



# ПРИМЕНЕНИЕ



## МИКРОВОЛНОВЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ СОЛНЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАСС ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ: С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ДИНАМИКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ (ПО НАБЛЮДЕНИЯМ МАЯ 2024 ГОДА)

**О.А. Шейнер, В.М. Фридман**

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

*[rfj@nirfi.unn.ru](mailto:rfj@nirfi.unn.ru)*

*Работа выполнена по проекту FSWR-2023-0038 в рамках базовой части  
Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.*

## Введение

Исследованию солнечных корональных выбросов массы, в том числе по их проявлениям в радиодиапазоне, в последние годы посвящено значительное число работ. Одним из важных направлений такого изучения является исследование распространения корональных выбросов в межпланетном пространстве, взаимодействия их 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  $K_p$  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 в сверхкраткосрочном прогнозе времени регистрации геоэффективных выбросов на коронографе и 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 в мае 2024 года.

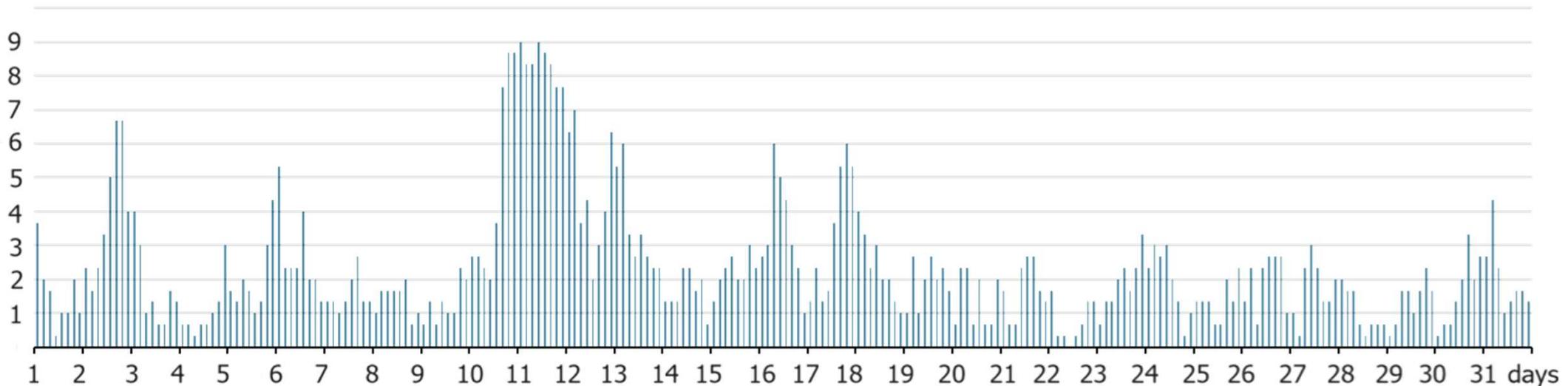
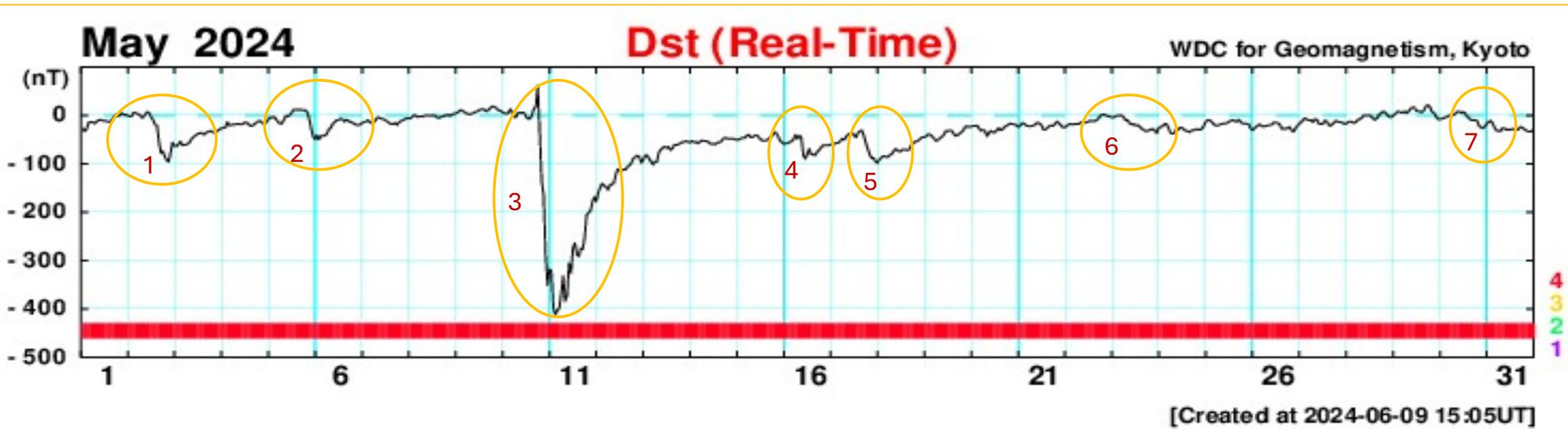
Информация о геомагнитных индексах Dst и Kp доступна на сайтах WDC for Geomagnetism, Kyoto и Helmholtz Zentrum, Potsdam, о регистрации корональных выбросов – в каталоге SOHO LASCO CME CATALOG.

Данные Мировой службы Солнца содержат 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). В анализ включены данные наблюдений радиоизлучения Солнца Кисловодской Горной астрономической станции Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН (KISV).

Для примера на рисунках 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.

