



## О ВЛИЯНИИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ НА ДИНАМИКУ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ 28.03-03.04 2022

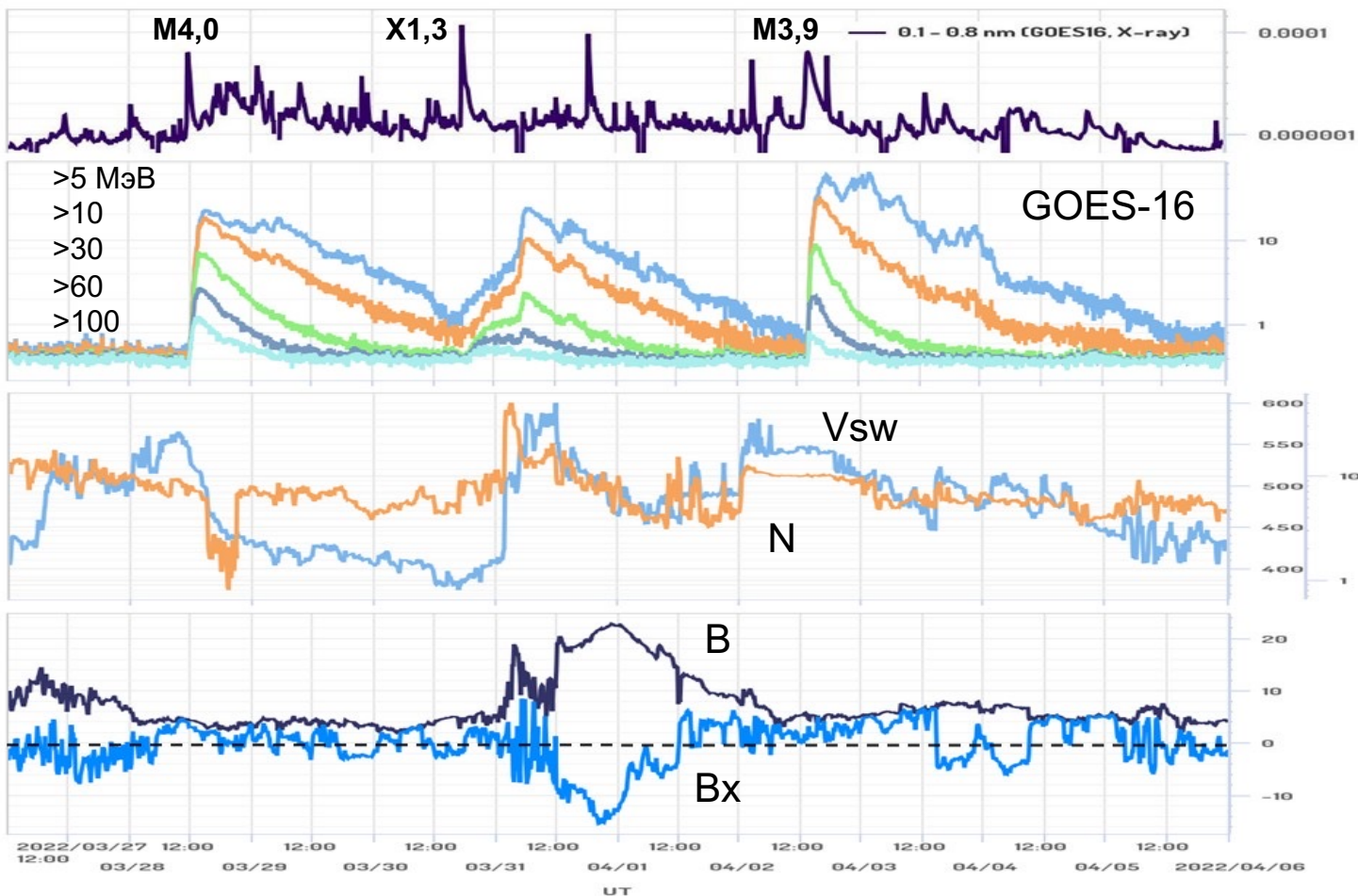
Н.А. Власова<sup>1</sup>, Г.А. Базилевская<sup>2</sup>, Е.А. Гинзбург<sup>3</sup>, Е.И. Дайбог<sup>1</sup>, В.В. Калегаев<sup>1,4</sup>,  
К.Б. Капорцева<sup>1,4</sup>, Ю.И. Логачев<sup>1</sup>, И.Н. Мягкова<sup>1</sup>

