



ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА МОЩНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ СОБЫТИЯ МАЯ 2024Г.

О.А. Шейнер¹, 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-2023-0038 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), как подтверждается предыдущими исследованиями авторов, 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.*

Данные

В данной работе проанализирована связь изменений параметров ионосферы с зарегистрированными корональными выбросами массы и данными наблюдений скорости солнечного ветра в мае 2024 года, этот период характеризовался высокой солнечной и геомагнитной активностью.

В качестве параметров ионосферы мы будем рассматривать поведение во времени критической частоты f^oF2 слоя F2 ионосферы, используя предложенный нами ранее ионосферный индекс.

В исследовании используются данные вертикального зондирования ионосферы, полученные из регулярных наблюдений. Координаты пунктов наблюдений за ионосферой приведены в Таблице, расположение схематично показано на рисунке.

| Ионозонд | Координаты |
|------------|-------------|
| VASILSURSK | 56,1N 46,1E |
| JULIUSRUH | 54,6N 13,4E |
| PRUHONICE | 50,0N 14,6E |
| ATHENS | 38,0N 23,5E |



Данные Juliusruh, Pruhonice и Athens получены из базы данных Digital Ionogram Data Base (DIDBase).

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.

Информация о регистрации корональных выбросов массы доступна в каталоге SOHO LASCO CME CATALOG (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

О скорости протонов солнечного ветра данные получены со спутника ACE RTSW (<http://www.srl.caltech.edu/ACE>).

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 ($\Delta f_0 F_2$).

При регулярных наблюдениях регистрация ионограмм 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:

$$\Delta f_{0jk} = f_{0jk} - \overline{f_{0j}}, \text{ где}$$

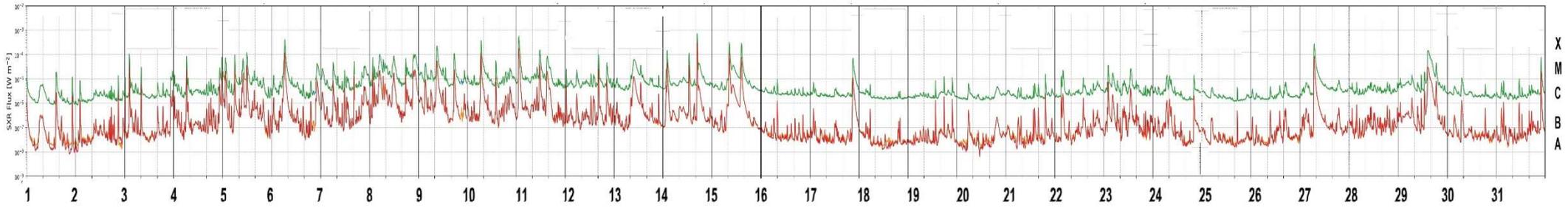
$$\overline{f_{0j}} = \sum_{k=1}^N f_{0jk} / N \quad N - \text{количество дней в месяце}$$

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 – повысить чувствительность определения девиации Δf_0 в зависимости от времени суток и дня месяца.

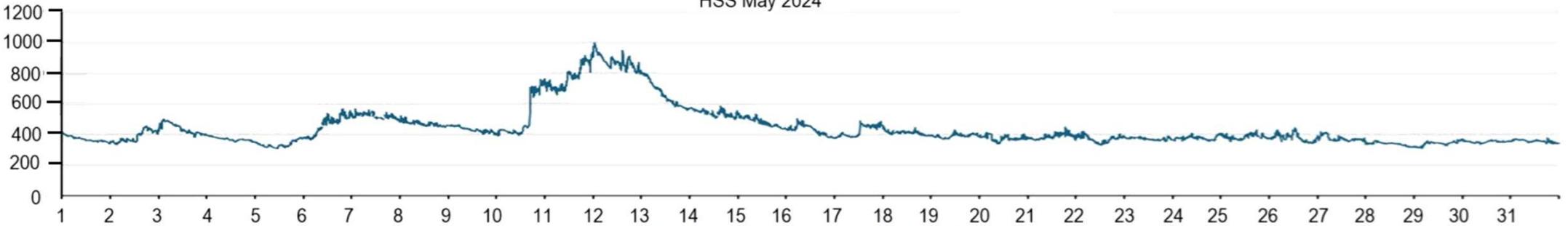
Обстановка на Солнце и в околоземном пространстве

В течение мая 2024г. наблюдались солнечные вспышки разной интенсивности, корональные выбросы массы и высокоскоростные потоки солнечного ветра ($V > 600$ км/с), которые вызывали сильнейшие возмущения магнитного поля Земли и параметров ионосферы.

