мин.

3. Март 2023







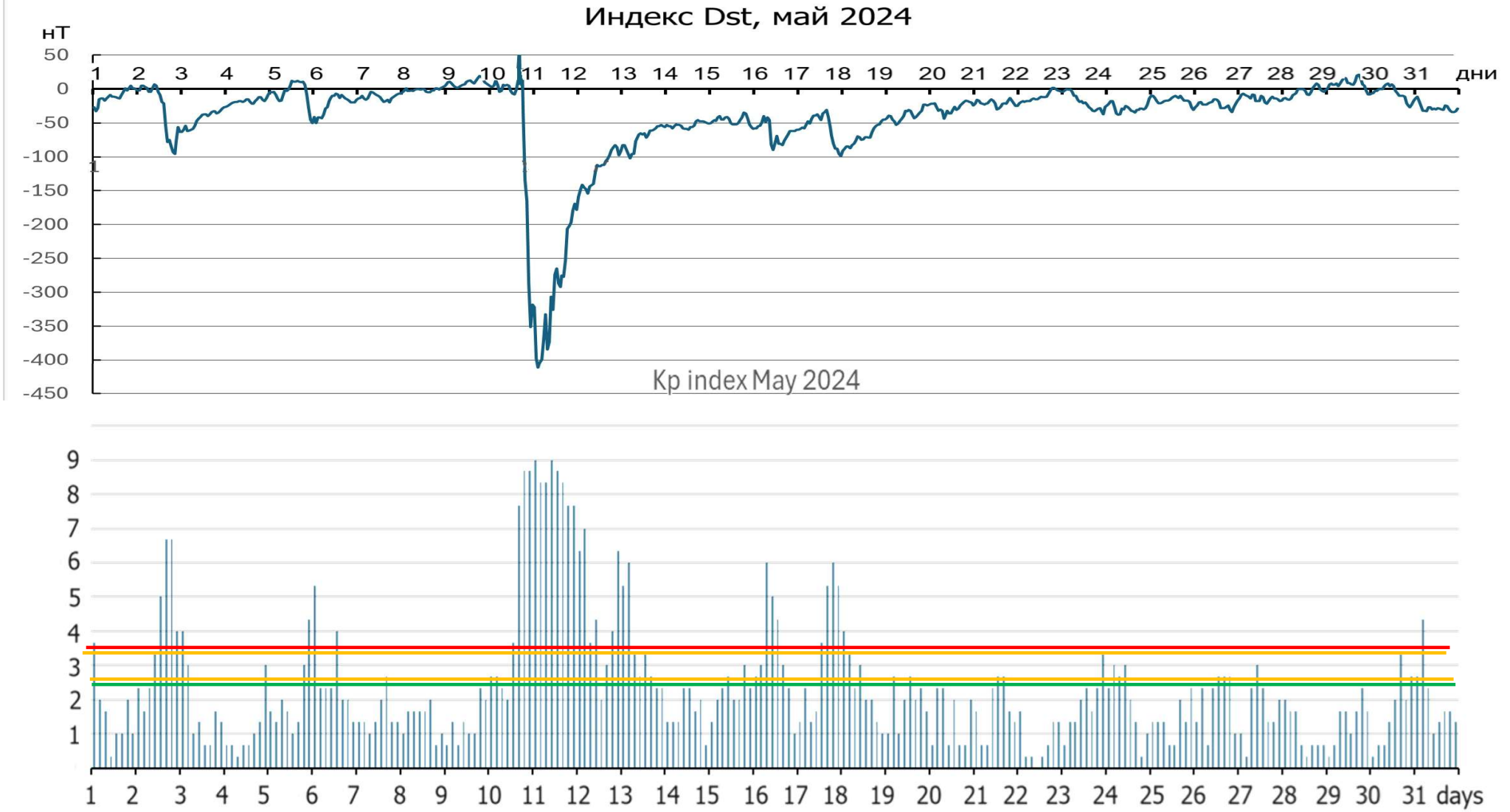


Уменьшение Dst (увеличение Kp) индекса 23-24 марта вызвано приходом двух КВМ типа Гало от 20.03 в 14:20 и 14:42 UT.

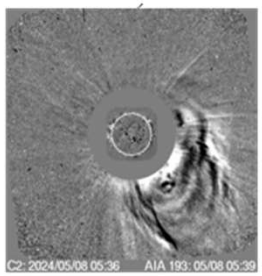
На интервале 2 часа до регистрации КВМ не сообщалось о каком-либо радиоизлучении во всех диапазонах.

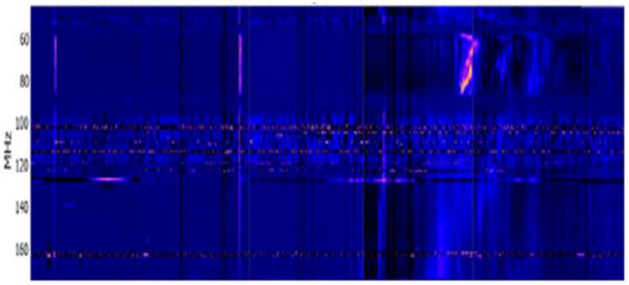
Эти корональные выбросы массы 20 марта произошли на обратной стороне Солнца, поэтому, естественно, радиоизлучение, как предшествующее КВМ, так и его сопровождающее, не может быть зарегистрировано на Земле.

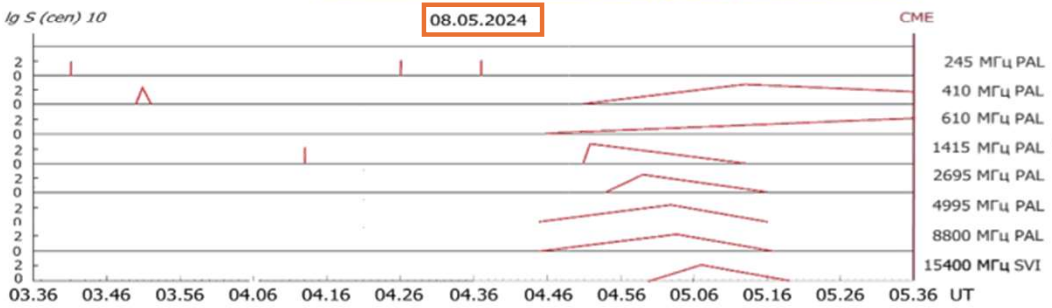
4. Май 2024

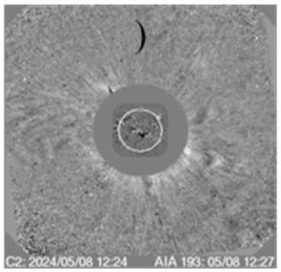


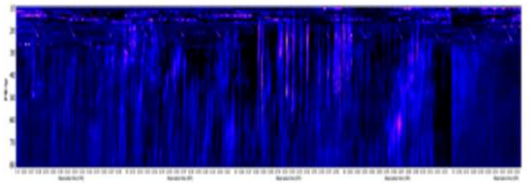
Май 2024 года характеризовался самыми большими изменениями геомагнитных индексов: до ~ -400нТ на интервале 10-13 мая. Основными факторами такого изменения Dst являются две группы последовательных КВМ типа Halo, зарегистрированных коронографом с 8 по 9 мая и с 9 по 11 мая. Радиопредвестники на интервале 2 часа до регистрации КВМ наблюдаются во всей атмосфере, имеют подобные профили перед каждым КВМ. Данные каждого КВМ приведены на следующих слайдах.

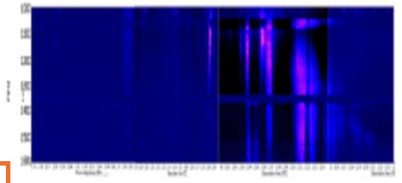

C2: 2024/05/08 05:36
AIA 193: 05/08 05:39

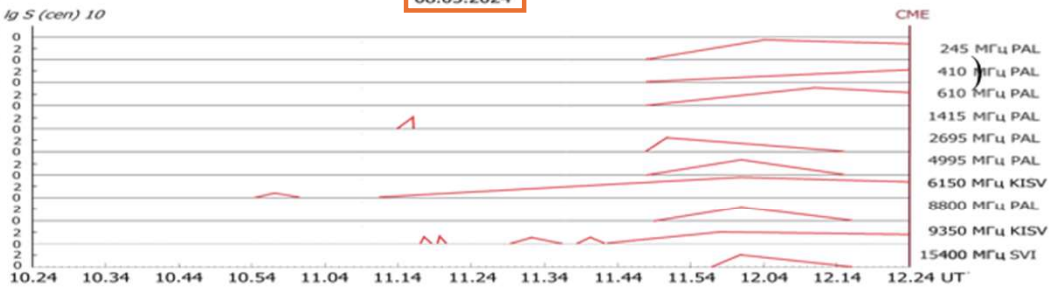

MHz

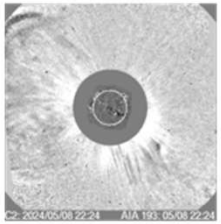

lg S (cen) 10
08.05.2024
CME
245 МГц PAL
410 МГц PAL
610 МГц PAL
1415 МГц PAL
2695 МГц PAL
4995 МГц PAL
8800 МГц PAL
15400 МГц SVI
03.36 03.46 03.56 04.06 04.16 04.26 04.36 04.46 04.56 05.06 05.16 05.26 05.36 UT