- 1 Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова
- 2 Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской Академии наук
- 3 Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова
- 4 Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

г. Москва, Россия

Представлены результаты исследования трех последовательных солнечных протонных событий 28.III, 30.III и 02.IV 2022 г., ассоциированных с солнечными вспышками рентгеновского класса M4.0, X1.3 и M3.9, соответственно. Работа сделана на основе экспериментальных данных, полученных с космических аппаратов, расположенных в межпланетном пространстве (ACE, WIND, STEREO-A, Solar Orbiter), на околоземной полярной орбите на высоте 850 км (Метеор-M2) и на геостационарной орбите (GOES-16, Электро-Л2). Результаты сравнительного анализа временных вариаций потоков солнечных протонов в МэВ-ном диапазоне энергий и характеристик солнечного ветра и межпланетного магнитного поля согласуются с предположением, что основными источниками энергичных частиц были солнечные вспышки. Хотя родительские вспышки событий 28.III и 02.IV произошли на разных гелиодолготах (W04 и W68, соответственно), временные профили потоков протонов этих событий близки, так как частицы распространялись на фоне достаточно спокойного межпланетного магнитного поля. Вспышки 28.III и 30.III произошли в одной активной области. Значительные отличия временного профиля потоков протонов 30.III от профиля 28.III вызваны значительными возмущениями межпланетной среды.