GOES SXR May 2024



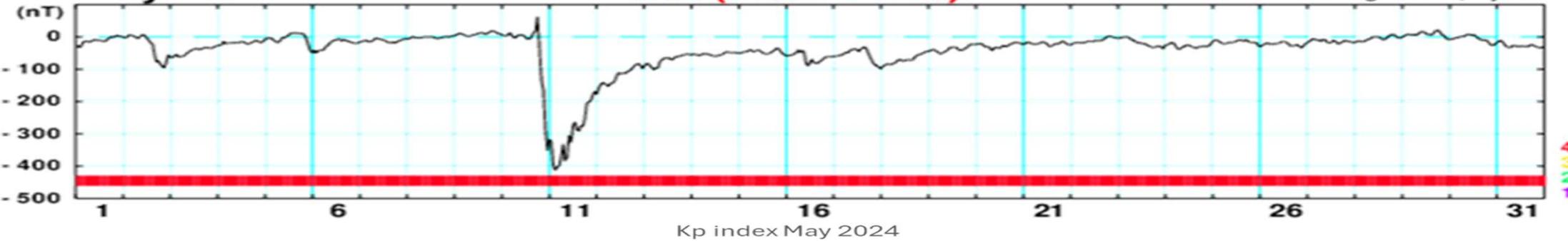
HSS May 2024



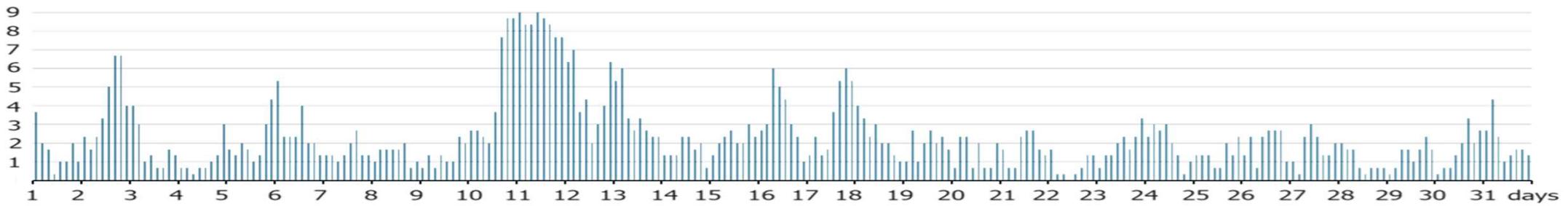
May 2024

Dst (Real-Time)

WDC for Geomagnetism, Kyoto



Kp index May 2024



Результаты

На следующих слайдах представлены рисунки отклика ионосферы (Δf_0F2) на мощные события солнечной активности при наблюдениях на разных станциях.

Результаты обработки для всех 4-х станций сведены на следующий слайд. Выбор этих станций определялся их близким расположением к одному меридиану, что позволяет оценить скорость развития ионосферных возмущений от полярного овала к экватору.

Самая мощная магнитная буря 10-11 мая 2024 (-412нТ) оказала существенное влияние на ионосферу по всему меридиану практически одновременно.

Как видно из приведенных рисунков, сильные возмущения девиации критических частот наблюдались на всех используемых станциях, начиная с 10 и до 13 мая.