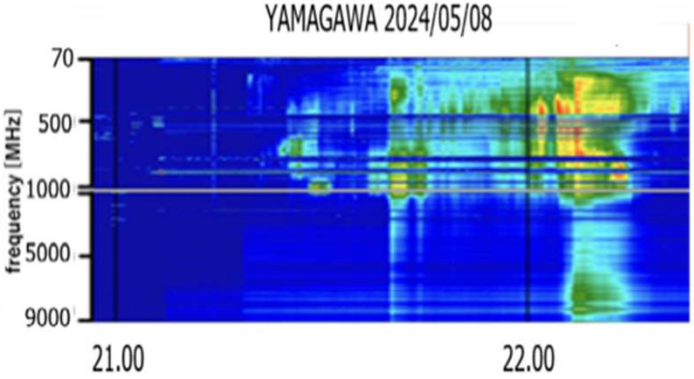

C2: 2024/05/08 12:24
AIA 193: 05/08 12:27

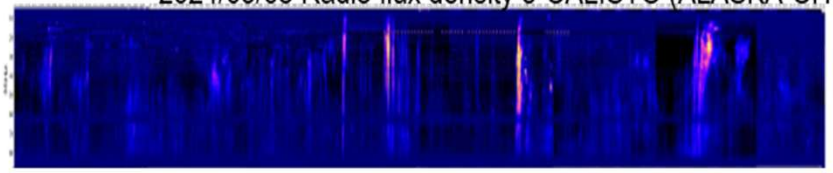


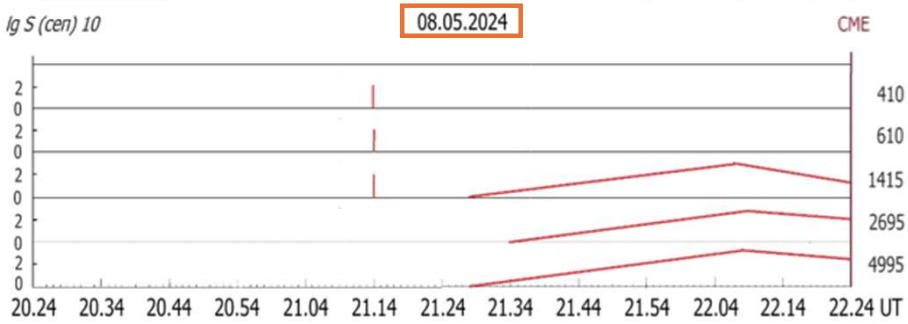


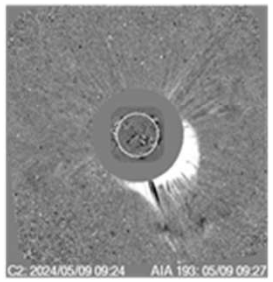

08.05.2024
lg S (cen) 10
CME
245 МГц PAL
410 МГц PAL
610 МГц PAL
1415 МГц PAL
2695 МГц PAL
4995 МГц PAL
6150 МГц KISV
8800 МГц PAL
9350 МГц KISV
15400 МГц SVI
10.24 10.34 10.44 10.54 11.04 11.14 11.24 11.34 11.44 11.54 12.04 12.14 12.24 UT

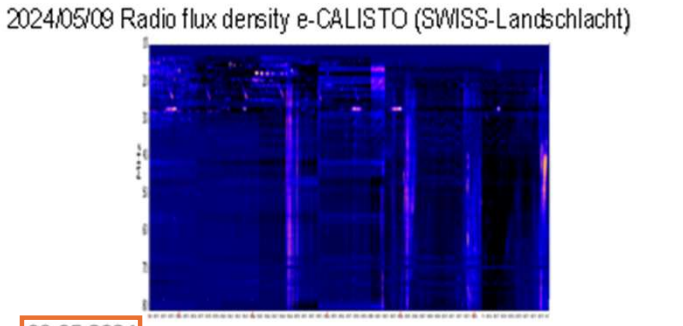

C2: 2024/05/08 22:24
AIA 193: 05/08 22:24

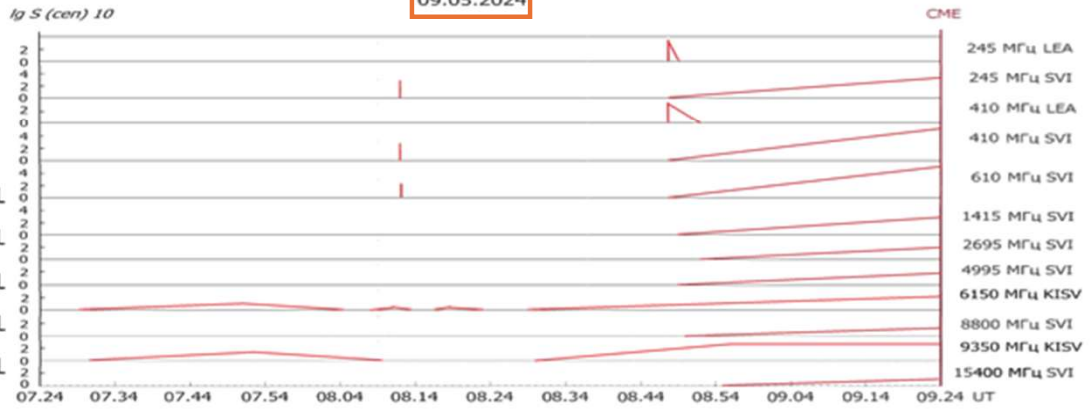

YAMAGAWA 2024/05/08
frequency [MHz]
70
500
1000
5000
9000
21.00
22.00


2024/05/08 Radio flux density e-CALISTO (ALASKA-CHOE)

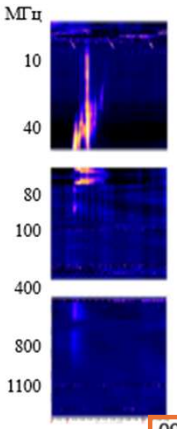

lg S (cen) 10
08.05.2024
CME
410 МГц PAL
610 МГц PAL
1415 МГц PAL
2695 МГц PAL
4995 МГц PAL
20.24 20.34 20.44 20.54 21.04 21.14 21.24 21.34 21.44 21.54 22.04 22.14 22.24 UT

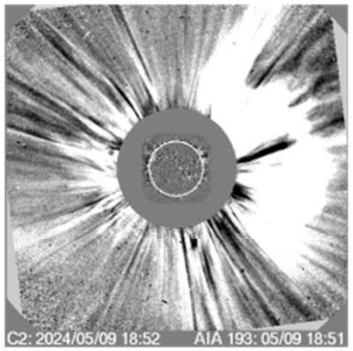

C2: 2024/05/09 09:24
AIA 193: 05/09 09:27

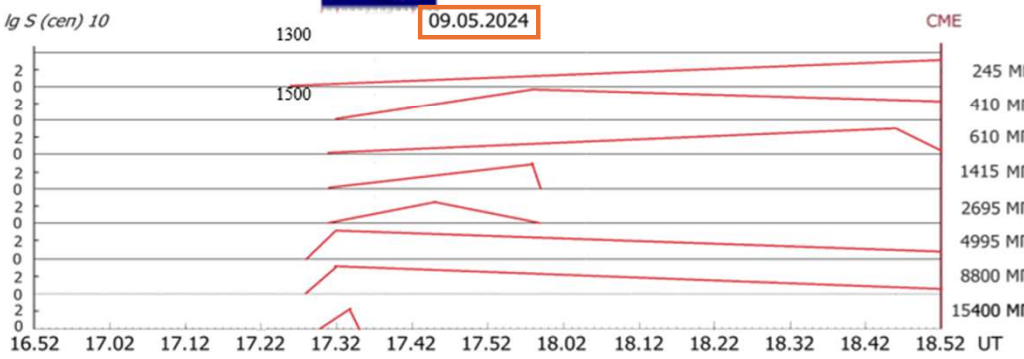

2024/05/09 Radio flux density e-CALISTO (SWISS-Landschlacht)

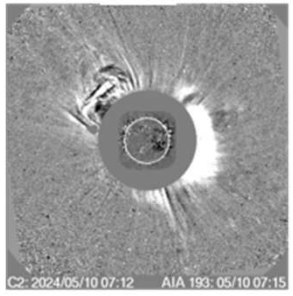

lg S (cen) 10
09.05.2024
CME
245 МГц LEA
245 МГц SVI
410 МГц LEA
410 МГц SVI
610 МГц SVI
1415 МГц SVI
2695 МГц SVI
4995 МГц SVI
6150 МГц KISV
8800 МГц SVI
9350 МГц KISV
15400 МГц SVI
07.24 07.34 07.44 07.54 08.04 08.14 08.24 08.34 08.44 08.54 09.04 09.14 09.24 UT

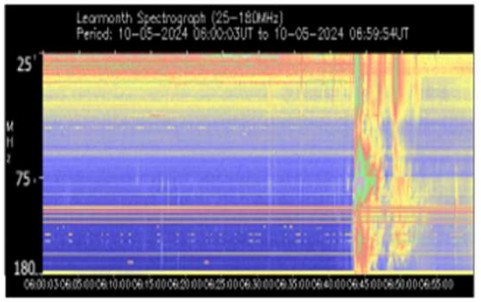
2024/05/09 Radio flux density, e-CALLISTO (GERMANY-DLR)