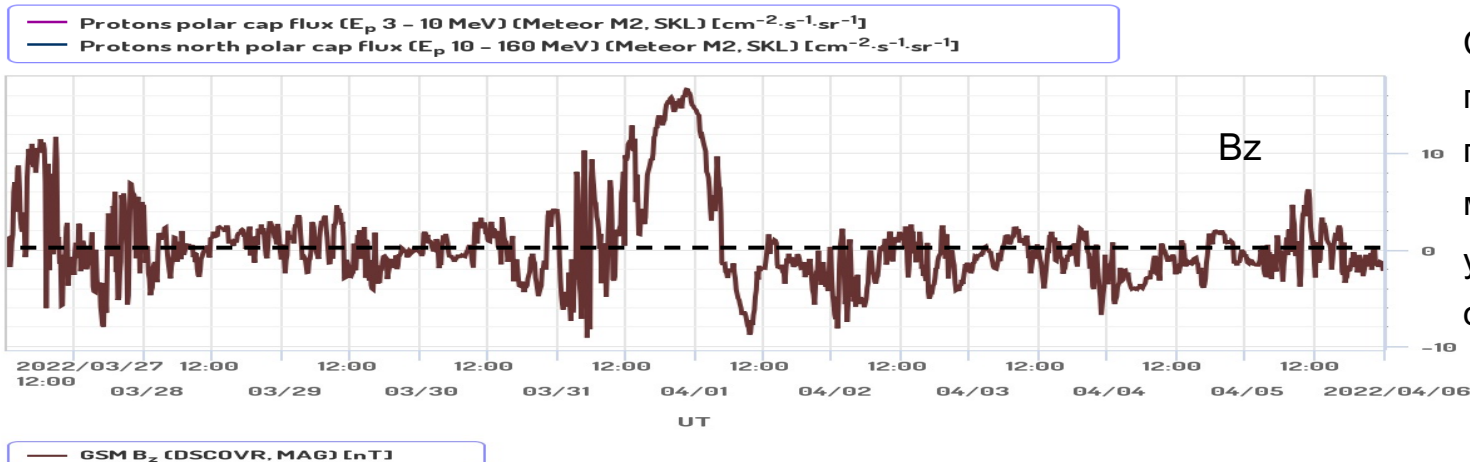
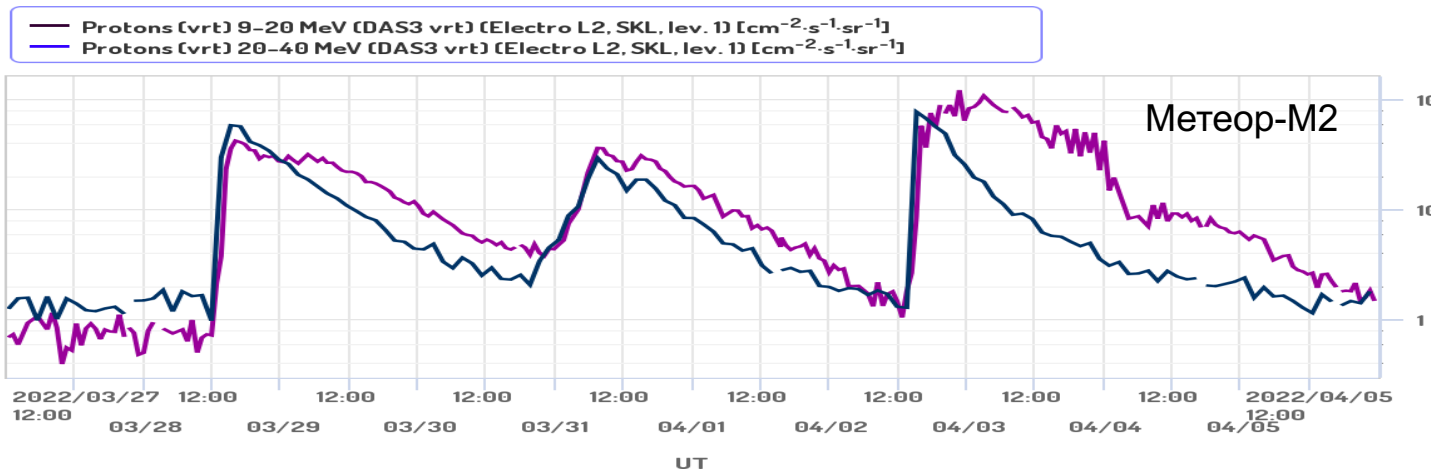
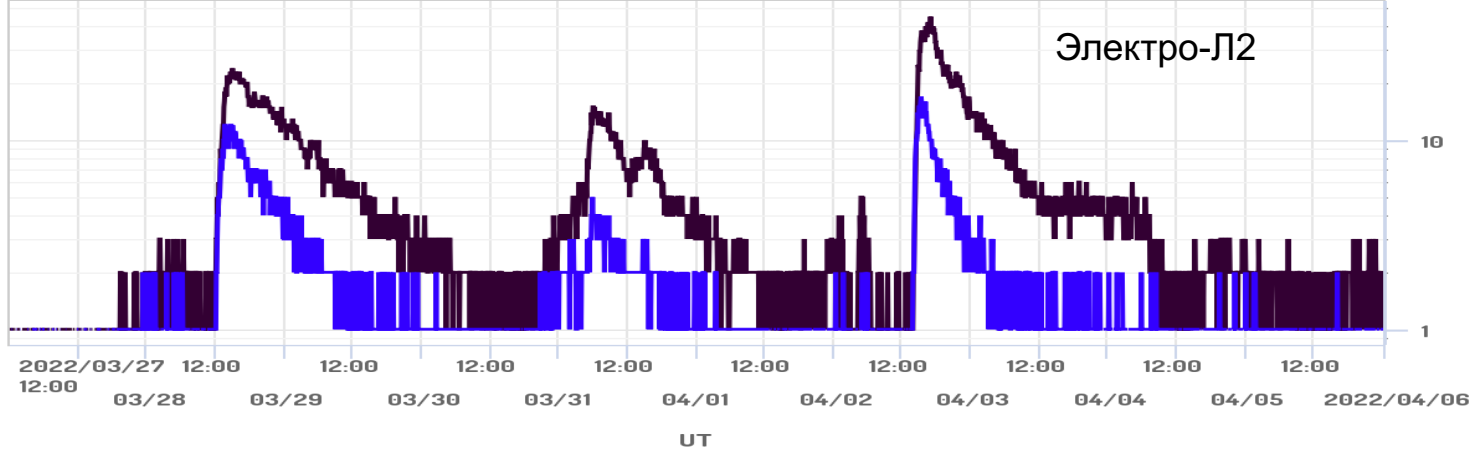
Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Ядерная и радиационная физика»).



Временные профили рентгеновского излучения Солнца и потоков солнечных протонов по данным ИСЗ GOES-16, скорости и плотности солнечного ветра, модуля и  $B_x$  компоненты ММП по данным КА DSCOVR 27.03-05.04 2022 г.

