



# ОСОБЕННОСТИ ОТКЛИКА ИОНОСФЕРЫ РАЗНЫХ ВЫСОТ НА НЕРЕГУЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

О.А. Шейнер<sup>1</sup>, Ф.И. Выборнов<sup>1,2</sup>

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

*2 ФГБОУ ВО «ВГУВТ», Нижний Новгород*

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

*Работа выполнена по проекту № 0729-2020-0057 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 (CME) и высокоскоростные потоки солнечного ветра (HSS), скорее всего, оказывают наибольшее влияние на характеристики ионосферы. Непосредственная реакция  $f_0F2$  и максимальной наблюдаемой частоты для траекторий наклонного зондирования (МНЧ) на высокоскоростные потоки солнечного ветра и корональные выбросы массы подробно рассмотрена в *Sheiner, et al. Adv. Space Res. 2020.*

# 1. Данные

В исследовании используются данные вертикального зондирования ионосферы, полученные из регулярных наблюдений в среднеширотной ионосферной и радиоастрономической обсерватории НИРФИ ННГУ «Васильсурск» ( $56.15^\circ$  с.ш.,  $46.10^\circ$  в.д., близ Нижнего Новгорода) в октябре-ноябре 2021г..

В обсерватории установлен усовершенствованный цифровой ионозонд (CADI) ([www.sil.sk.ca](http://www.sil.sk.ca)), а рабочая программа регулярных наблюдений позволяет получать ионограммы не реже одного раза в 15 мин.



Выходная мощность ионозонда составляет 600 Вт, он работает в режиме импульсного кодирования с использованием 13-битного кода Баркера с усреднением по 4 принятым импульсам. Такой режим работы ионозонда позволяет получать качественные ионограммы даже в условиях сильного поглощения радиоволн в ионосфере. Точность определения критической частоты

менее 50 кГц. Данные вертикального зондирования ионосферы дают самые высокие частоты отражения от различных слоев ионосферы, критические частоты этих слоев. Нами рассматривались массивы данных  $f^oE$ ,  $f^oEs$  и  $f^oF2$  (в МГц).



## 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 ( $\Delta f_0F2$ ).

При регулярных наблюдениях ионограммы регистрируются каждые 15 мин. Это обеспечивает непрерывную временную запись критических частот в течение дня. Каждое измеренное значение отмечается как  $f_{0jk}$ , где  $j$  – номер точки в течение дня,  $k$  – номер дня в месяце. Девиация критических частот ионосферы рассчитывается как:

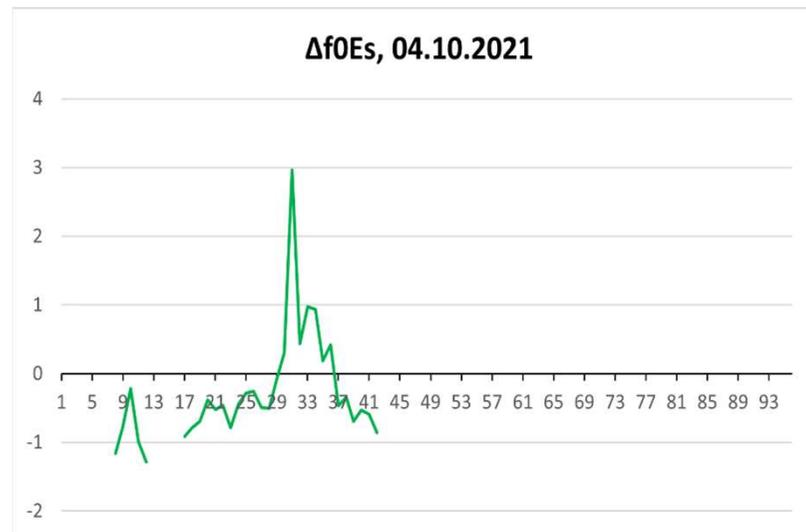
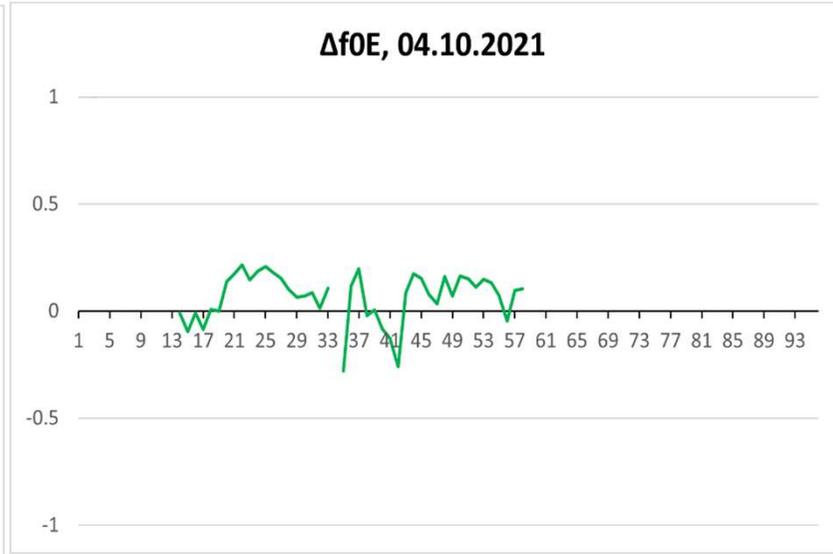
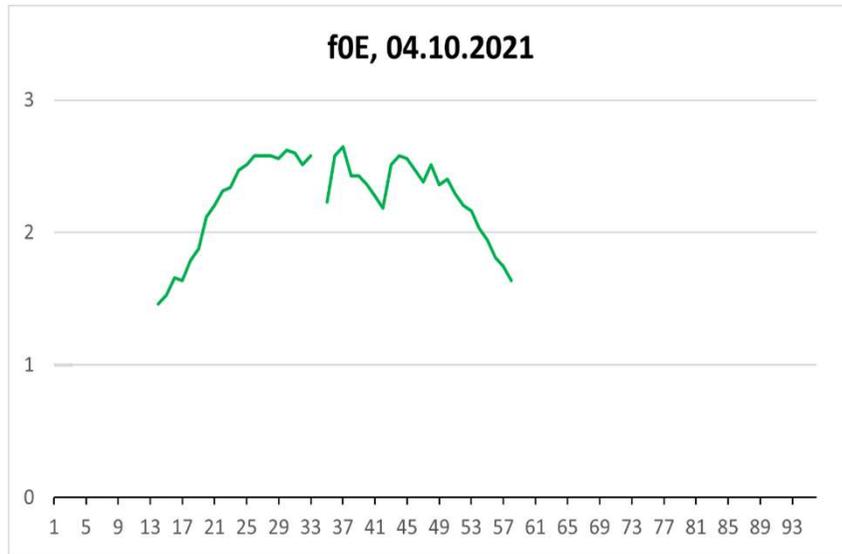
$$\Delta f_{0jk} = f_{0jk} - \overline{f_{0j}}, \quad \text{где}$$
$$\overline{f_{0j}} = \sum_{k=1}^N f_{0jk} / N, \quad N - \text{количество дней в месяце}$$

Для изучения отклика ионосферы на нерегулярные мощные явления солнечной активности: корональные выбросы массы (CME) и высокоскоростные потоки солнечного ветра (HSS) - мы используем данные о регистрации корональных выбросов массы со спутника SOHO ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)) и о скорости протонов солнечного ветра со спутника ACE RTSW (<http://www.srl.caltech.edu/ACE>).

Отметим, ранее были исследованы возмущения критической частоты ионосферного слоя F2 ( $\Delta f_0F2$ ). Исследования возмущений критических частот  $f_0E$  и  $f_0Es$  вышеизложенным методом проводятся впервые.

Дифференциальный параметр, предлагаемый нами для исследования данных вертикального зондирования ионосферы, позволяет повысить чувствительность и устранить стационарные зависимости (например, исключить суточное поведение).

Иллюстрация применения метода для наблюдения критических частот слоев E и Es приведена ниже.

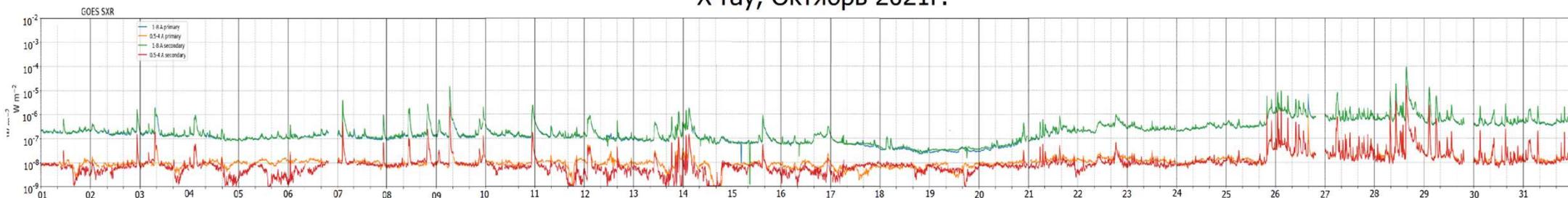


В поведении критической частоты слоя E исключено суточное поведение частоты. Для слоя Es суточное поведение отсутствует, вследствие применения метода понизился общий уровень. Поэтому для исследований рассматривался временной ход  $f0Es$ .