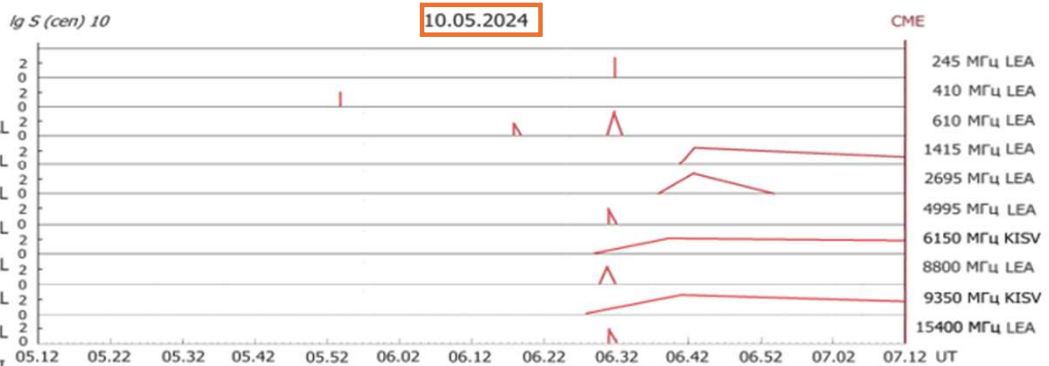


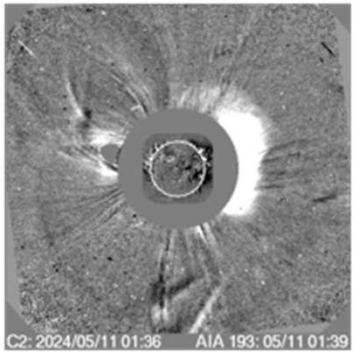


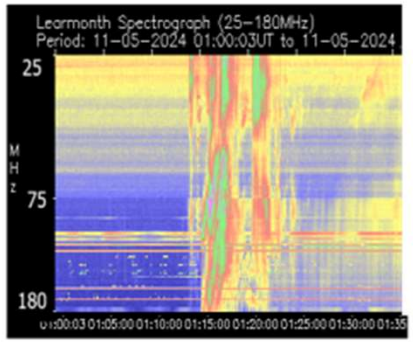


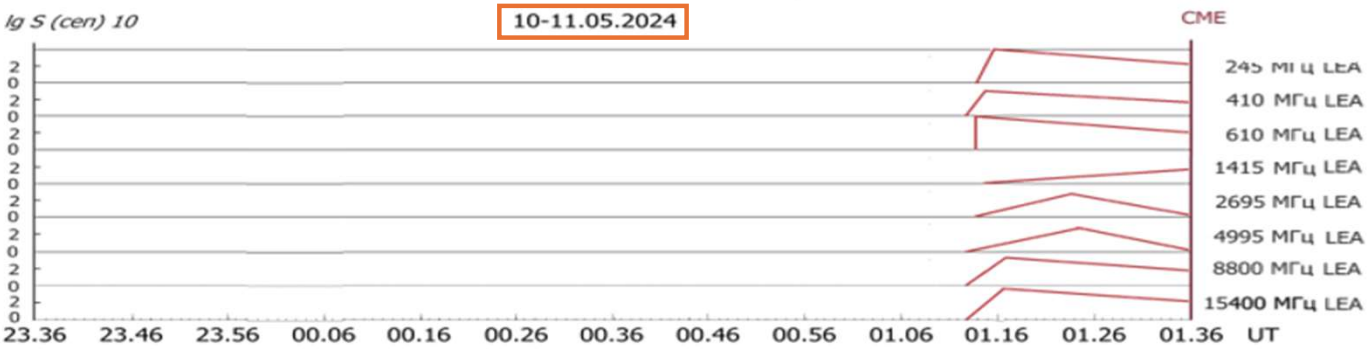






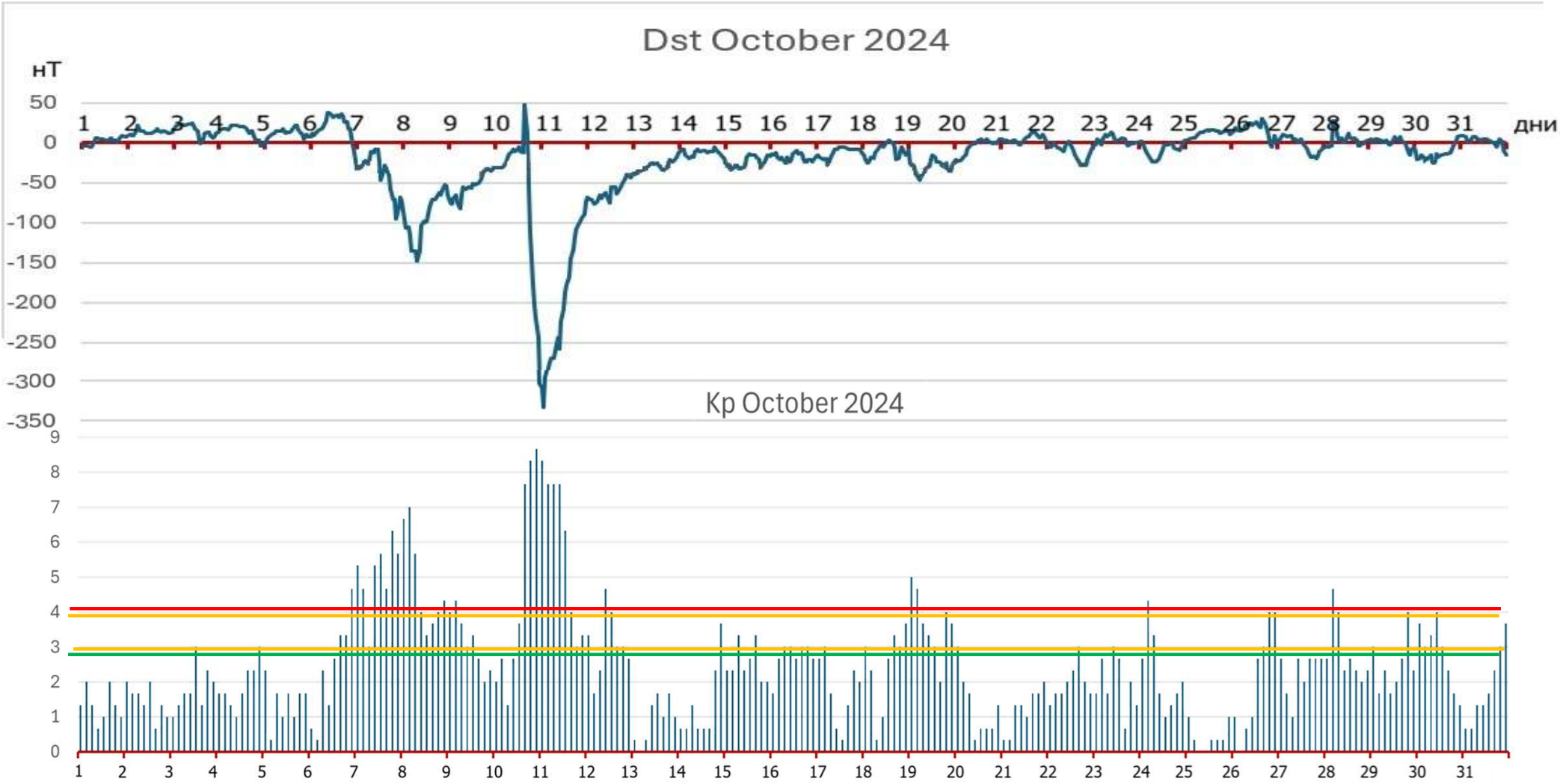






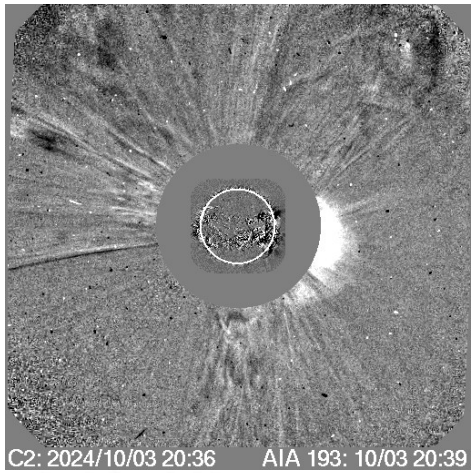
Приведенные примеры подтверждают, что корональным выбросам массы, вызывающим изменения геофизических параметров, предшествуют широкополосные радиопредвестники во всех диапазонах, начинающиеся в интервале 25÷60 мин до регистрации КВМ на коронографе.

5. Октябрь 2024

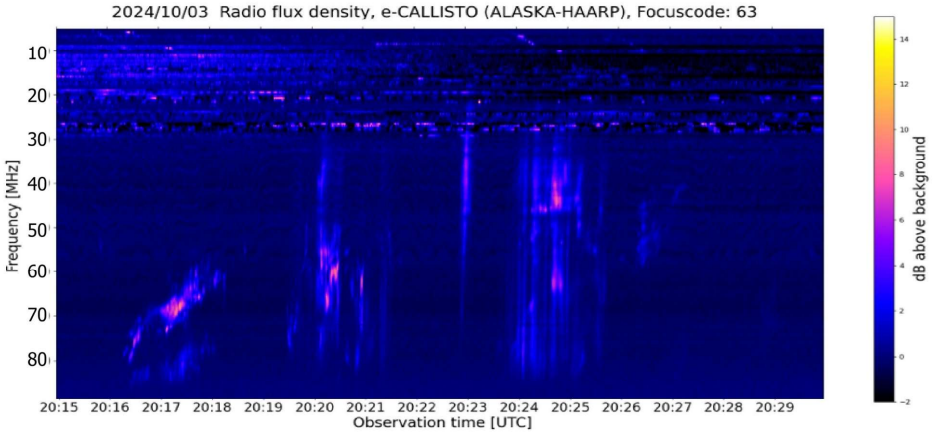


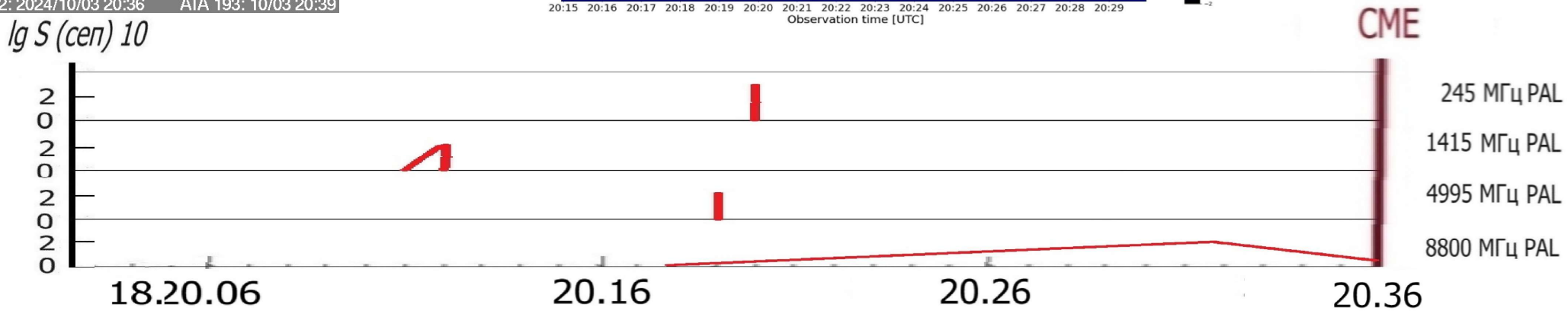
Октябрь характеризовался двумя чрезвычайными изменениями геомагнитных индексов: 8 октября и 10-11 октября. Согласно каталогу «Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections Since January 1996» (I.Richardson, H.Cane) за изменения 8.10 могут быть ответственны КВМ 03.10 в 20:36UT и 04.10 в 05:12UT, а за изменения 10.10 – КВМ 08.10 в 06:06UT и 09.10 в 02:12UT.

Радиопредвестники КВМ 03.10 и 04.10 представляют собой импульсное нерегулярное спорадическое радиоизлучение и в микроволновом, и в метровом диапазоне излучения, что показано на следующем слайде.