Времена прихода ударных волн в ОКП взяты с сайта [<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEscoreboard/>]

| Солнечные вспышки |       |            |      | Корональные выбросы массы |          |        |                      |           | АО    | Времена прихода ударных волн в ОКП, дата и UT |
|-------------------|-------|------------|------|---------------------------|----------|--------|----------------------|-----------|-------|---|
| Дата              | UT    | координаты | балл | Дата                      | UT       | V км/с | $\Delta\phi$ , град. | PA, град. |       |   |
| 28.03.2022        | 10:58 | N14W04     | M4,0 | 28.03.2022                | 12:00:05 | 702    | 360                  | Halo      | 12975 | 31.03 01:41                                   |
| 28.03.2022        | 19:08 | N14W07     | M1.0 | 28.03.2022                | 20:24:05 | 905    | 360                  | Halo      | 12975 | 31.03 01:41                                   |
| 30.03.2022        | 17:21 | N13W31     | X1,3 | 30.03.2022                | 18:00:05 | 641    | 360                  | Halo      | 12975 |   |
| 02.04.2022        | 12:56 | N12W68     | M3,9 | 02.04.2022                | 13:36:05 | 1433   | 360                  | Halo      | 12976 |   |



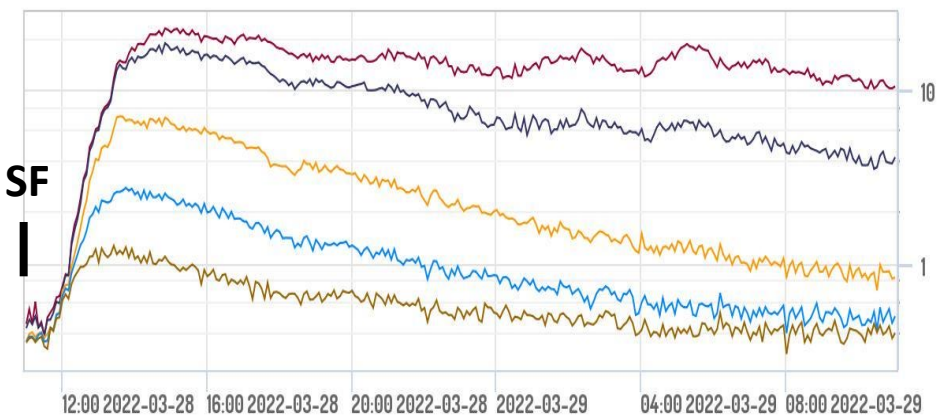
Временные профили потоков солнечных протонов по данным геостационарного ИСЗ Электро-Л2 и полярного ИСЗ Метеор-М2 (850 км) и  $B_z$  компоненты ММП по данным КА DSCOVR 27.03-05.04 2022 г.

Данные полярного ИСЗ Метеор-М2 свидетельствуют о том, что особенности временного профиля СПС 30.03 не связаны с проникновением протонов в магнитосферу Земли в условиях северной ориентации ММП.

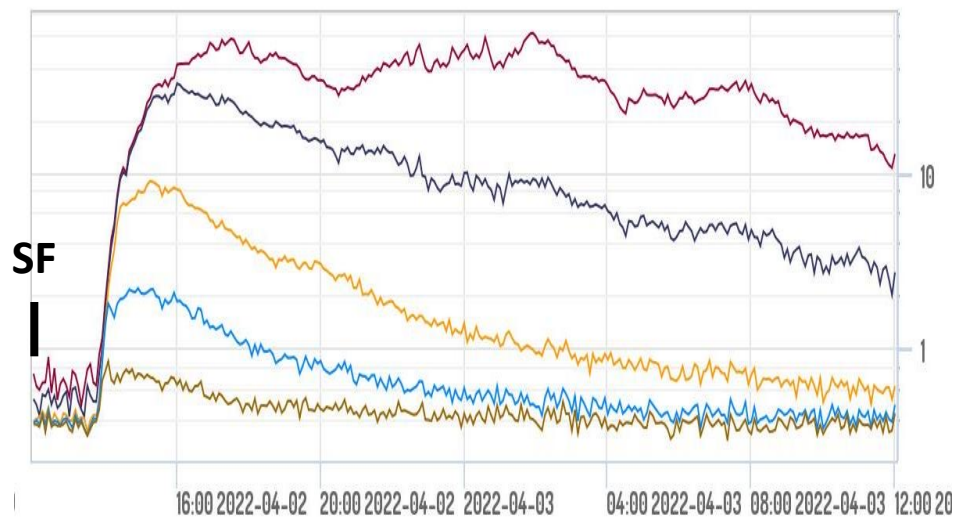
Временные профили потоков протонов с энергией >5, >10, >30, >60 и >100 МэВ по данным ИСЗ GOES-16

СПС 28.03.2022 (M4.0, N14W04)

СПС 02.04.2022 (M3.9, N12W68).