# 3. Обстановка на Солнце и в околоземном пространстве

В течение октября месяца наблюдались солнечные вспышки разной интенсивности, корональные выбросы массы и высокоскоростные потоки солнечного ветра ( $V > 600$  км/с), которые вызвали возмущения магнитного поля Земли.

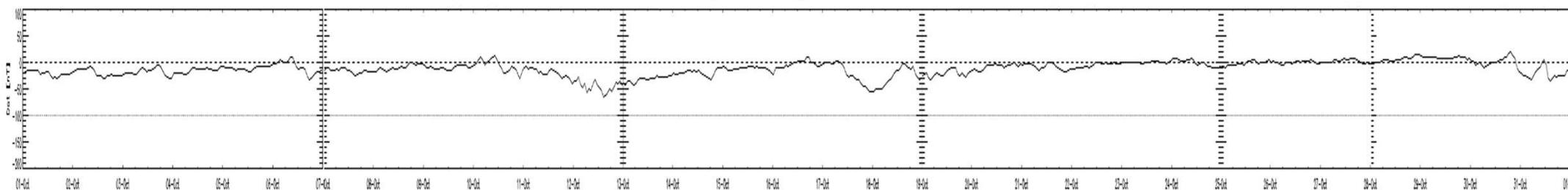
X-ray, Октябрь 2021г.



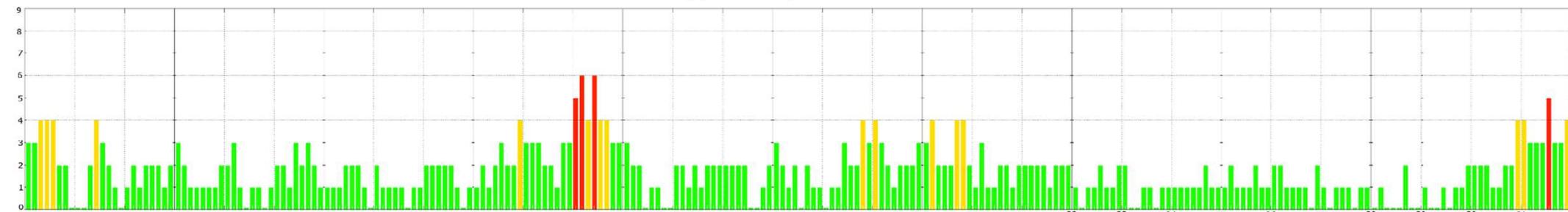
HSS, Октябрь 2021г.



DST, Октябрь 2021г.

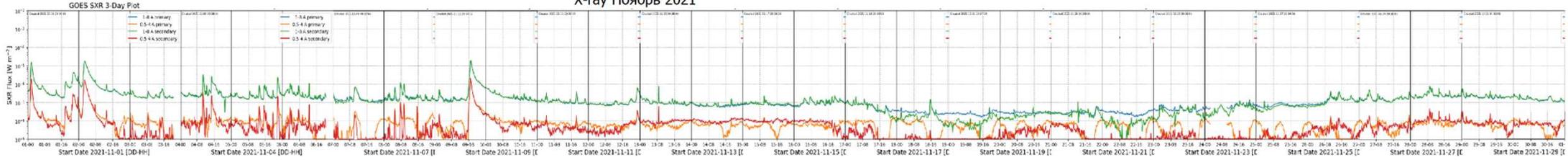


Kp, Октябрь 2021г.