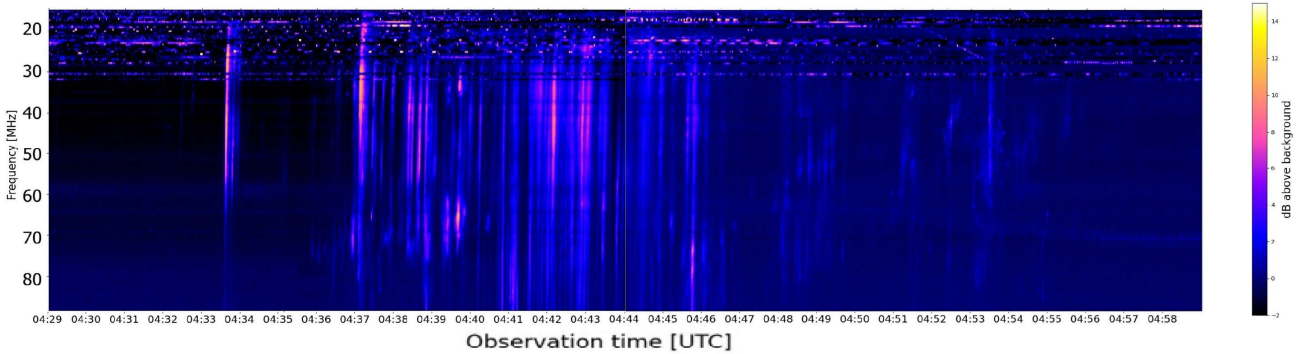


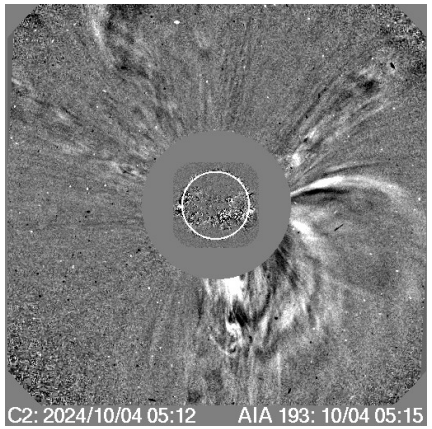
03.10.2024

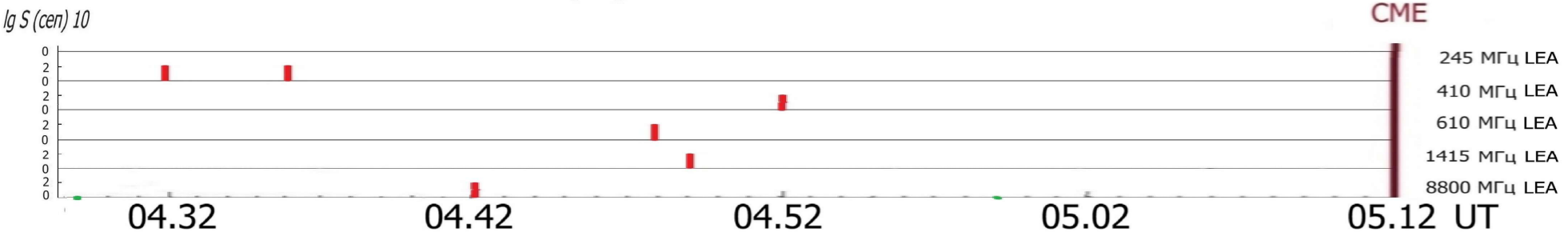


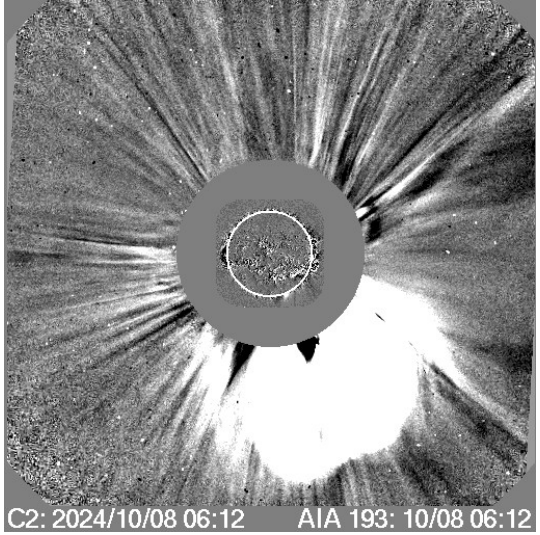


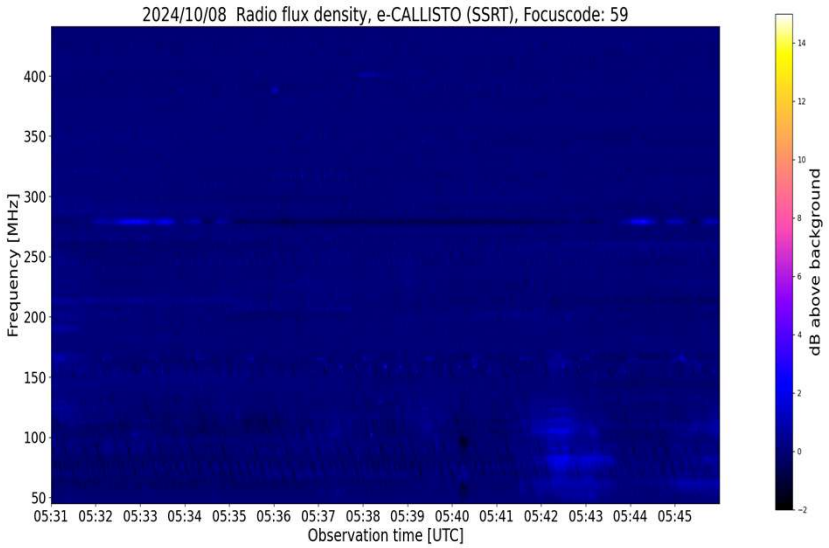
04.10.2024





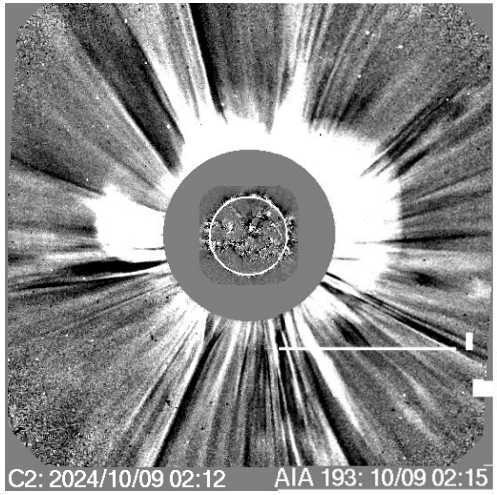




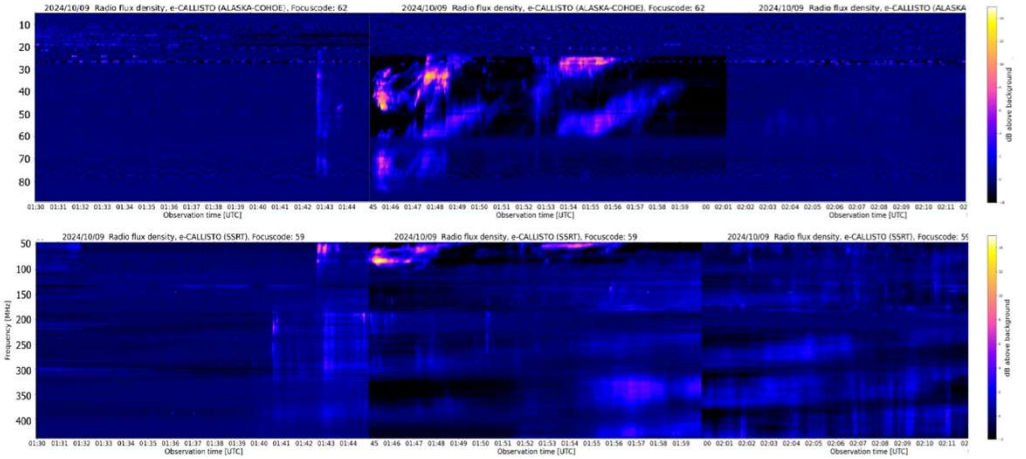


В течение двух часов до регистрации КВМ 08.10 в 06:06 системой CALLISTO в радиодиапазоне были отмечены только всплески IV типа в интервале 05:42-06:10 UT. Скорее всего, источник коронального выброса находится за западным лимбом.

Примерно за 40 минут до регистрации КВМ 09.10 наблюдались широкополосные радио предвестники длительностью больше 10 мин.