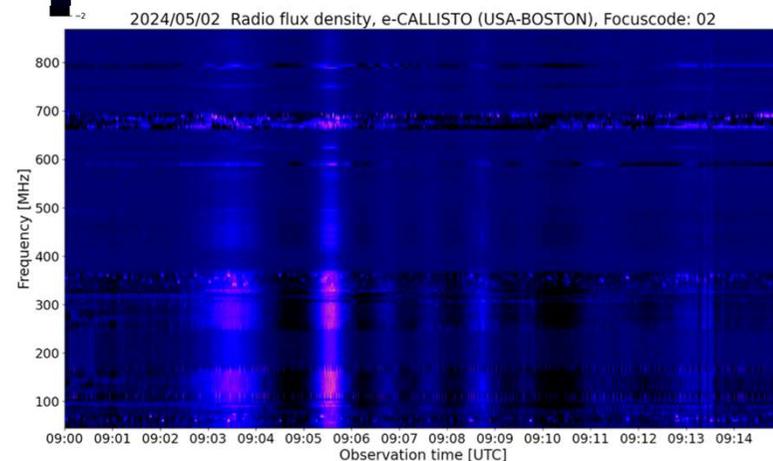
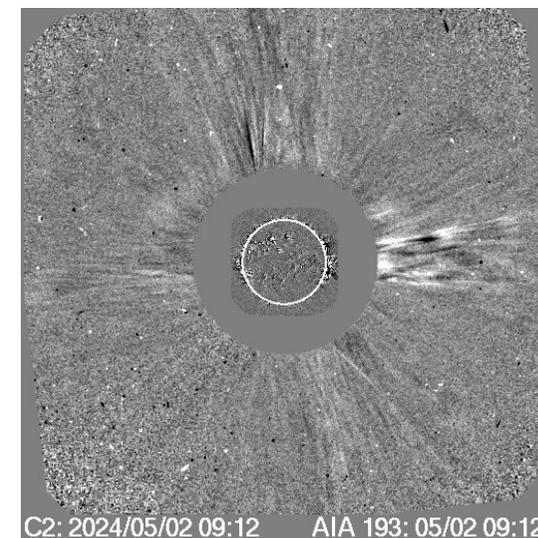
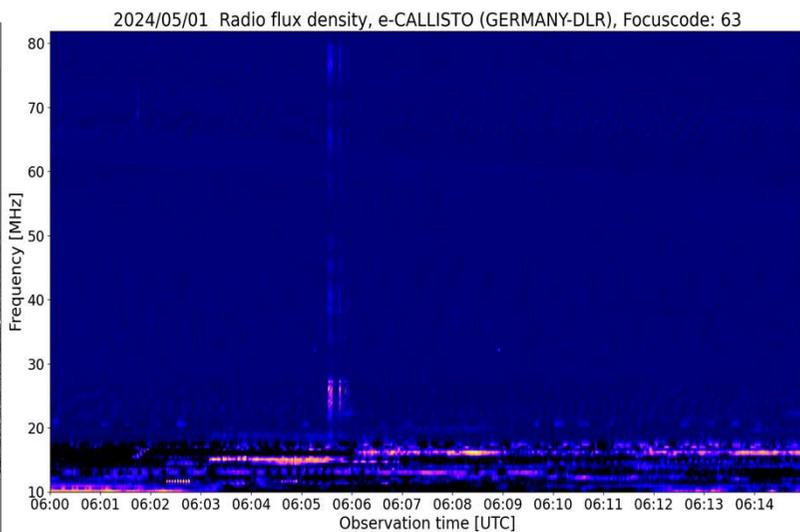
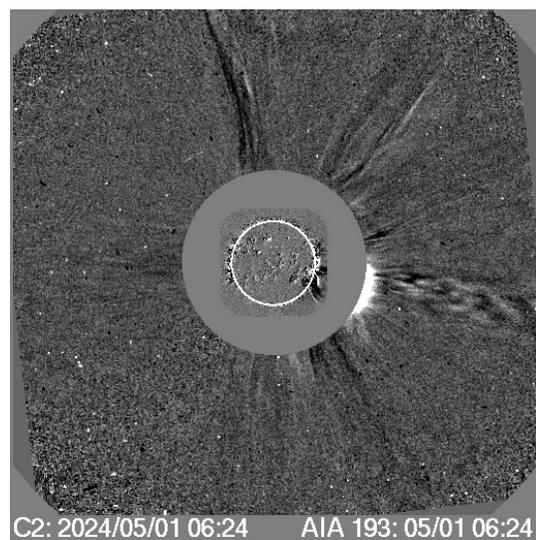
# Результаты

Май 2024 года характеризовался высокой солнечной и геомагнитной активностью: наблюдалось несколько мощных солнечных вспышек и геомагнитных бурь. На рисунке ниже приведены графики поведения Kp и Dst индексов за весь месяц.



Желтыми окружностями обозначены интервалы геомагнитных бурь различной мощности, интересующие нас. В данном докладе остановимся подробно на первых 3-х.

1. 1 мая в 06:24UT CME типа Partial Halo может дать эффект уменьшения Dst до -100 нТл. Источник выброса, скорее всего, расположен на краю солнечного диска или за ним. Поскольку радиоизлучение Солнца из центров активности, с которыми, как правило, связаны источники вспышек и КВМ, формируется на всей совокупности высот фотосферы, хромосферы и короны Солнца, то существуют возможности наблюдений за активными областями в периоды их нахождения за восточным и западным краями солнечного диска. Поэтому в данном случае микроволновые предвестники не зарегистрированы, но в низкочастотном диапазоне за 20 минут до регистрации коронального выброса наблюдается проявление формирования коронального выброса.

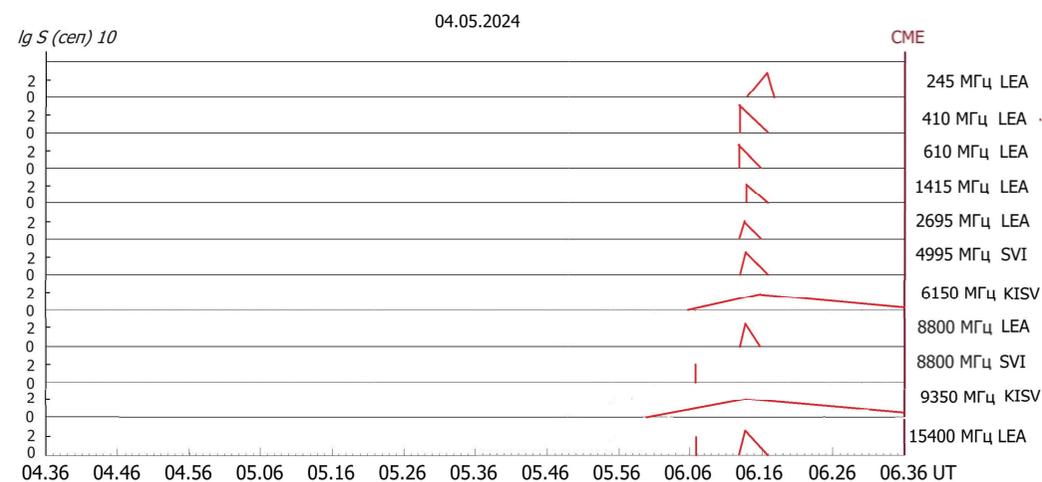
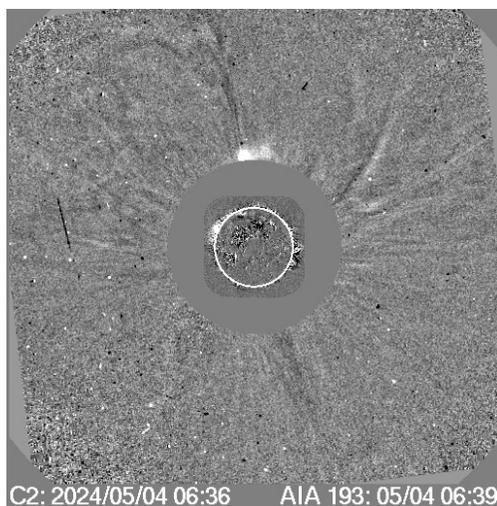
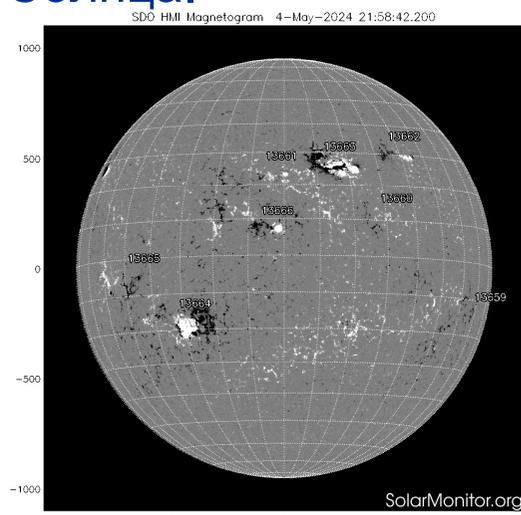


Дополнительный вклад в изменение DST 2 мая может дать корональный выброс 2 мая в 09:12UT, источник которого также расположен за лимбом. В низкочастотной части радиоизлучения регистрируются всплески VI/2.