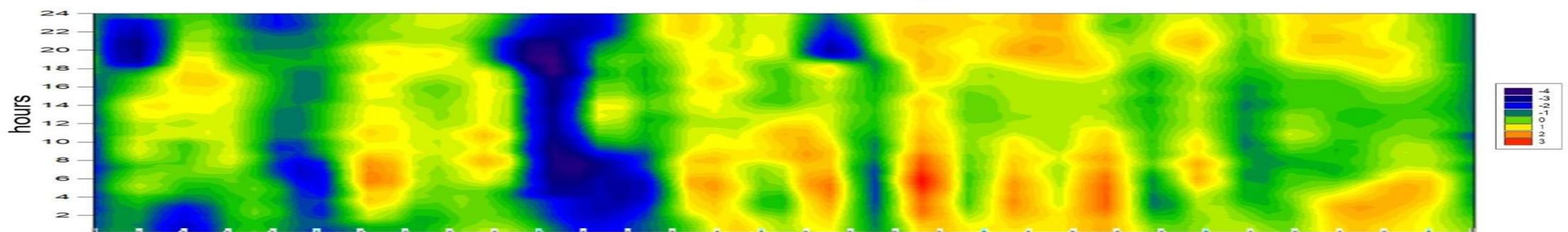
На станции Athens регистрация f_0F2 отсутствует длительный период.

Отрицательные изменения девиации критических частот 17-18 мая также наблюдаются по всему меридиану, незначительно отличаясь уровнем и распределением в течение дня. То же можно сказать и об изменениях девиации 6, 24 и 27 мая.

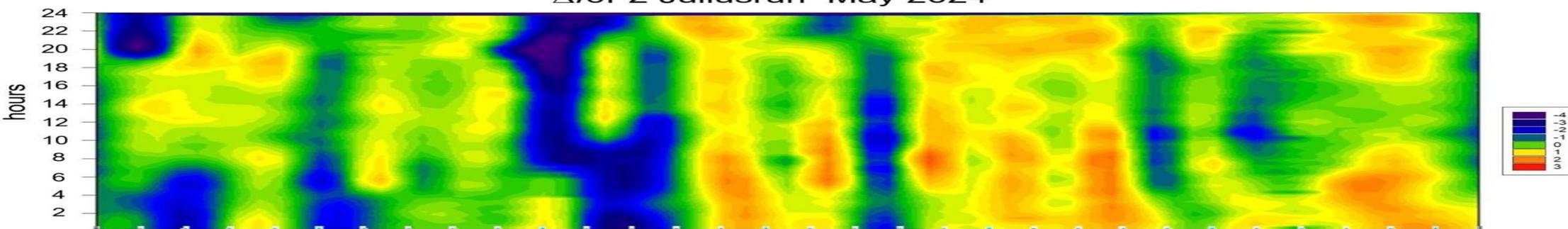
Рассмотрим причины, приводящие к указанным изменениям в девиации Df_0F2 .

Будем опираться на результаты обработки данных Vasilsursk, с привлечением по необходимости, других данных.