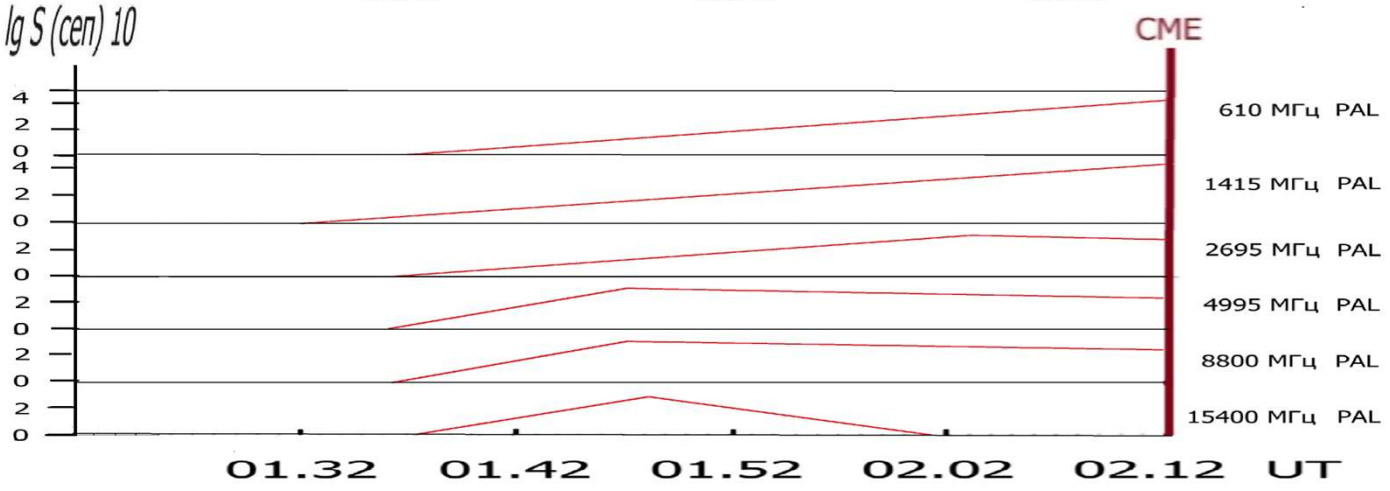


09.10. 2024

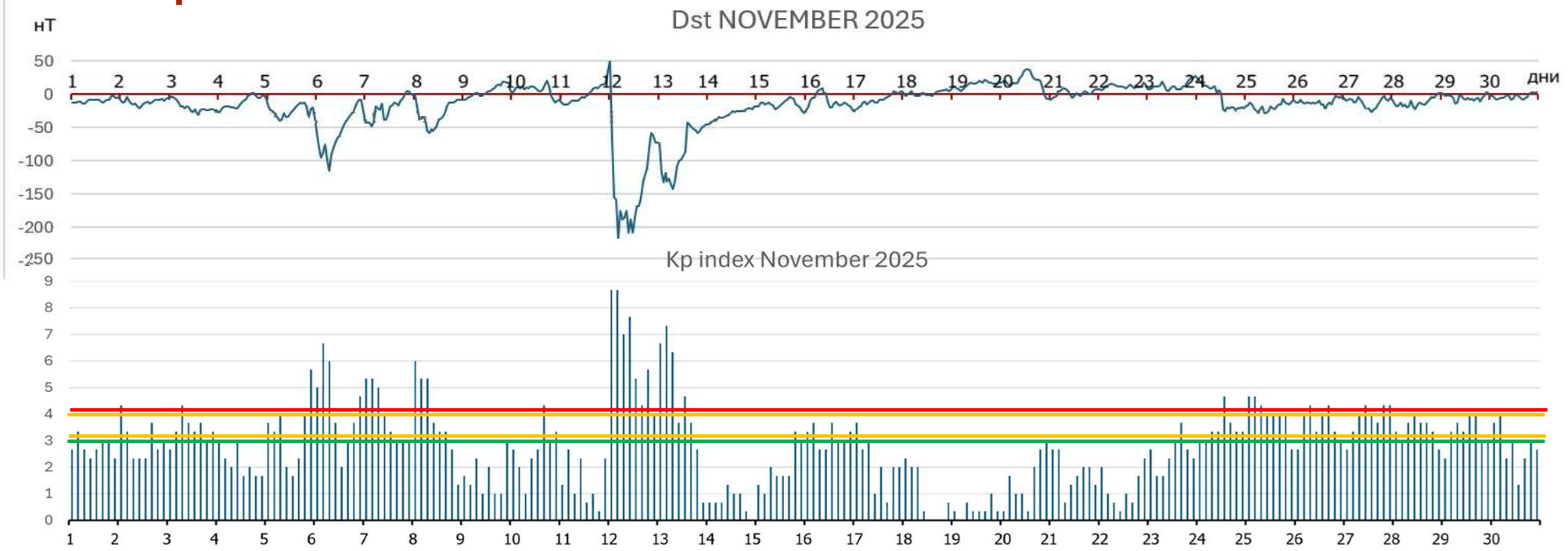


Спорадическое радиоизлучение распространялось из нижних слоев атмосферы Солнца вплоть до короны.

Свойства радиопредвестников КВМ удовлетворяют условию последующего изменения геомагнитных индексов.

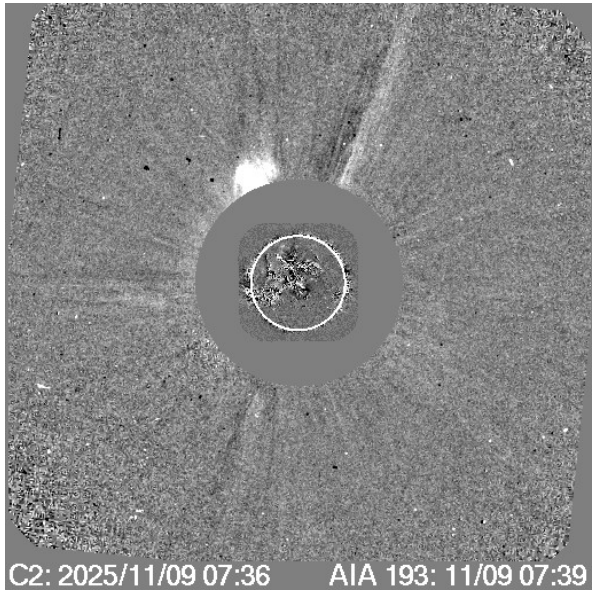


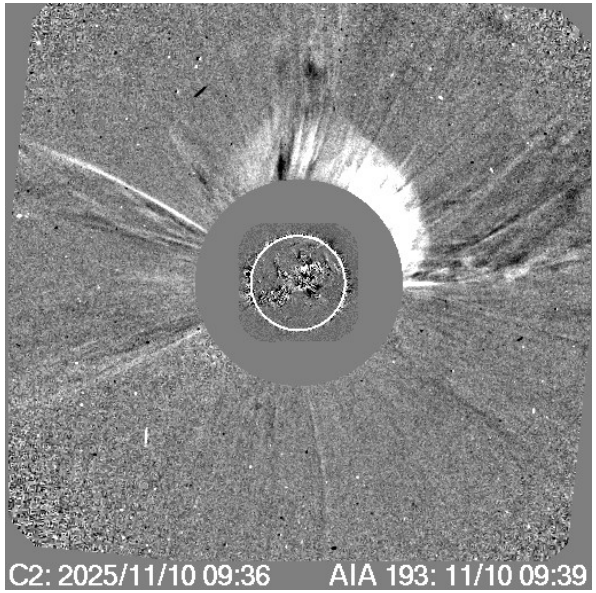
6. Ноябрь 2025

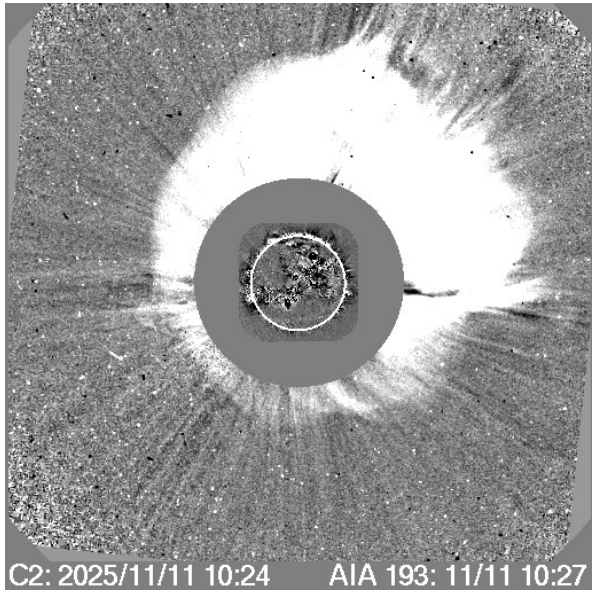


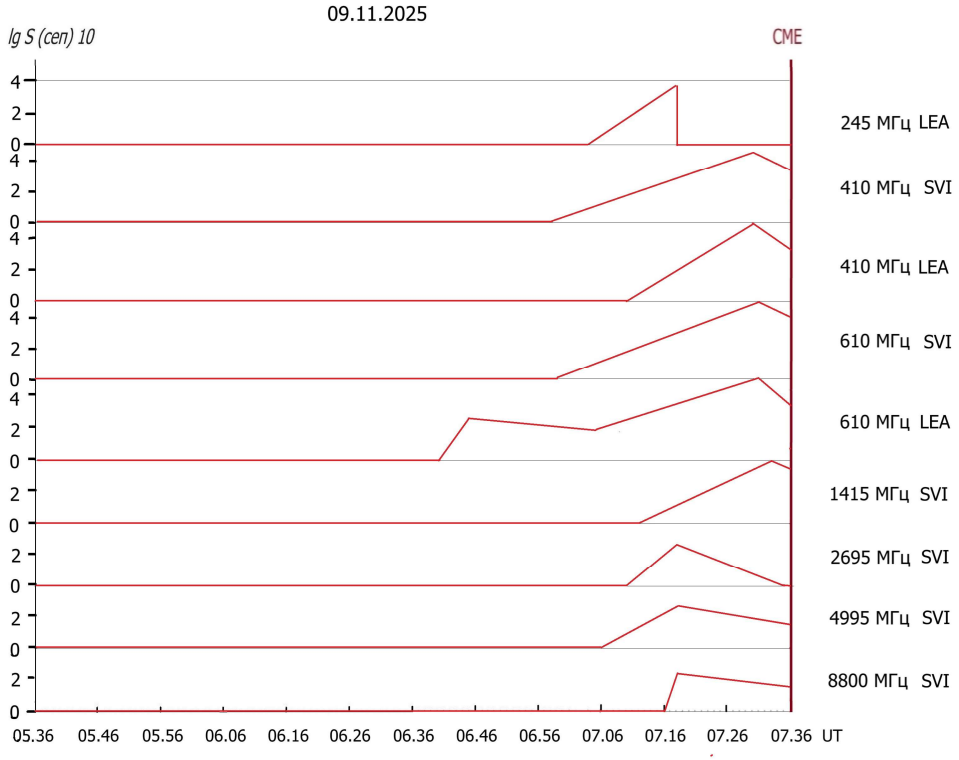
Серия вспышек X-класса **9–11 ноября** породила несколько КВМ. Первые два (09.11 в 07.36UT и 10.11 в 09.36UT) образовали объединенный выброс, вызвавший один из самых мощных штормов.