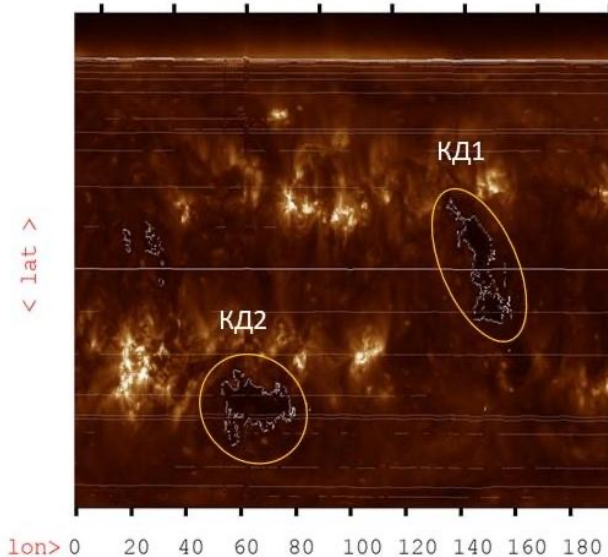
11:00 UT 28.03 - 11:00 UT 29.03 2022 г.



12:00 UT 02.04 - 12:00 UT 03.04 2022 г.

CR2255 (starts on 2022-03-07)