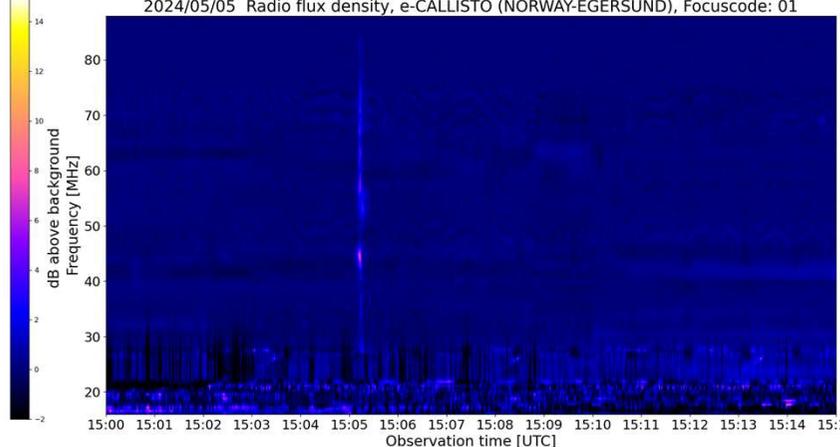
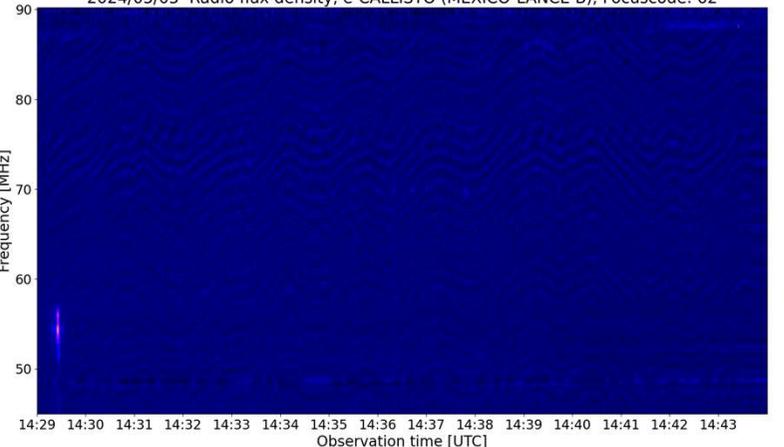
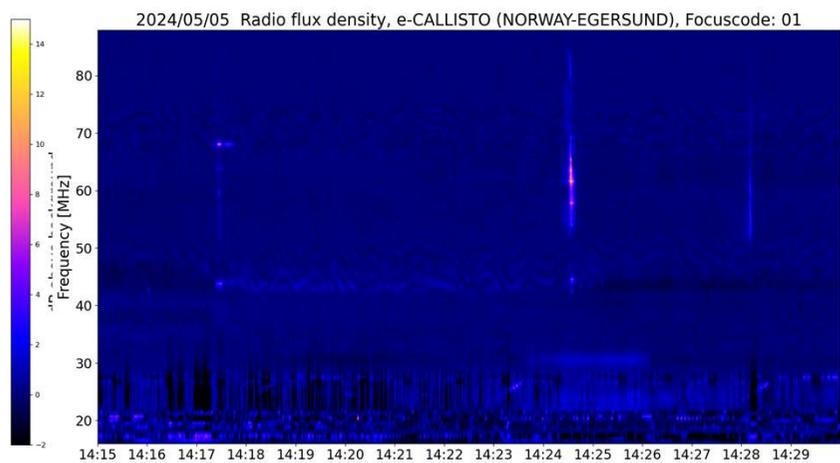
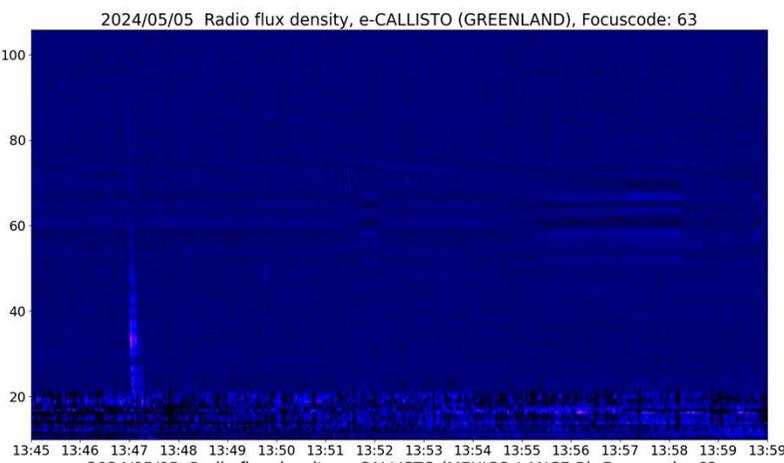
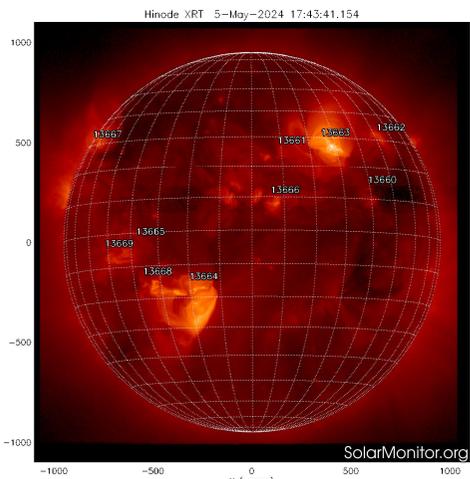
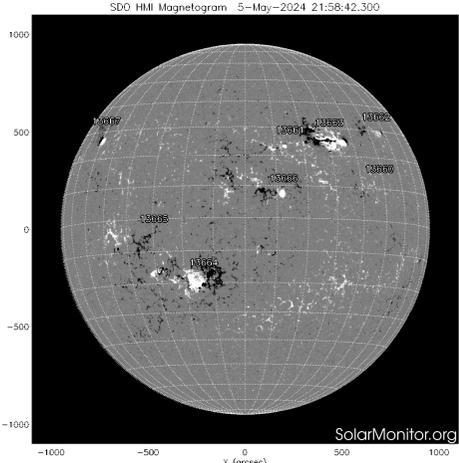
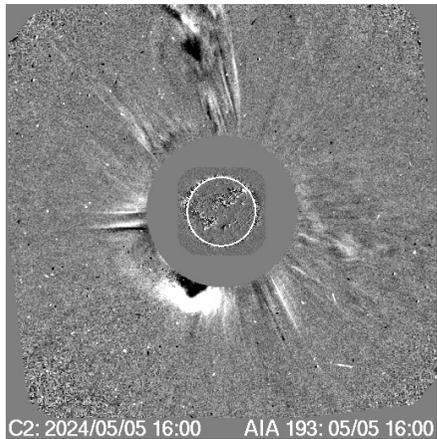
2. Уменьшение DST 5 мая может быть вызвано корональными выбросами 4 мая в 06:36 UT (Partial Halo) и 5 мая в 01:12, 07:36, 15:36 (Partial Halo) и 17:00 (Partial Halo), имеющими невысокие начальные скорости, направленные в сторону от Земли.