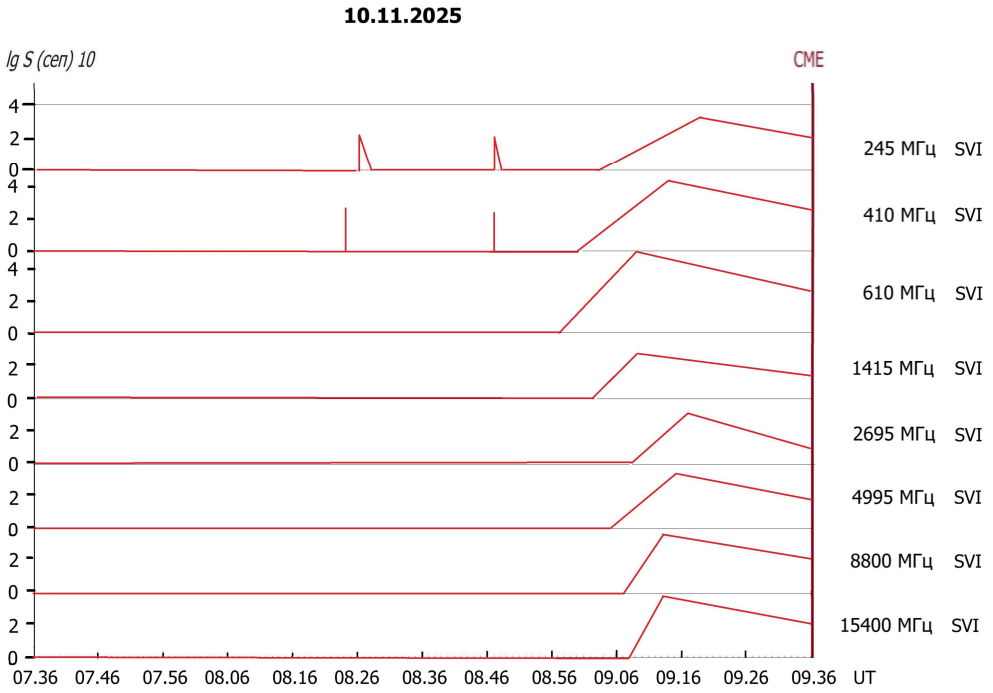
Вторичное изменение геомагнитных индексов 13.10 вызвано корональным выбросом 11.11 в 10.24UT.

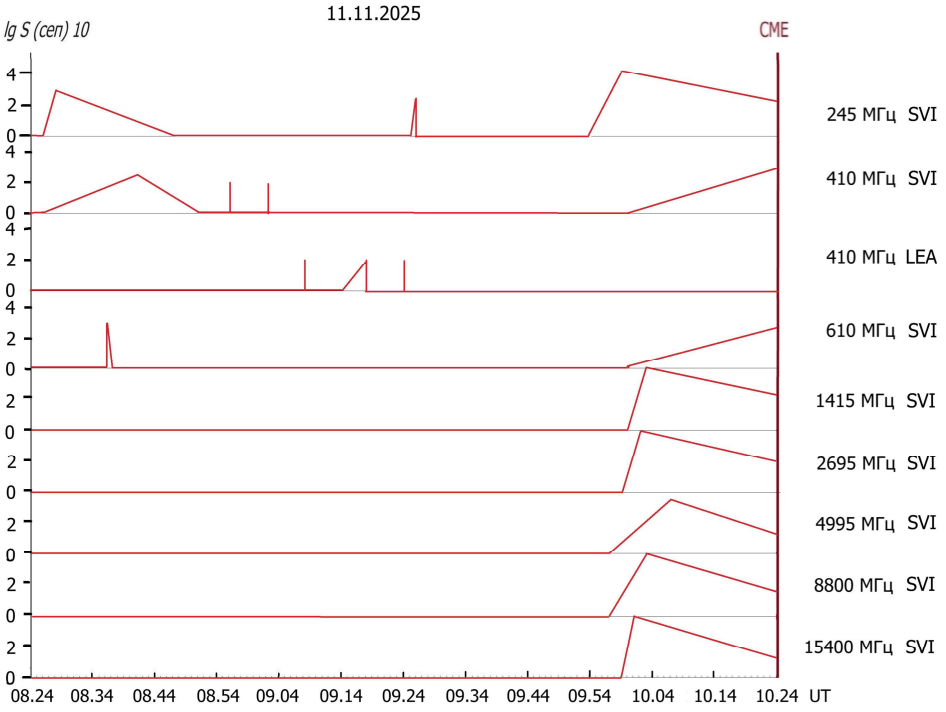










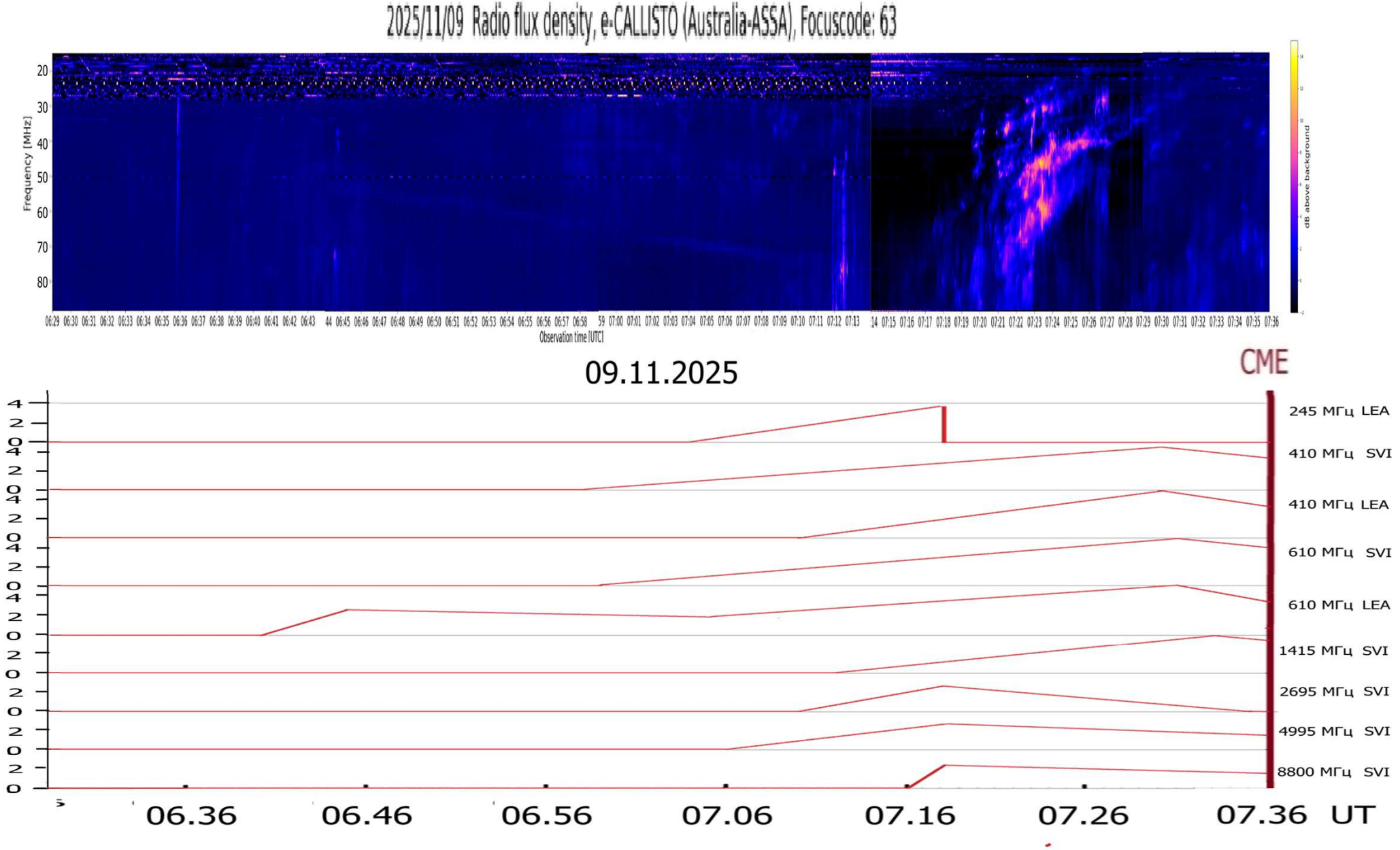


Постепенные радиопредвестники взаимодействующих корональных выбросов масс 09.11 и 10.11 возникают ~ за 40 мин. до их регистрации на коронографе.

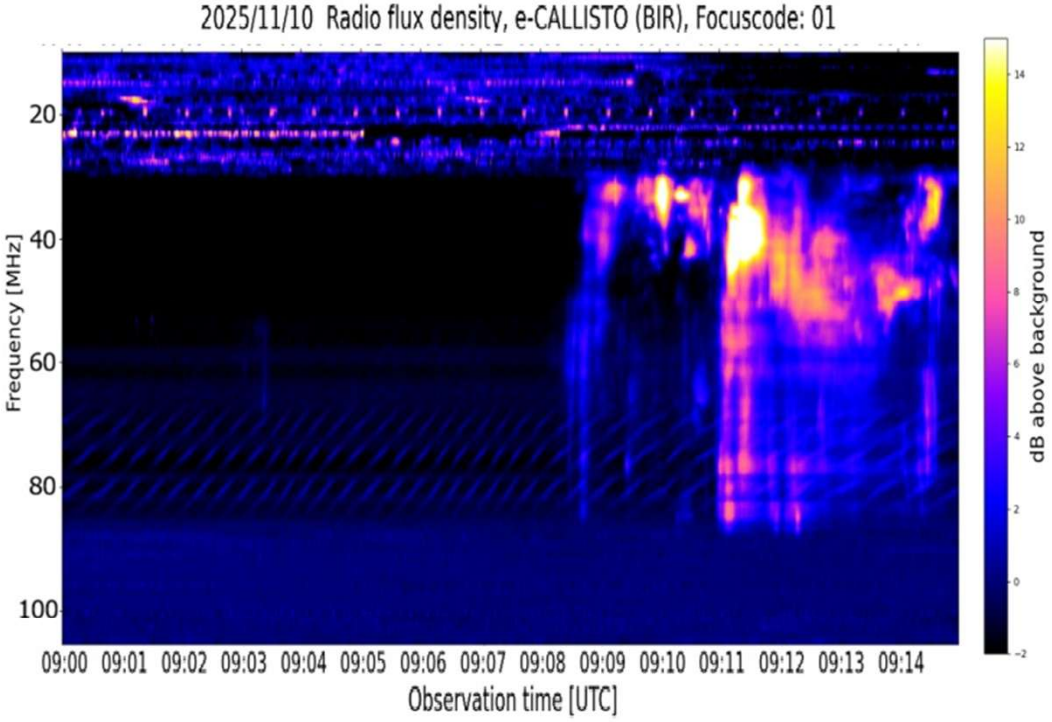
Спорадическое микроволновое излучение широкополосно в сантиметровом и дециметровом диапазонах, имеет подобные профили и длительность более 30 мин.