< dt 03 01 30 28 26 24 22 20

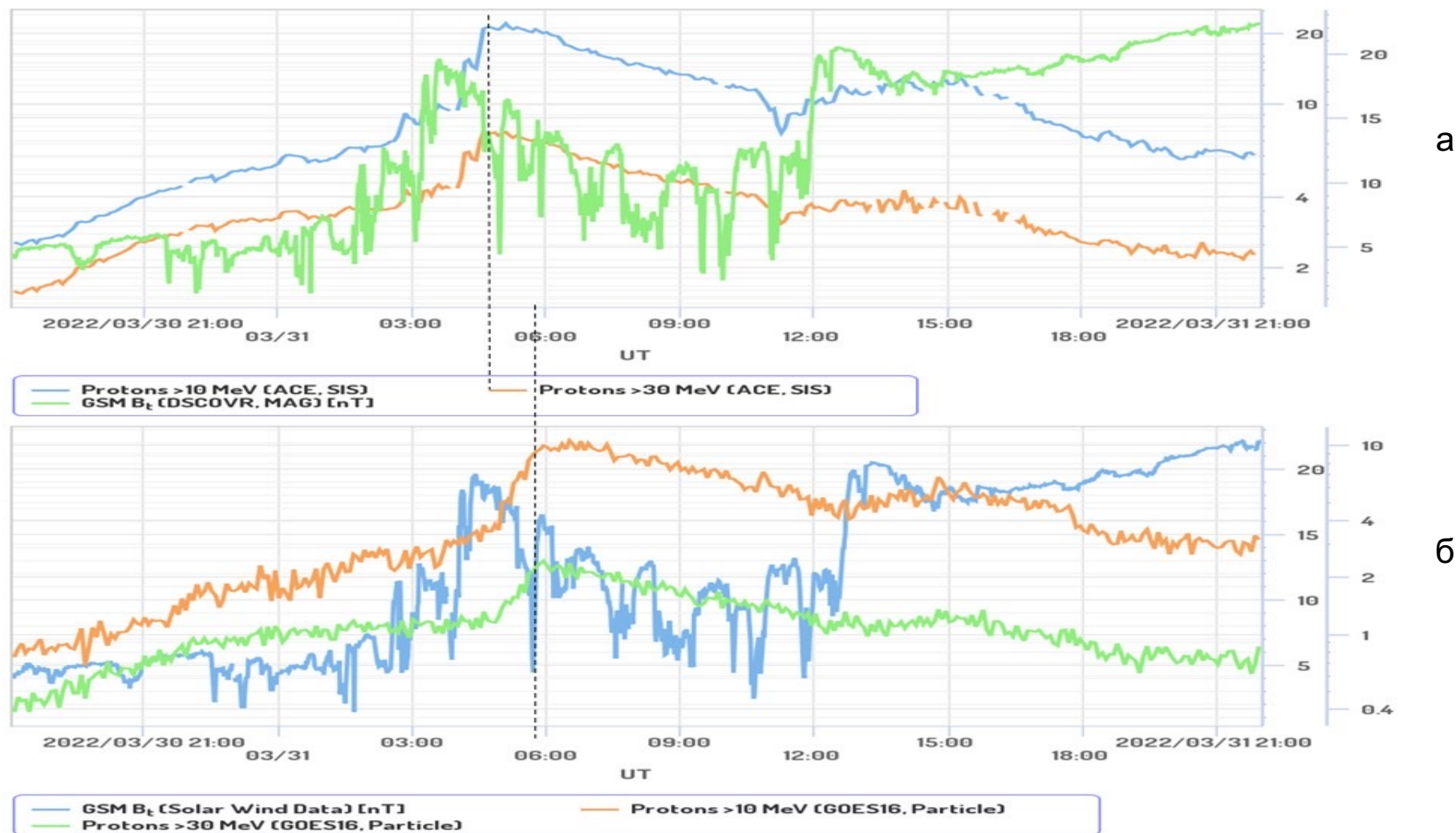


| Дата       | Коорд. | SF   | To (SF)  | To (>100 МэВ) | ΔТ      |
|------------|--------|------|----------|---------------|---------|
| 28.03.2022 | N14W04 | M4,0 | 10:58 UT | 11:40 UT      | 42 мин. |
| 02.04.2022 | N12W68 | M3,9 | 12:56 UT | 13:50 UT      | 54 мин. |

Корональная карта по данным SDO/AIA на длине волны 19.3 нм для Кэррингтоновского оборота 2255  
[<https://swx.sinp.msu.ru/>

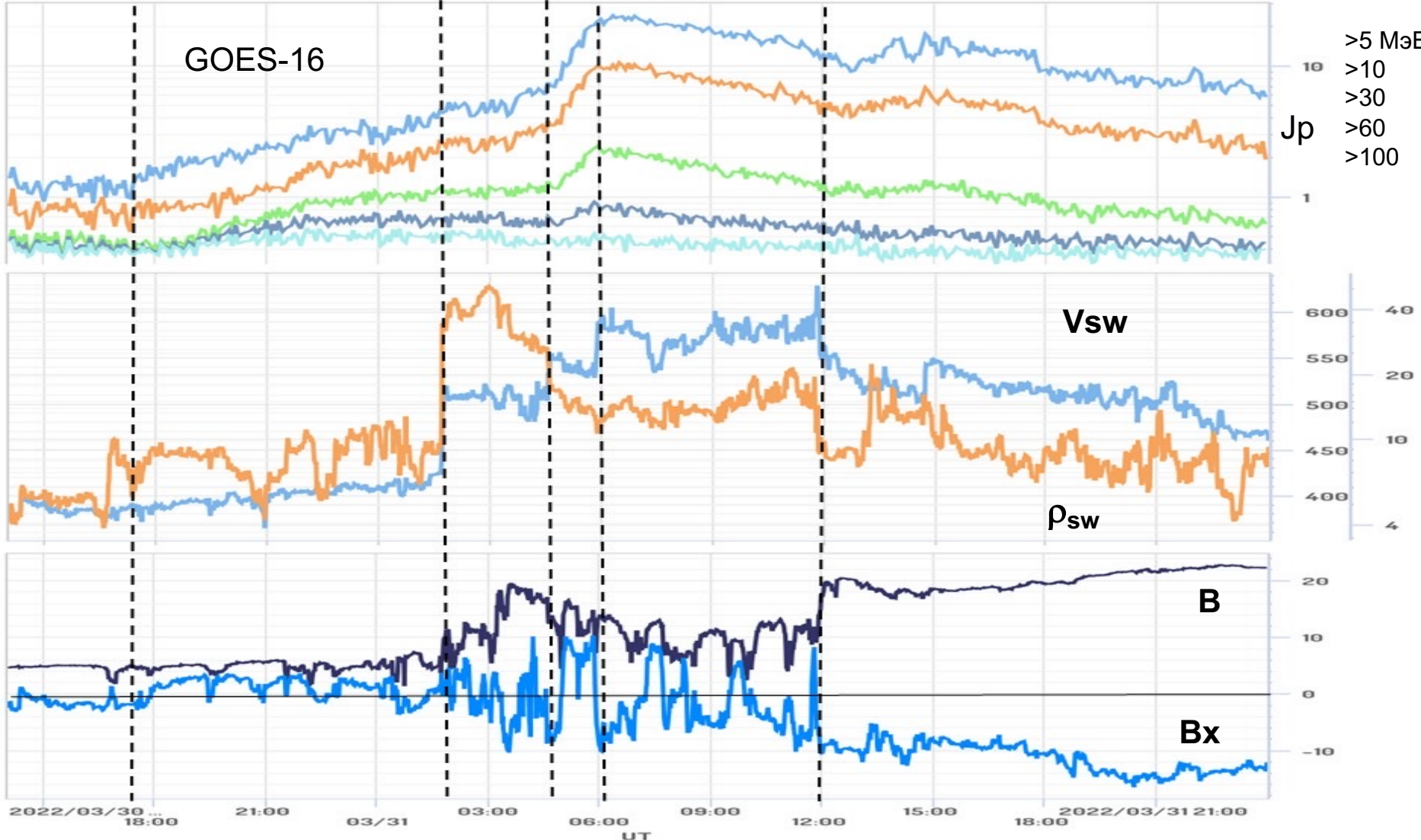
Относительно медленный приход протонов и крутой передний фронт возрастных потоков с долгот W04 и W68 может быть объяснен корональным распространением и последующим распространением в межпланетной среде вместе с высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр КД1 и КД2, соответственно.