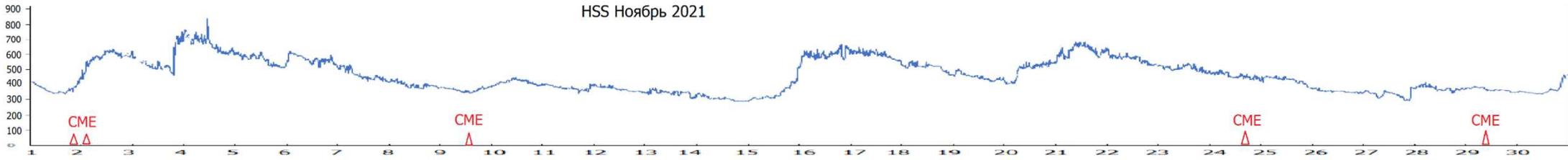


В ноября месяце также наблюдались солнечные вспышки разной интенсивности, корональные выбросы массы и высокоскоростные потоки солнечного ветра ( $V > 800$  км/с), которые вызвали возмущения магнитного поля Земли..

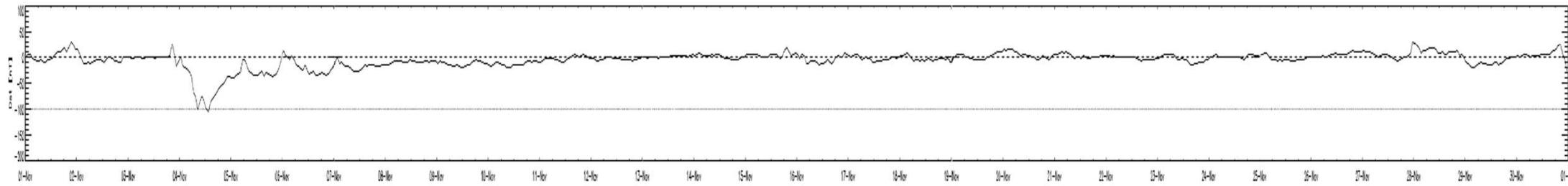
X-ray Ноябрь 2021



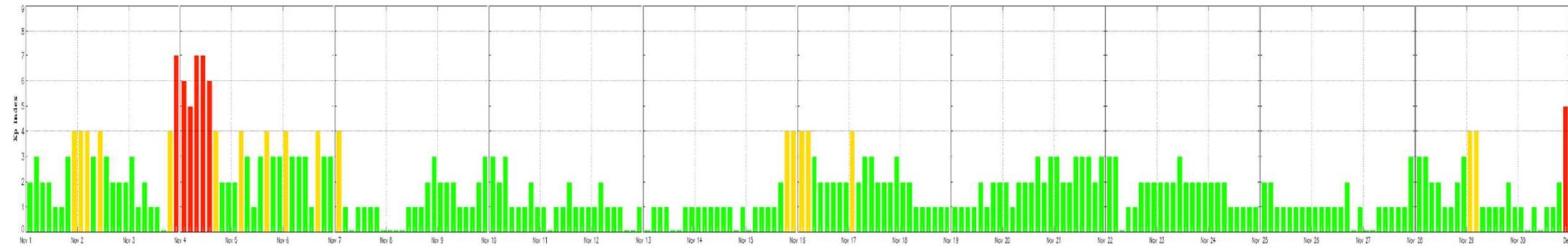
HSS Ноябрь 2021



DST Ноябрь 2021



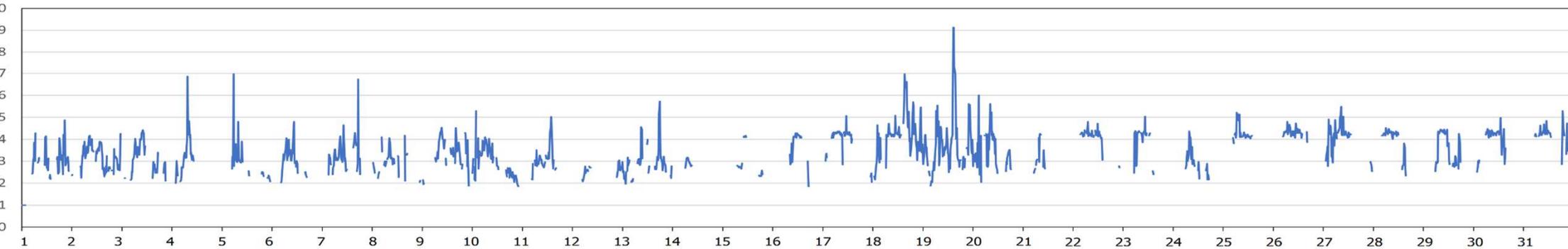
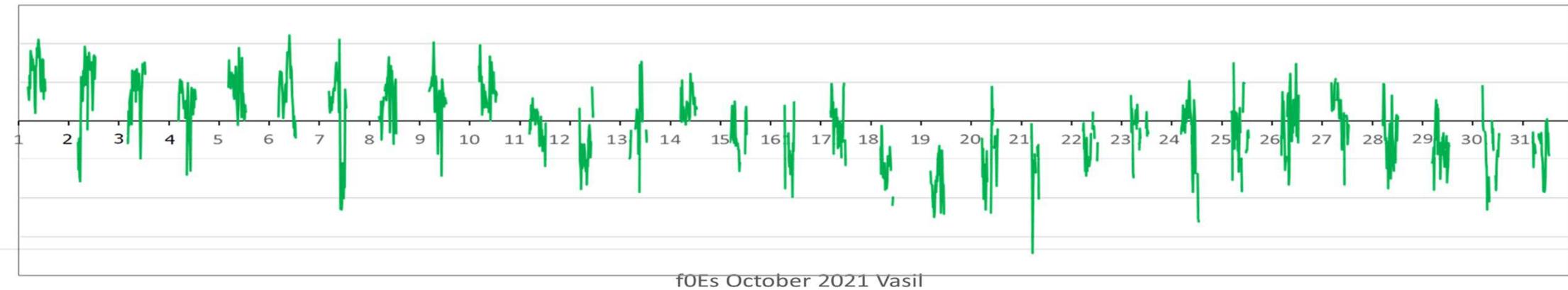
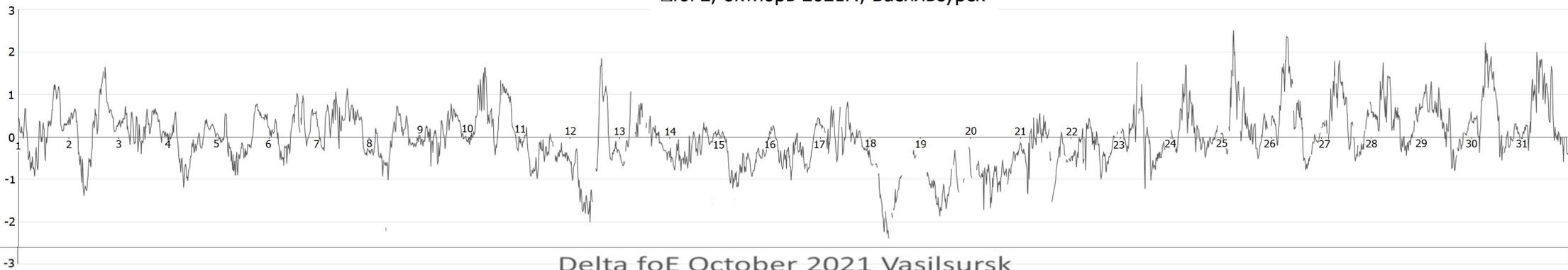
Kp индекс Ноябрь 2021