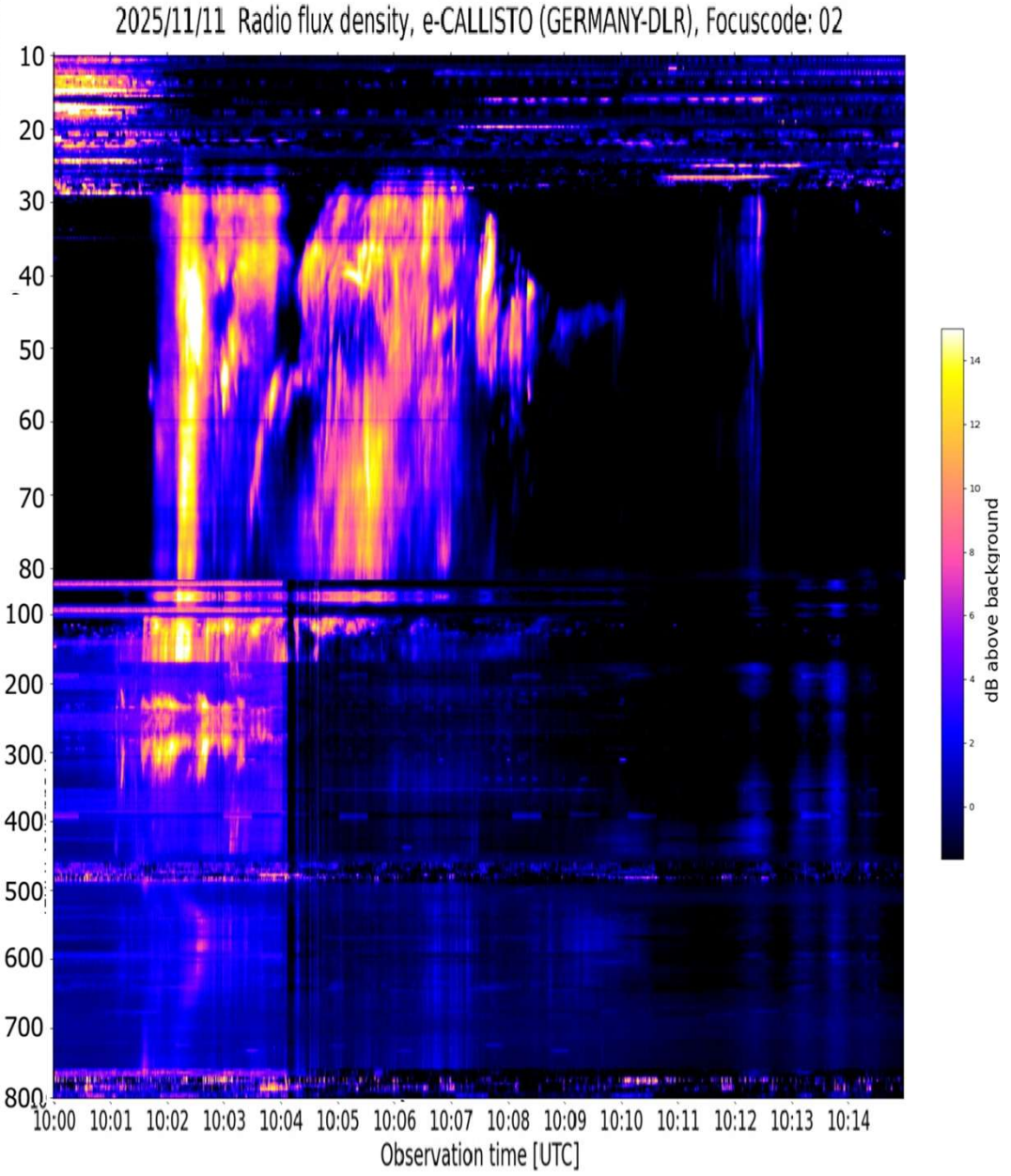
Радиопредвестники подобного профиля наблюдаются и перед КВМ 11.11 в диапазоне 15400-245 МГц с длительностью больше 20 мин.

Свойства микроволновых предвестников указанных КВМ удовлетворяют условию последующего изменения геомагнитных индексов.

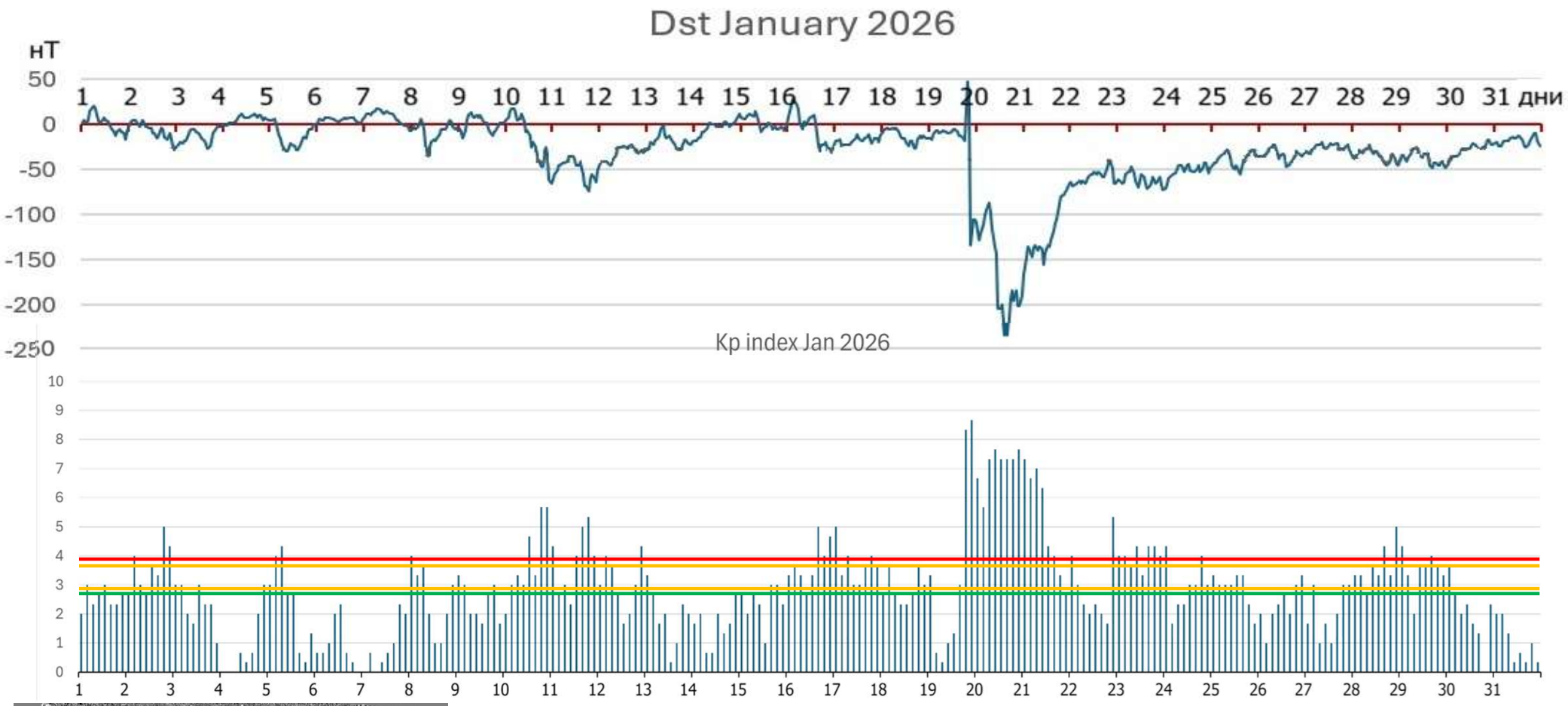


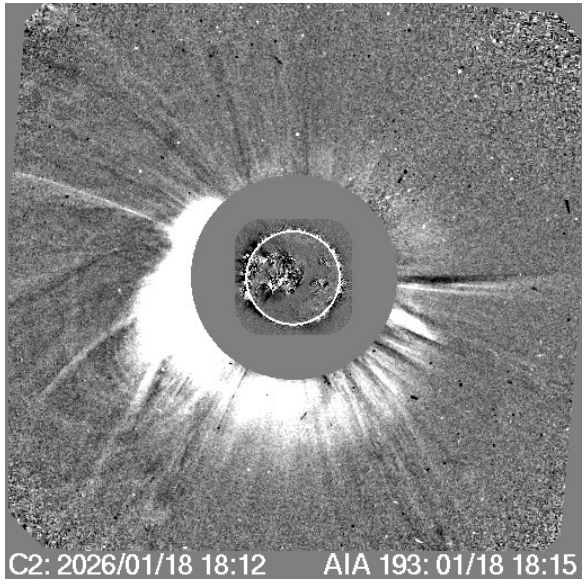
На данном и следующем слайде приводится подтверждение распространения возмущения во всей атмосфере Солнца по результатам наблюдений на спектрографах International Network of Solar Radio Spectrometers (e-CALLISTO).


2025/11/10 Radio flux density, e-CALLISTO (BIR), Focuscode: 01
Frequency [MHz]
20
40
60
80
100
09:00 09:01 09:02 09:03 09:04 09:05 09:06 09:07 09:08 09:09 09:10 09:11 09:12 09:13 09:14
Observation time [UTC]
dB above background
14
12
10
8
6
4
2
0
−2


2025/11/11 Radio flux density, e-CALLISTO (GERMANY-DLR), Focuscode: 02
10
20
30
40
50
60
70
80
100
200
300
400
500
600
700
800
10:00 10:01 10:02 10:03 10:04 10:05 10:06 10:07 10:08 10:09 10:10 10:11 10:12 10:13 10:14
Observation time [UTC]
dB above background
14
12
10
8
6
4
2
0