СПС 30.03.2022 (X1.3, N13W31). Временные профили потоков солнечных протонов и модуля ММП в точке L1 (а) и на геостационарной орбите (б) с 18:00 UT 30.03 по 22:00 UT 31.03 2022 г.



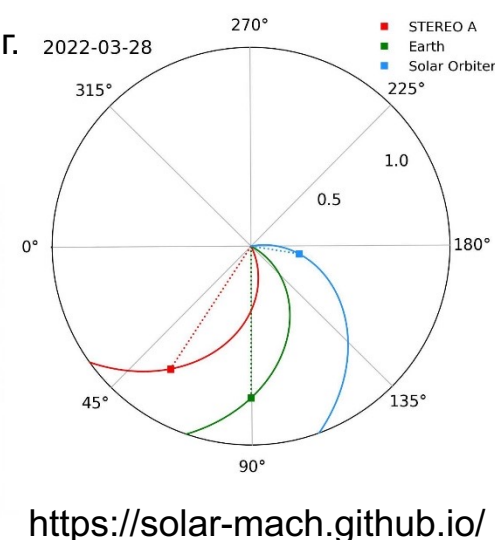
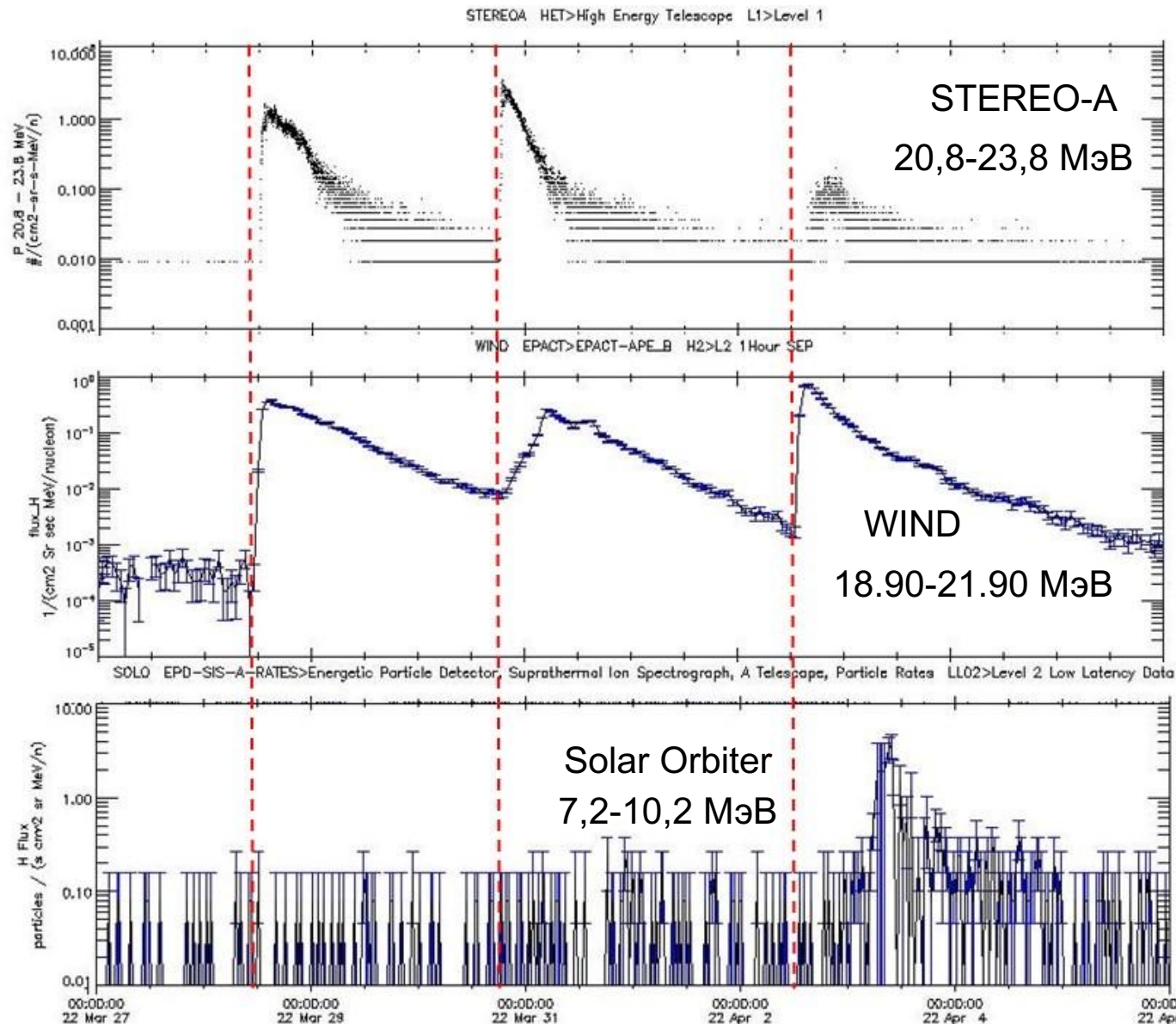
Можно видеть, что максимумы потоков протонов по данным ИСЗ GOES-16 (б), отмеченные вертикальными штриховыми линиями, так же как и вариации величины ММП (б), сдвинуты по времени примерно на 1 час – на время, необходимое солнечному ветру для преодоления расстояния от точки L1 до орбиты Земли. Это свидетельствует о переносе потоков частиц **внутри гелиосферных структур**.