# 4. Результаты

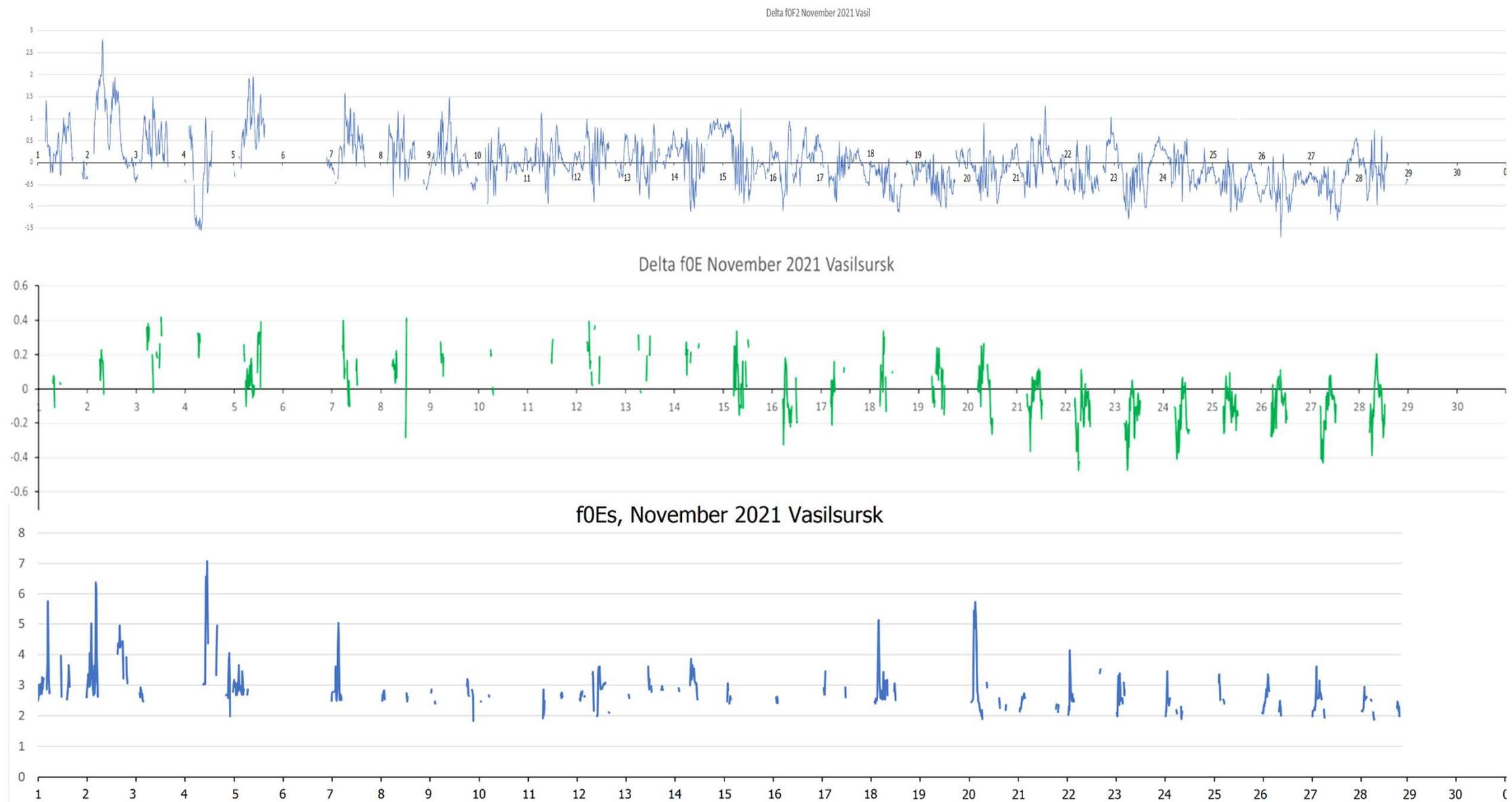
Сравнение поведения  $\Delta f_0F2$ ,  $\Delta f_0E$  и  $f_0Es$  приведено на следующих рисунках для октября 2021г.

$\Delta f_0F2$ , октябрь 2021г., Васильсурск



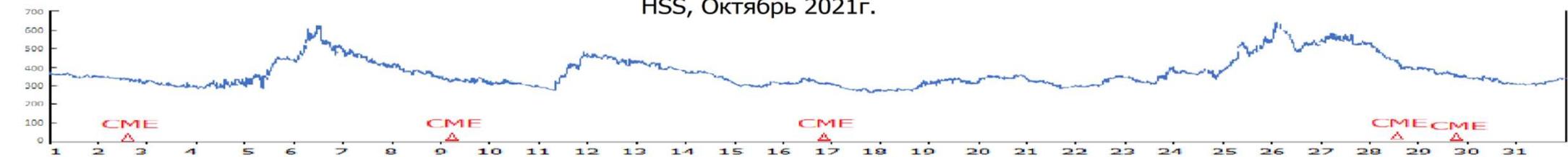
Анализ показывает, что  $\Delta f_0F2$  и  $\Delta f_0E$  меняются синхронно на интервале 9-24 октября. На интервале 1-6 октября изменения больше проявляются в записях  $\Delta f_0E$ , а на интервале 28-31 октября поведения  $\Delta f_0F2$  и  $\Delta f_0E$  различаются. Наибольшие изменения в  $f_0Es$  проявляются 18-21 октября.