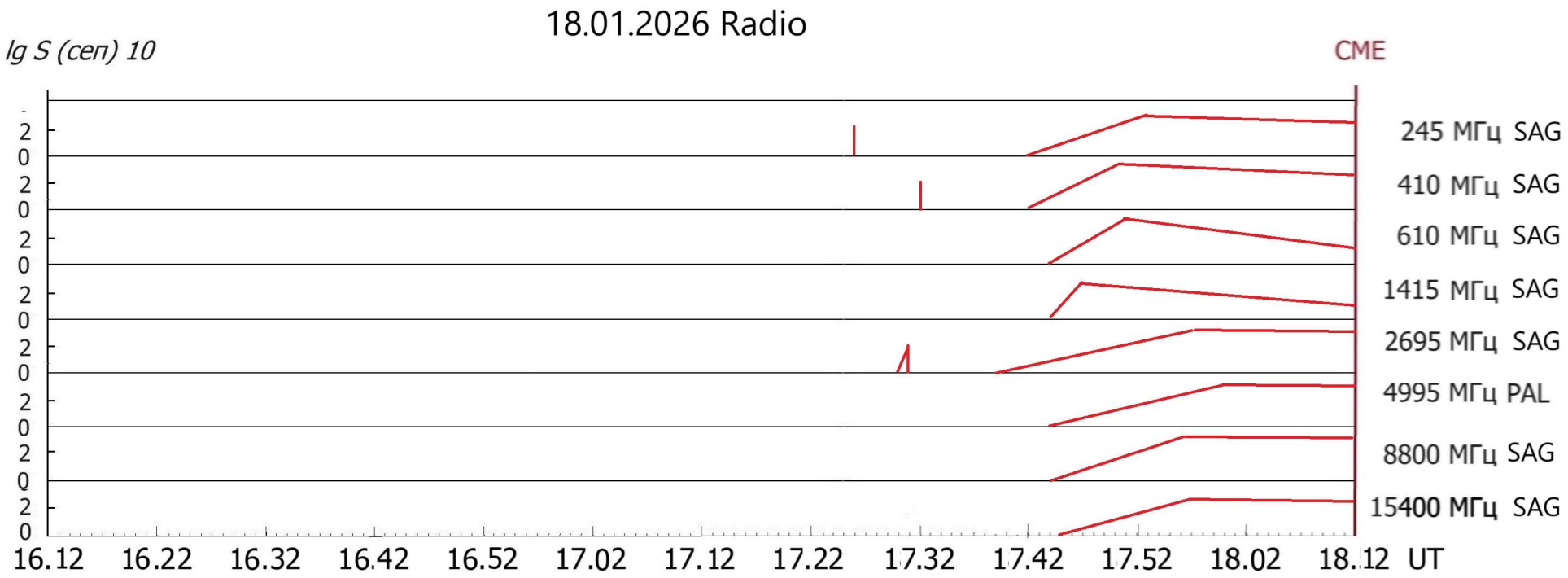
7. Январь 2026





18 января 2026 года вспышка X1.9 сопровождалась высокоскоростным (~2000 км/с) КВМ типа гало, вызвавшим геомагнитную бурю G4 и радиационную бурю S4, сильнейшую с 2003 года.

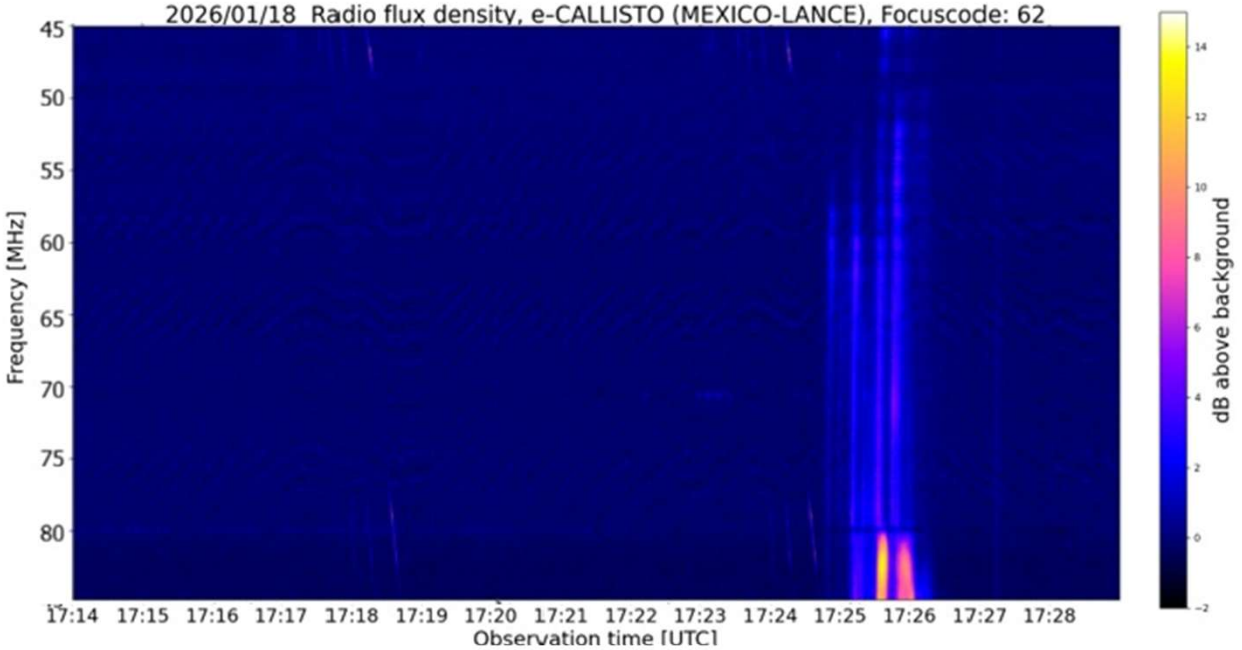
На интервале около 30 мин до регистрации КВМ (18:12:05 UT) было отмечено спорадическое радиоизлучение во всем диапазоне микроволнового радиоизлучения, что рассматривается нами, как радиопредвестники регистрации коронального выброса.



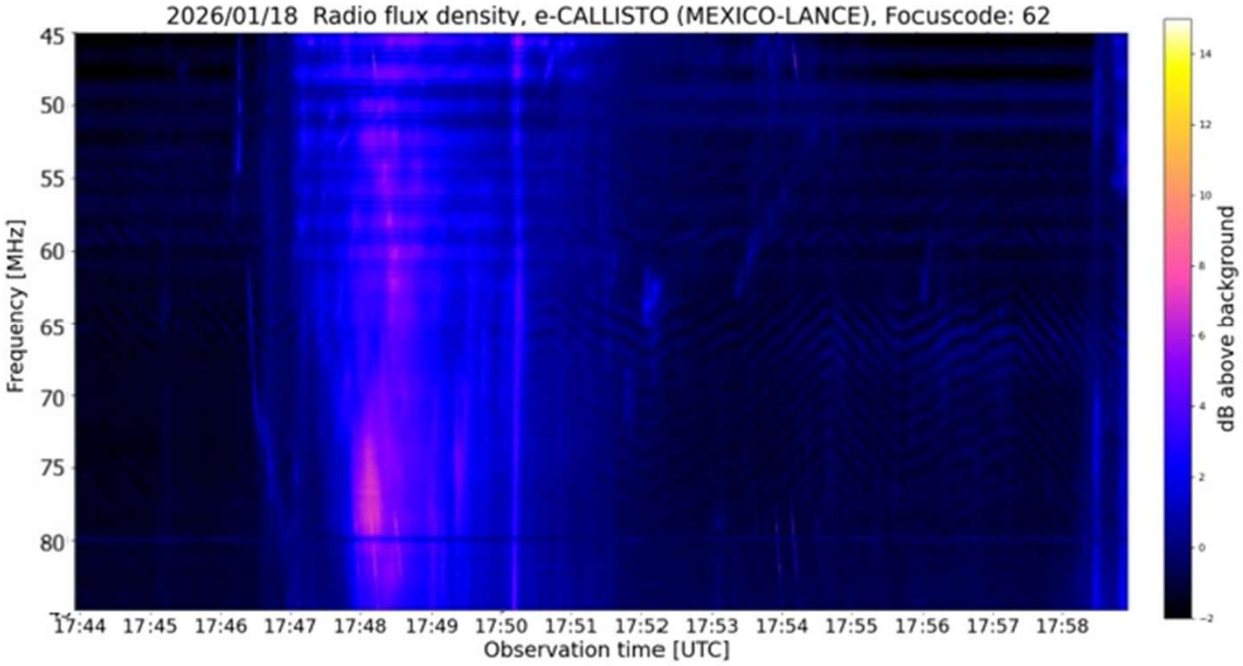
Радиопредвестники на интервале 2 ч. до регистрации КВМ наблюдаются на 8 частотах микроволнового диапазона, имеют подобные профили. Корональному выбросу массы предшествуют медленно развивающиеся длительные широкополосные предвестники, начинающиеся в интервале ~30 мин до регистрации CME на коронографе. Отметим, начало указанных предвестников регистрируется практически одновременно на приведенных частотах.

Это может свидетельствовать о месте процесса формирования коронального выброса.

Свидетельством того, что спорадическое радиоизлучение предшествует корональным выбросам во всей атмосфере Солнца, служат результаты наблюдений на спектрографах International Network of Solar Radio Spectrometers (e-CALLISTO).



Так, импульсный всплеск на частоте 245 МГц (17:26UT) имеет продолжение в диапазоне 85-45 МГЦ (MEXICO-LANCE)



А возмущения, отражающиеся в широкополосных микроволновых предвестниках, распространяется выше в атмосфере Солнца в диапазоне 85-45 МГЦ (MEXICO-LANCE)

Заключение

Проведено сопоставление возникновения изменений геомагнитных индексов с радиопредвестниками корональных выбросов массы, вызывающих указанные изменения. Изучение проведено на 7 примерах поведения индексов Dst и Кр на подъеме, в максимуме и на спаде 25 цикла солнечной активности.

Получено: в 5 случаях из 7, выбранных для рассмотрения, свойства микроволновых предвестников корональных выбросов массы удовлетворяют условию последующего изменения геомагнитных индексов:

- *наличие широкополосного радиоизлучения радиопредвестников корональных выбросов, по крайней мере, в одном из диапазонов: сантиметровом или дециметровом;*
- *длительность радиопредвестников более 10 мин.*

В одном случае спорадическое радиоизлучение вообще не было зарегистрировано, в другом – наблюдались только отдельные всплески III типа .

Таким образом,

метод краткосрочного прогноза времени регистрации корональных выбросов на коронографе LASCO C2 может быть использован для оценки динамики геофизических параметров по предвестникам корональных выбросов в радиоизлучении: метод ***дает возможность*** определения возможной геоэффективности последующих корональных выбросов и ***расширяет время прогноза*** таких событий на период существования микроволновых предвестников (~40 мин – 2 часа).

При этом метод охватывает события при наличии источников в центральной и западной частях солнечного диска для корональных выбросов с развитой петлеобразной структурой или типа гало и частичного гало и высоких начальных скоростях распространения выбросов, составляющих абсолютное большинство обладающих потенциальной геоэффективностью выбросов.