СПС 30.03.2022 (X1.3, N13W31). Временные профили потоков солнечных протонов по данным ИСЗ GOES-16, скорости и плотности СВ, модуля и Vx компоненты ММП (в) на 1 а.е. с 14:00 UT 01.04 до 00:00 UT 02.04 2022 г.



Вертикальными пунктирными линиями отмечены моменты быстрых изменений величин параметров солнечного ветра и ММП. Можно видеть, что «изломы» в профиле потоков протонов соответствуют сильным вариациям скорости и плотности солнечного ветра и/или модуля и Vx компоненты ММП.

[<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>].



Особенности профиля СПС 30.03.2022, зарегистрированного на КА WIND, объясняются приходом протонов вместе с ударной волной и внутри структуры магнитного облака от КВМ 28.03

Начала регистрации потоков протонов на КА WIND, находящемся в точке L1, отмечены вертикальными штриховыми линиями.



## *Заключение*

Проведено исследование солнечных протонных событий (СПС) 28.III, 30.III и 02.IV 2022 г. Результаты сравнительного анализа временных вариаций потоков солнечных протонов в МэВ-ном диапазоне энергий и характеристик солнечного ветра и межпланетного магнитного поля не противоречат предположению о том, что солнечные вспышки были основными источниками энергичных частиц, а особенности профилей потоков частиц могут быть объяснены в рамках существующих моделей распространения солнечных энергичных протонов.

Относительно медленный приход потоков протонов и крутой передний фронт возрастания потоков 28.III и 02.IV с долгот W04 и W68 могут быть объяснены корональным распространением и последующим распространением в межпланетной среде вместе с высокоскоростными потоками солнечного ветра из двух корональных дыр, проходящих через центральный меридиан Солнца 24.03 и 29-30.03.

Особенности профиля СПС 30.III.2022, зарегистрированного в точке L1 и в околоземном космическом пространстве, объясняются приходом протонов вместе с ударной волной и внутри структуры магнитного облака от KBM 28.03.