# Аналогичный анализ проведен для наблюдений ноября 2021 г.

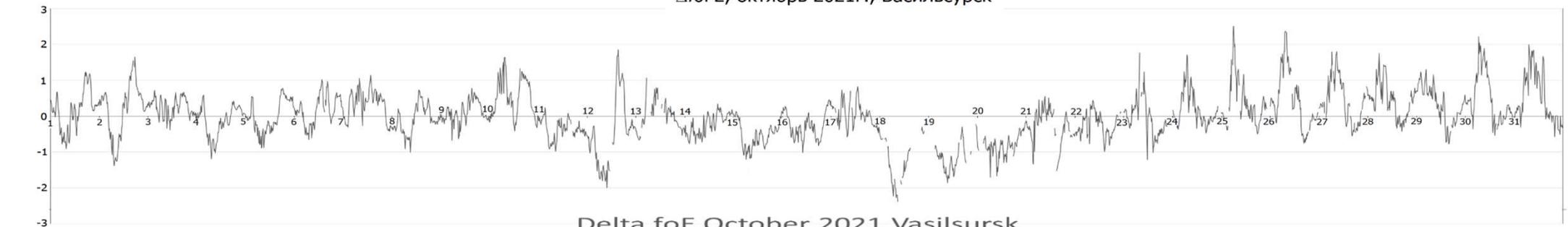


Анализ показывает, что  $\Delta f_0F_2$  и  $\Delta f_0E$  меняются по-разному в течение месяца. К тому же в первую половину месяца критическая частота  $f_0E$  регистрируется нестабильно. В поведении  $f_0Es$  из-за большого разрыва в данных также трудно говорить о каких-либо тенденциях в поведении. Можно упомянуть только о снижении общего уровня величин  $f_0Es$  в конце месяца.

### HSS, Октябрь 2021г.



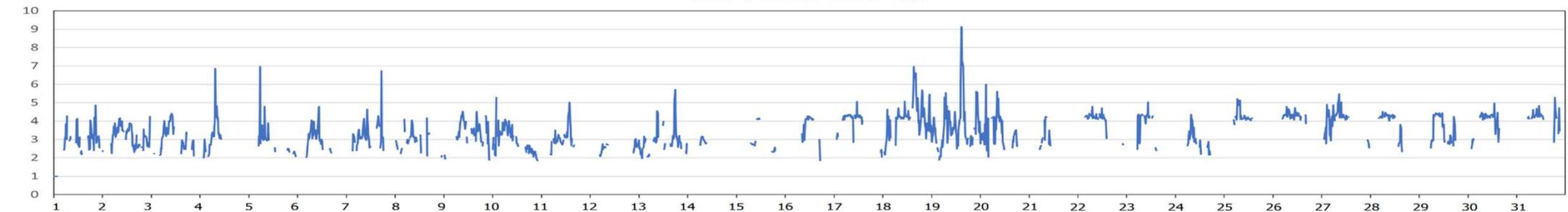
### $\Delta f^oF2$ , октябрь 2021г., Васильсурск