Совместные схемы потоков радиоизлучения, наблюдаемых на фиксированных частотах и наблюдений на спектрографах для представленных корональных выбросов типа Partial Halo, подтверждает распространение радиопредвестников во всей атмосфере Солнца.

На рисунках ниже показаны результаты анализа радиоизлучения и сопоставления с корональными выбросами массы. Источники выбросов находятся на видимой стороне Солнца.



Источник коронального выброса 05 мая в 15:36UT (Partial Halo) находится на видимой стороне Солнца, тогда как микроволновые предвестники не регистрируются, возможно, из-за очень низкой начальной скорости выброса: <500км/с.



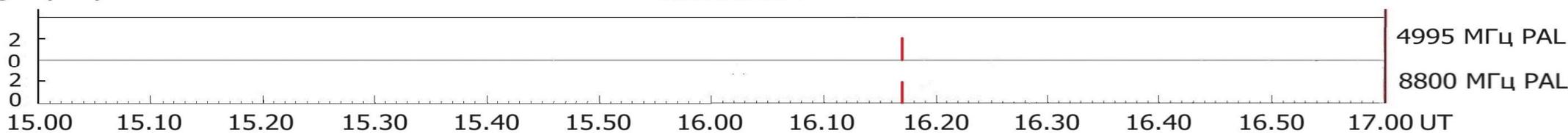
В то же время, спектрографами регистрируются всплески излучения на низких частотах ~ за 2 часа, 1 час и 30 минут.

Источник коронального выброса 17:00 (Partial Halo) также находится на видимой стороне Солнца. Микроволновые предвестники представлены на рисунке.

*Ig S (сер) 10*

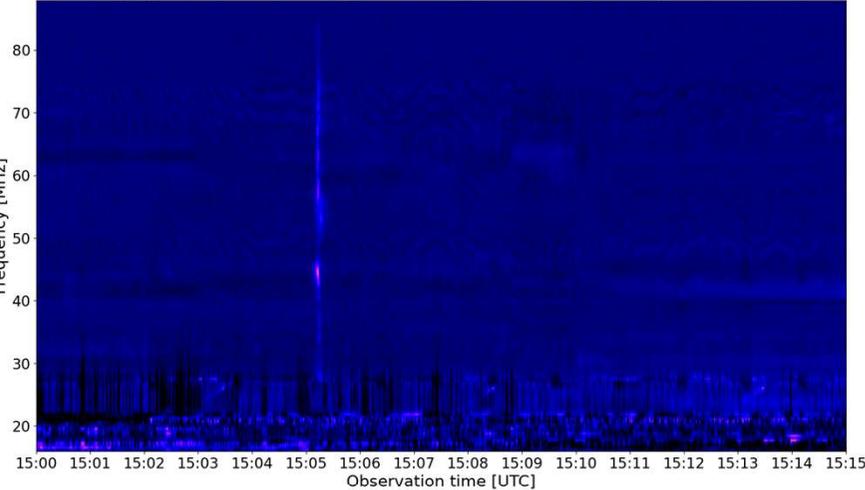
05.05.2024

CME

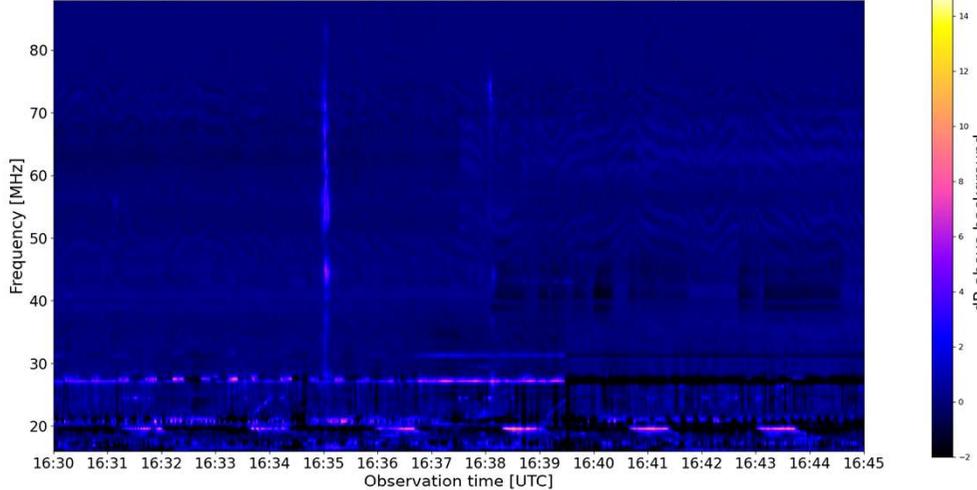


На спектрограммах видно, что на низких частотах раньше, чем на высоких, проявляется процесс зарождения коронального выброса (15:05UT). После регистрации микроволновых предвестников на низких частотах видны всплески, зарегистрированные в одно и то же время в разных пунктах радионаблюдений Солнца.

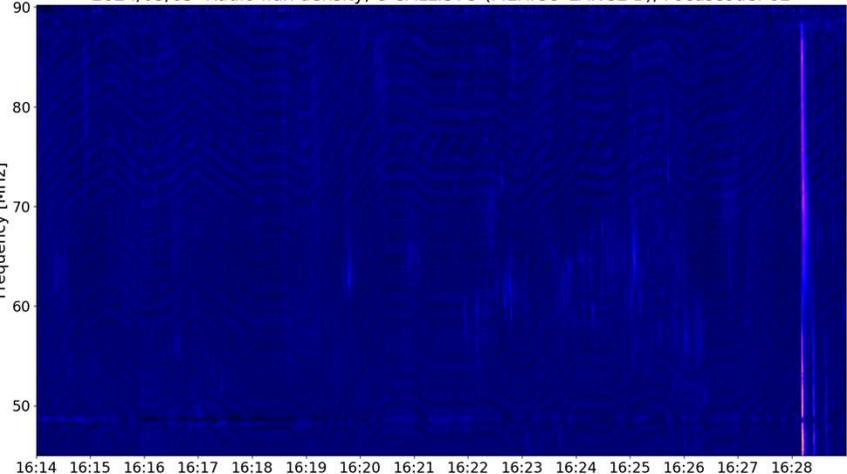
2024/05/05 Radio flux density, e-CALLISTO (NORWAY-EGERSUND), Focuscode: 01



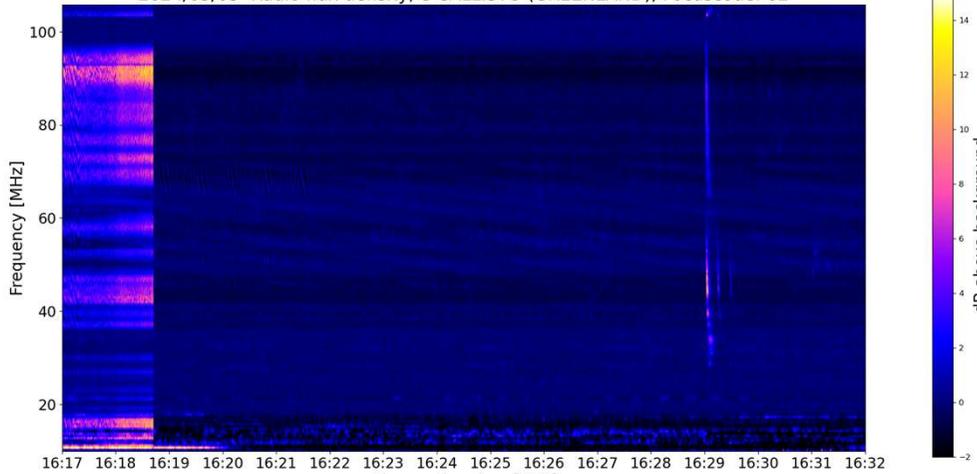
2024/05/05 Radio flux density, e-CALLISTO (NORWAY-EGERSUND), Focuscode: 01



2024/05/05 Radio flux density, e-CALLISTO (MEXICO-LANCE-B), Focuscode: 62



2024/05/05 Radio flux density, e-CALLISTO (GREENLAND), Focuscode: 62





Наиболее вероятными кандидатами явились корональные выбросы, приведенные в таблице.

First C2 Appearance Date	First C2 Appearance 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 <sup>2</sup> ]	MPA [deg]
2024/05/08	05:36:06	Halo	360	530	595	582	5.4 <sup>*1</sup>	209
2024/05/08	12:24:05	Halo	360	577	419	521	-24.9 <sup>*1</sup>	199
2024/05/08	22:24:05	Halo	360	952	959	954	0.7 <sup>*1</sup>	213
2024/05/09	09:24:05	Halo	360	1280	1170	1224	-20.6	207
2024/05/09	18:52:00	Halo	360	1024	828	343	-73.7 <sup>*1</sup>	239
2024/05/10	07:12:05	Halo	360	953	892	863	-12.3	246
2024/05/11	01:36:05	Halo	360	1614	1770	1669	28.1	304

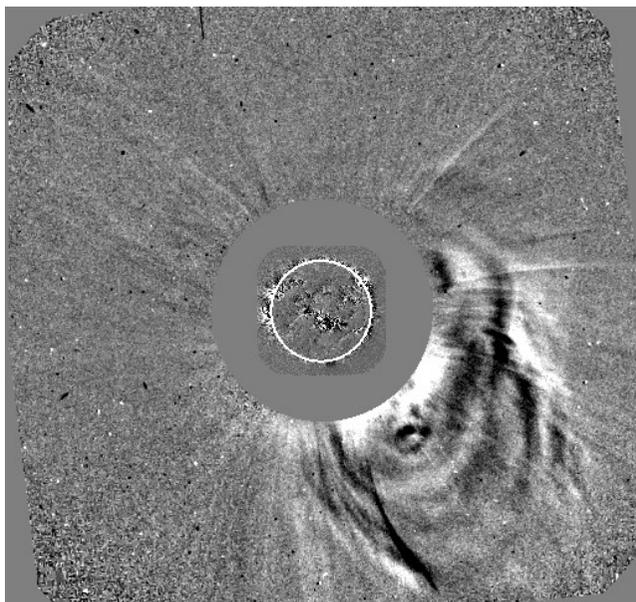
Исследования, проведенные по результатам наблюдений на STEREO A (Liu, Hu, Chen, et al., 2024), указывают на взаимодействия корональных выбросов. Предполагается, что выбросы, отмеченные зеленым в таблице, накапливались, взаимодействовали друг с другом по мере приближения к Земле и сформировали один сложный выброс. Другой сформированный сложный выброс – от слияния корональных выбросов, отмеченных желтым в таблице.

Приведем примеры радио предвестников вышеприведенных корональных выбросов массы.