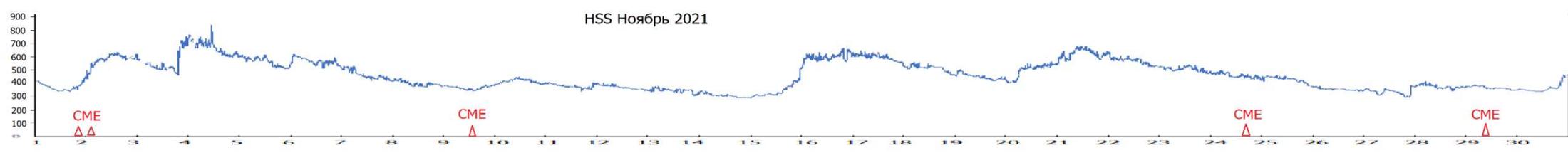
### Delta foE October 2021 Vasilsursk



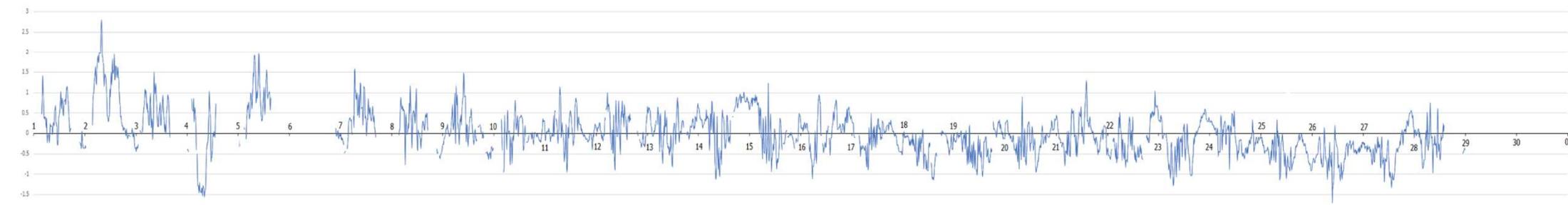
### f^oEs October 2021 Vasil



Анализ приведенных кривых показывает, что уменьшение  $\Delta f^oE$  1-4.10 может быть связано с последствием **CME** 02.10, изменения в  $\Delta f^oF2$  выражены неярко. Откликом на **CME** 09.10 и **HSS** 11.10 можно считать синхронное уменьшение  $\Delta f^oF2$  и  $\Delta f^oE$  10-12.10; аналогично и с **CME** 17.10: уменьшение  $\Delta f^oF2$  и  $\Delta f^oE$  18-19.10 и возврат на исходный уровень 23.10. Уменьшение  $\Delta f^oE$  28-31.10 можно отнести к реакции слоя E как на **CME**, так и на прошедший **HSS**. В поведении  $\Delta f^oF2$  нет изменений, похожих на отклик солнечных явлений. Наибольшие изменения в  $f^oEs$  18-21.10 проявляются в результате действия **CME**.



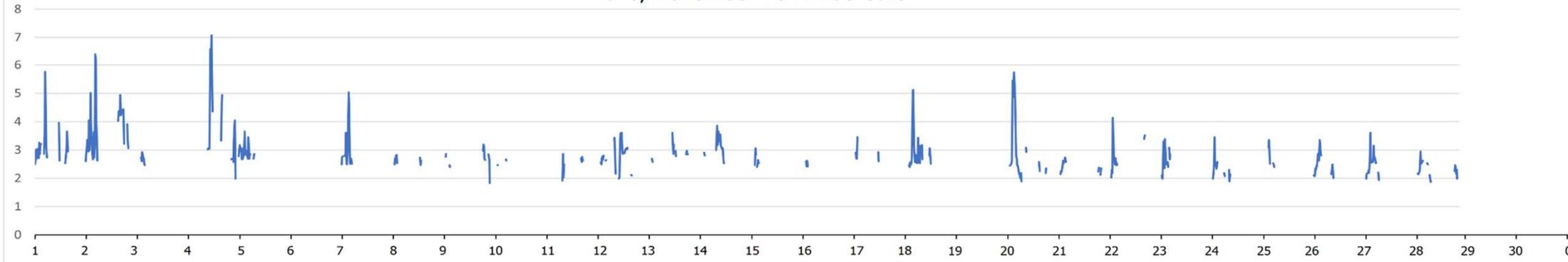
Delta f0F2 November 2021 Vasil



Delta f0E November 2021 Vasilursk



f0Es, November 2021 Vasilursk



Анализ поведения параметров ионосферы в ноябре 2021г. показывает, что резкое уменьшение  $\Delta f_0F_2$  04.11 вызвано прохождением **CME** 02.11. Из-за отсутствия значительного числа данных  $f_0E$  и  $f_0Es$  трудно говорить о каком-либо влиянии на эти слои ионосферы. **CME** 09.11, скорее всего, не оказало влияния на ионосферу. В то же время, увеличение 15.11 скорости **HSS** до 700 км/с повлияло на  $E$  слой, что проявилось в уменьшении  $\Delta f_0E$  16.11. Подобные изменения в поведении  $\Delta f_0E$  регистрируются и при увеличении скорости **HSS** больше 700 км/с 21.11. Причем, в  $\Delta f_0F_2$  в указанные периоды прослеживаются слабые изменения. В то же время, реакция на **CME** 24.11 в  $\Delta f_0F_2$  уже значительна.

## 5. Заключение

Проведен анализ данных вертикального зондирования ионосферы, полученных из регулярных наблюдений в среднеширотной ионосферной и радиоастрономической обсерватории НИРФИ ННГУ «Васильсурск» с использованием метода, основанного на отклонении частоты от среднего за месяц (предложенного авторами ранее).

Исследования возмущений критических частот  $f^oE$  и  $f^oEs$  вышеизложенным методом проведены впервые.

Представлена иллюстрация реакции различных слоев ионосферы на такие нерегулярные мощные явления солнечной активности, как корональные выбросы массы (CME) и высокоскоростные потоки солнечного ветра (HSS).

Отклик на CME проявляется в уменьшении  $\Delta f^oF2$  и  $\Delta f^oE$ . Причем, возможно как синхронное изменение величин  $\Delta f^oF2$  и  $\Delta f^oE$ , так и проявление реакции на CME или только в слое F2, или только в слое E.

Выявлено влияние HSS на характеристики слоя E.

Наибольшие зарегистрированные изменения  $f^oEs$  (18-21.10.21) проявляются в результате действия CME.

Благодарим за внимание!