2024/05/08

05:35:05

Halo

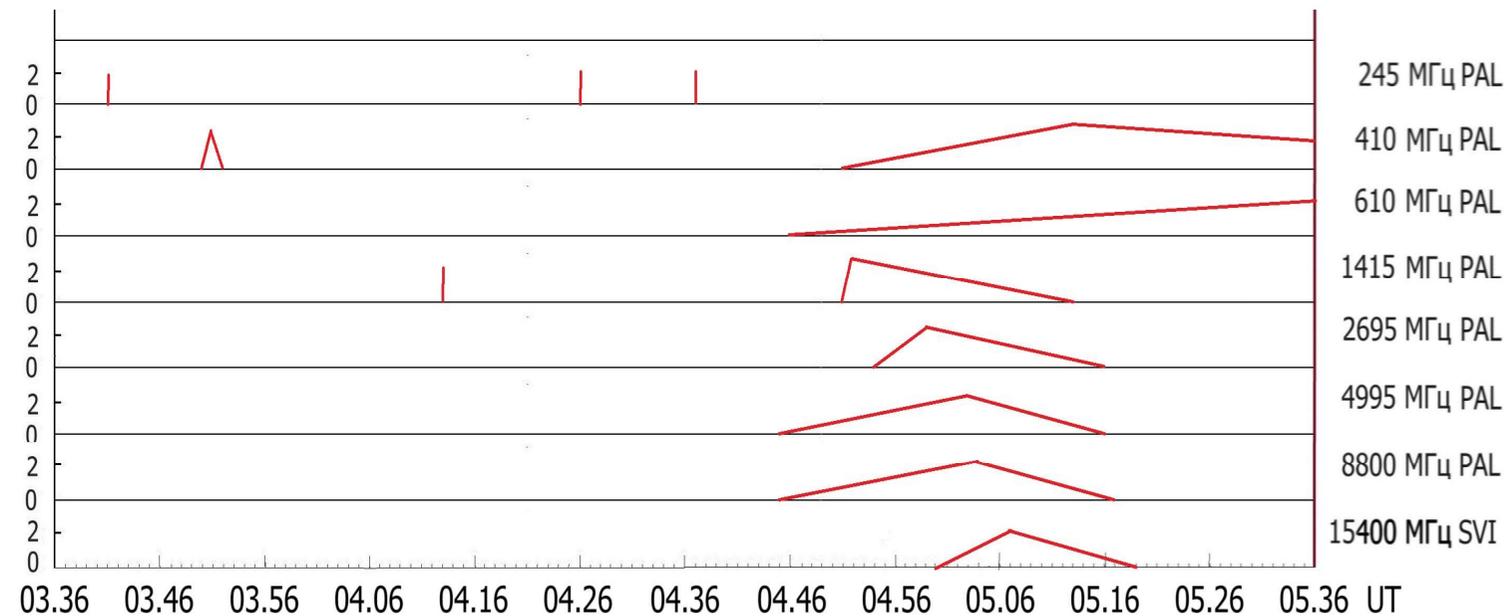


C2: 2024/05/08 05:36 AIA 193: 05/08 05:39

$lg S (cen) 10$

08.05.2024

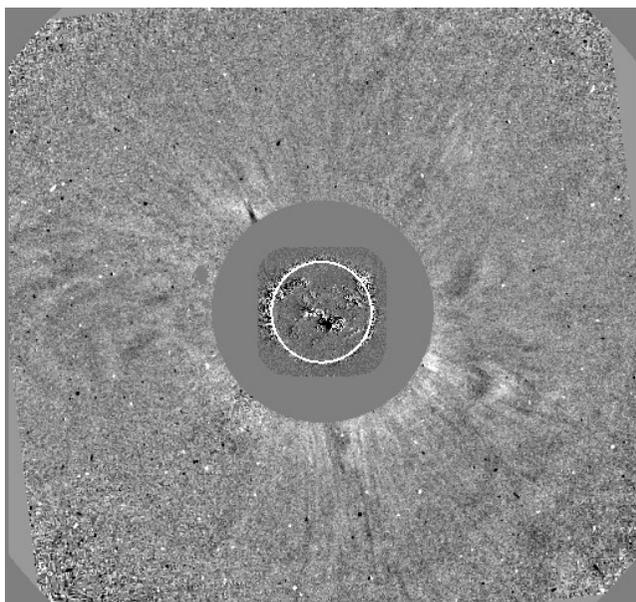
CME



2024/05/08

12:24:05

Halo

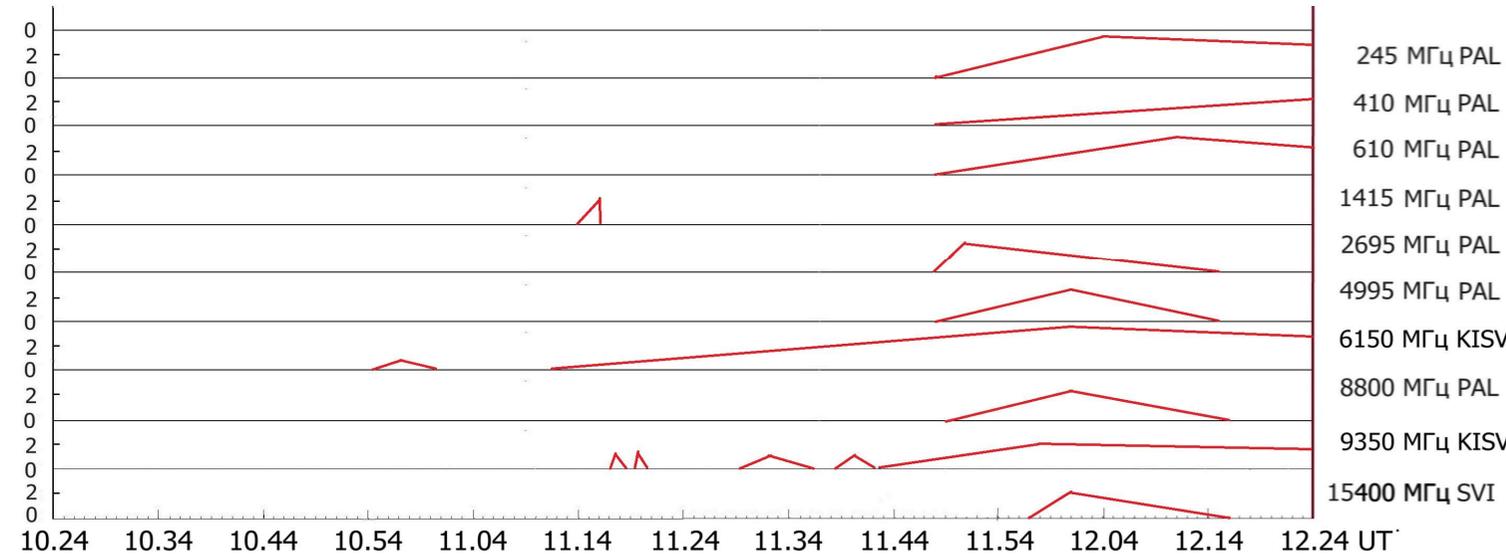


C2: 2024/05/08 12:24 AIA 193: 05/08 12:27

$lg S (cen) 10$

08.05.2024

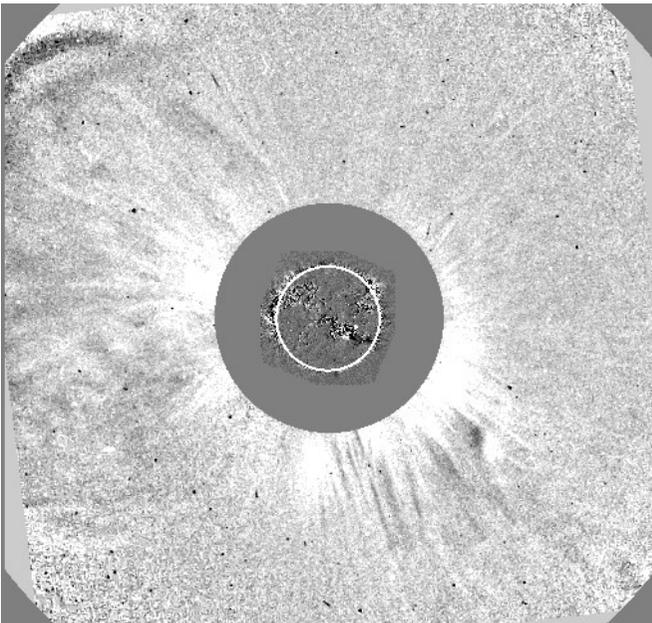
CME



2024/05/08

22:24:05

Halo

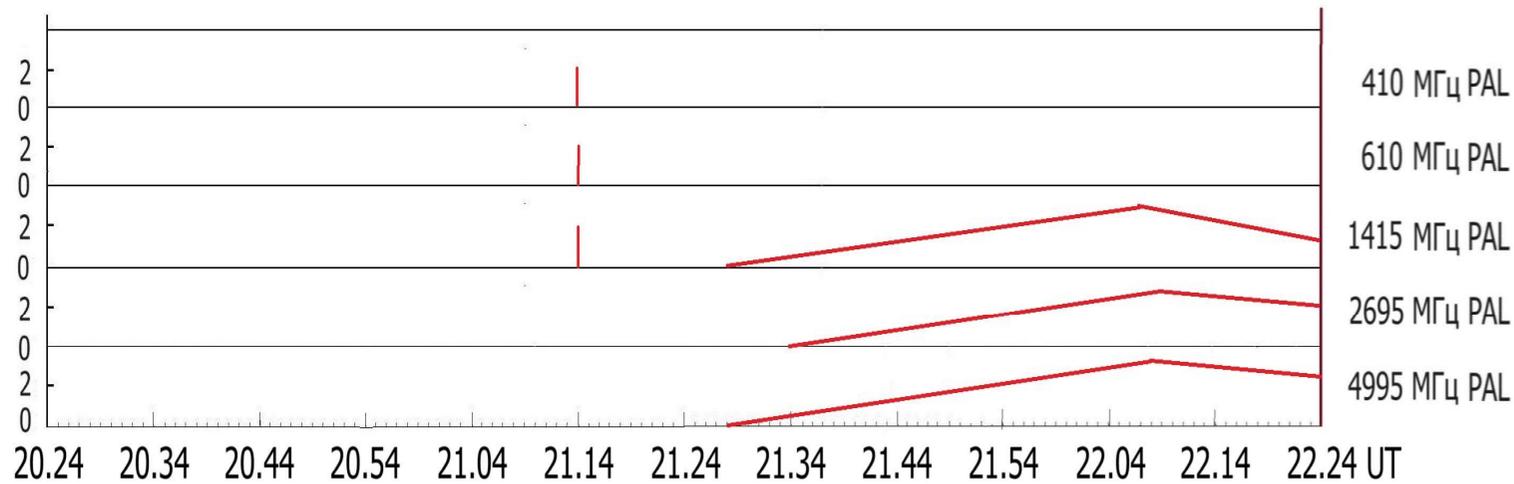


C2: 2024/05/08 22:24 AIA 193: 05/08 22:24

*lg S (cen) 10*

08.05.2024

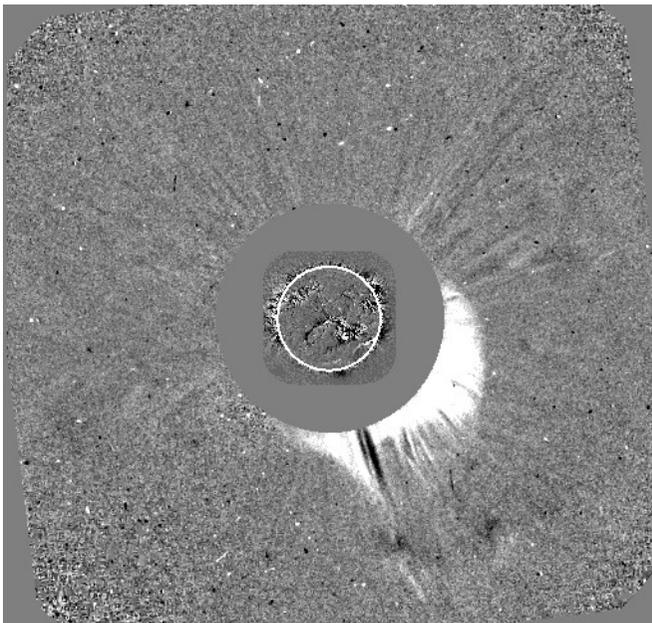
CME



2024/05/09

09:24:05

Halo

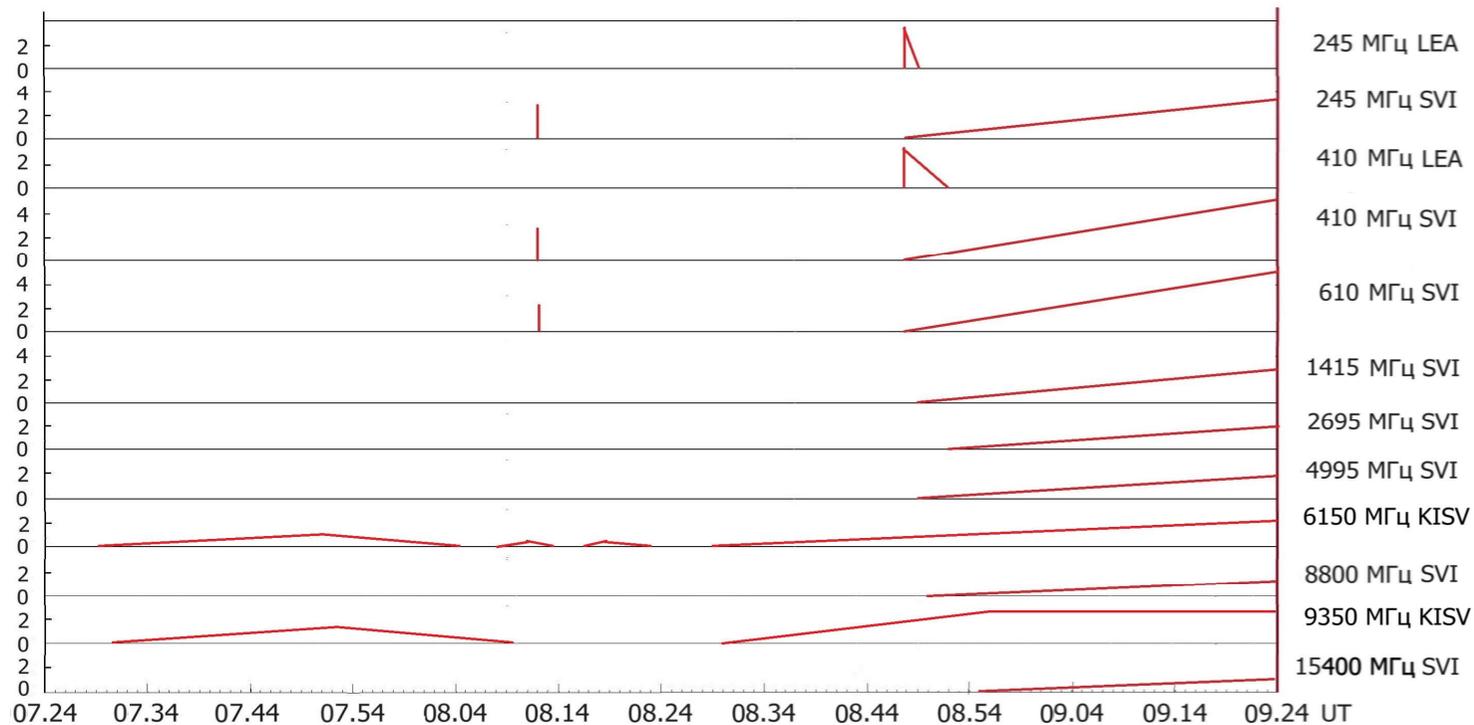


C2: 2024/05/09 09:24 AIA 193: 05/09 09:27

*lg S (cen) 10*

09.05.2024

CME

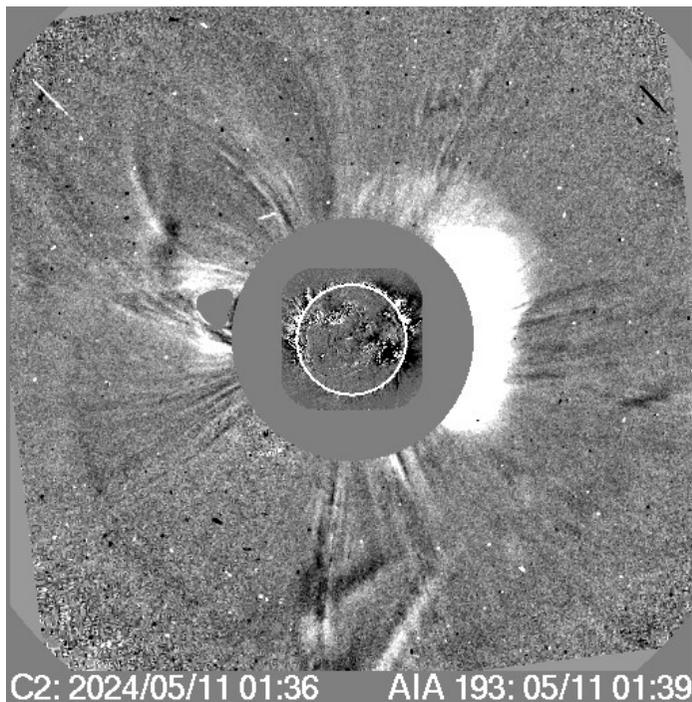




2024/05/11

01:36:05

Halo

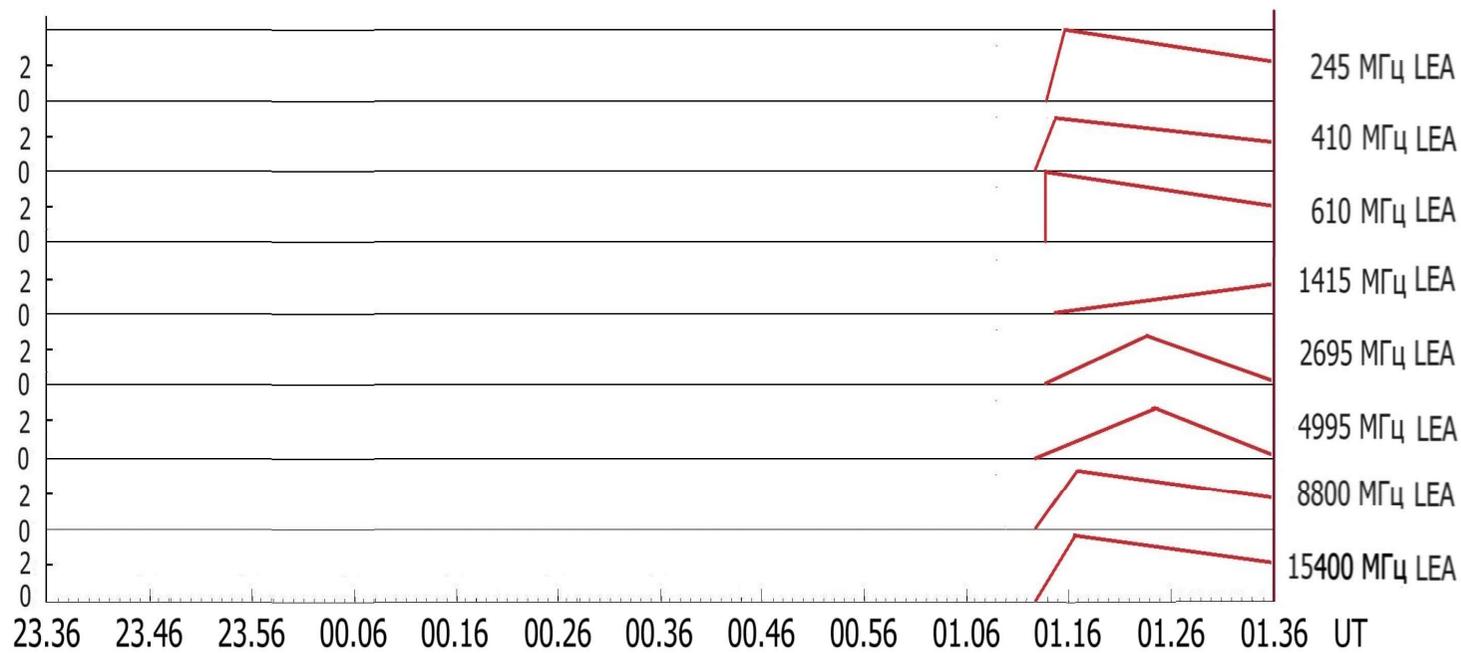


C2: 2024/05/11 01:36 AIA 193: 05/11 01:39

lg S (cen) 10

10-11.05.2024

CME



Приведенные примеры подтверждают, что корональные выбросы, влияющие на околоземное пространство, характеризуются высокой скоростью, большим углом раскрытия и тем, что солнечный источник выброса может находиться как на видимой стороне Солнца, так и на краю солнечного диска или за ним.

Таким образом видно, что корональным выбросам типа гало с источником, расположенным на видимой поверхности Солнца, предшествуют широкополосные предвестники, начинающиеся в интервале 25÷60 мин до регистрации КВМ на коронографе, при этом сами корональные выбросы массы являются высокоскоростными. Причем, постепенные микроволновые предвестники наблюдаются во всём сантиметровом и дециметровом диапазоне длин волн.

Для определенности мы рассмотрели контрольный период, когда практически не было изменений геомагнитных параметров: 25-28 мая.

В этот период корональные выбросы регистрировались, в том числе и типа гало. Есть несколько аспектов, на которые следует обратить внимание.

**Во-первых.** Наблюдались события разной сложности и мощности, происходящие на восточном краю Солнца. Корональные выбросы типа гало зарегистрированы 27 и 28 мая. Если первое из них сопровождается радиопредвестниками в широком диапазоне волн, то второе – не имеет радиопредвестников (по-видимому, источник находится еще за видимой частью диска Солнца). В обоих случаях нет изменения геофизических параметров из-за положения источника на диске. Таким образом видны ограничения по применению метода.

**Во-вторых.** Не наблюдается изменения геофизических параметров при наличии коронального выброса со слабо выраженной петлеобразной структурой и невысокими начальными скоростями ( $< 500$  км/сек) даже при их расположении в центральной и западной части диска Солнца и наличии радио предвестников в низкочастотной части спектра (всплески III типа, например, 25 и 26 мая).

**В-третьих.** Не наблюдается изменений геофизических параметров при наличии спорадического радиоизлучения на отдельных частотах широкого радиодиапазона при отсутствии корональных выбросов массы (пример: 25 и 26 мая на частотах 410 и 245 МГц).

## Выводы

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 (20 мин – 2 часа).

При этом метод охватывает события при наличии источников в центральной и западной частях солнечного диска (частично и за его пределами) 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.