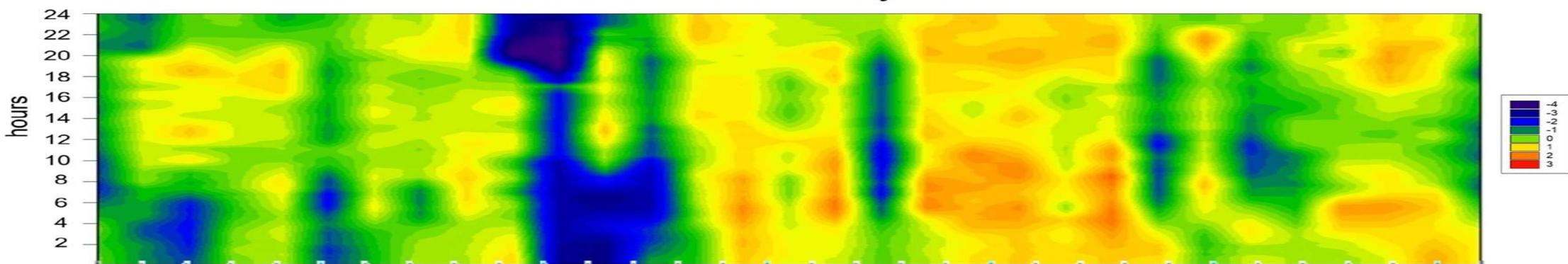
Δf_0F_2 Vasilursk May 2024



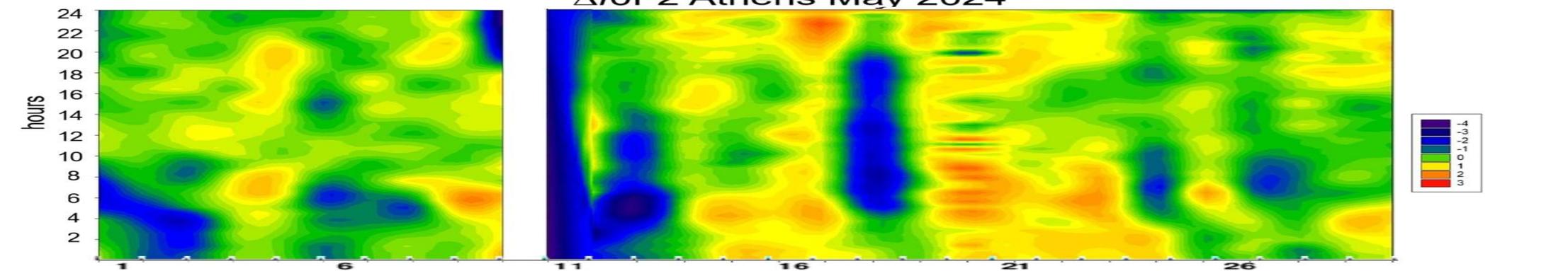
Δf_0F_2 Juliusruh May 2024



Δf_0F_2 Pruhonice May 2024

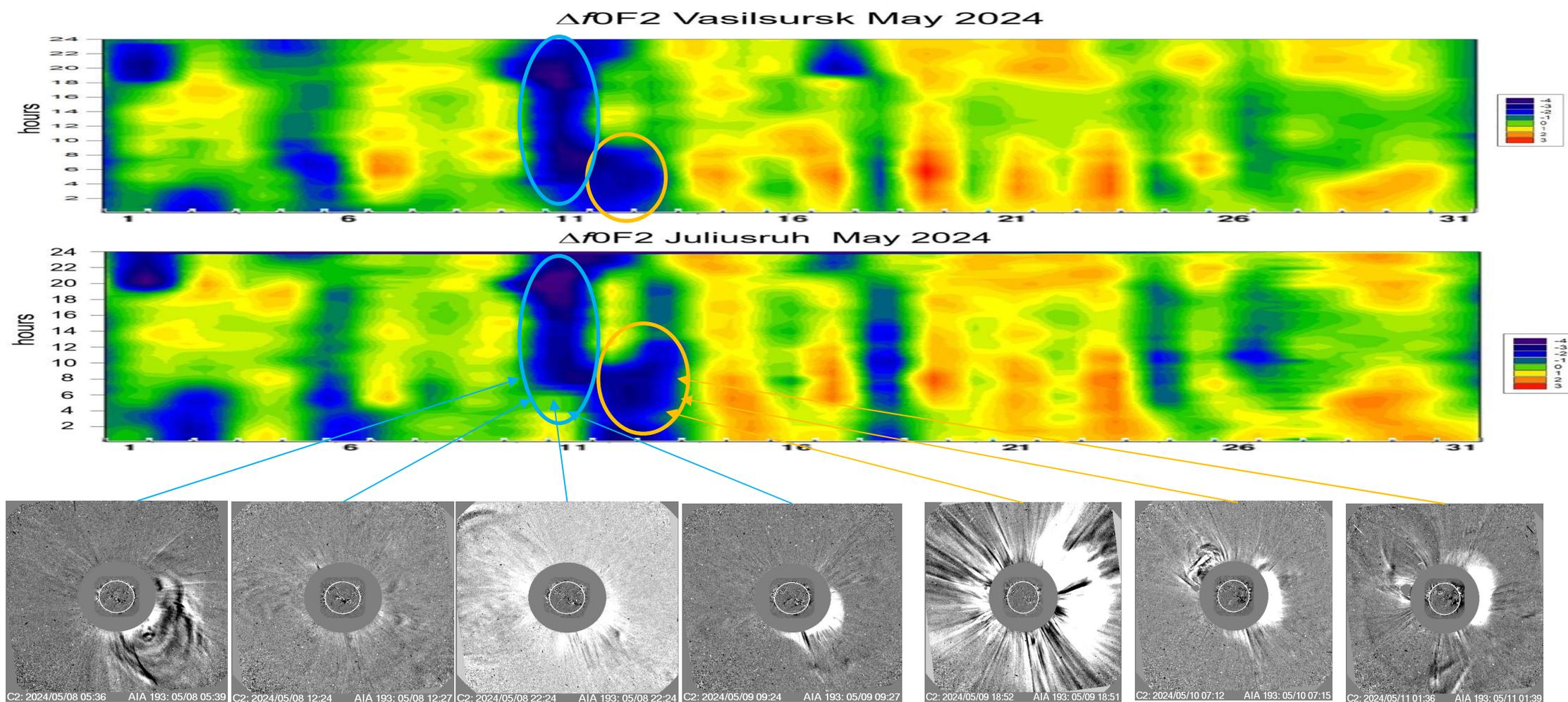


Δf_0F_2 Athens May 2024



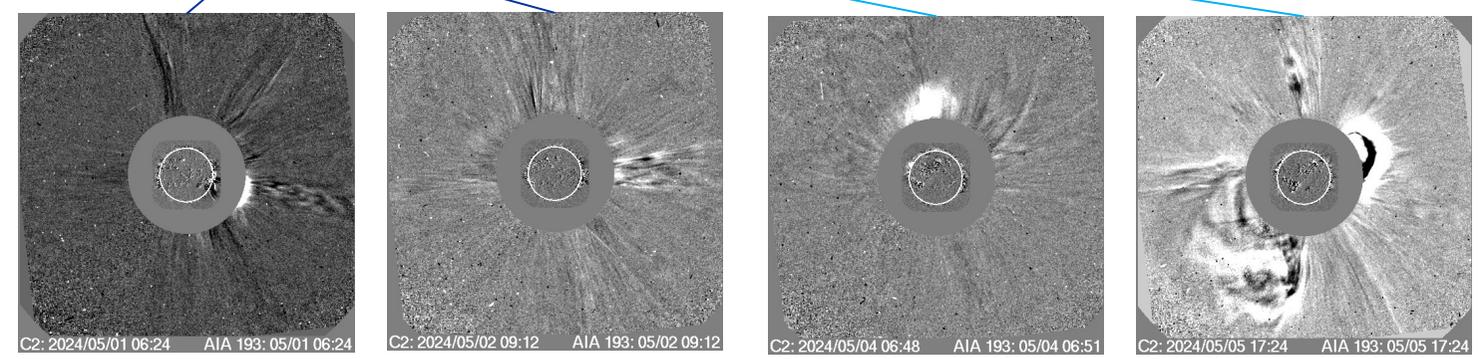
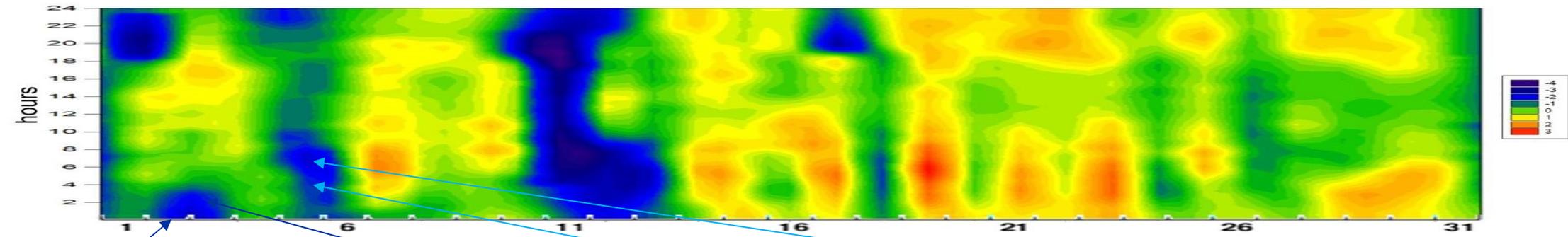
Вначале обратим внимание на причину возмущения девиации критических частот, наблюдающейся на всех используемых станциях, начиная с 10 и до 13 мая.

Образовавшаяся на Солнце сложная активная область (NOAA AR 13664) произвела серию солнечных вспышек класса M/X и корональных выбросов массы, которые и явились причиной возмущений в ионосфере, начиная с 8 мая. Корональные выбросы накапливались (9, 10, 11 мая), взаимодействовали друг с другом по мере приближения к Земле и сформировали сначала один сложный мощный, а потом и другой – от слияния корональных выбросов. Причем, отклик в ионосфере на каждый из них прослеживается.

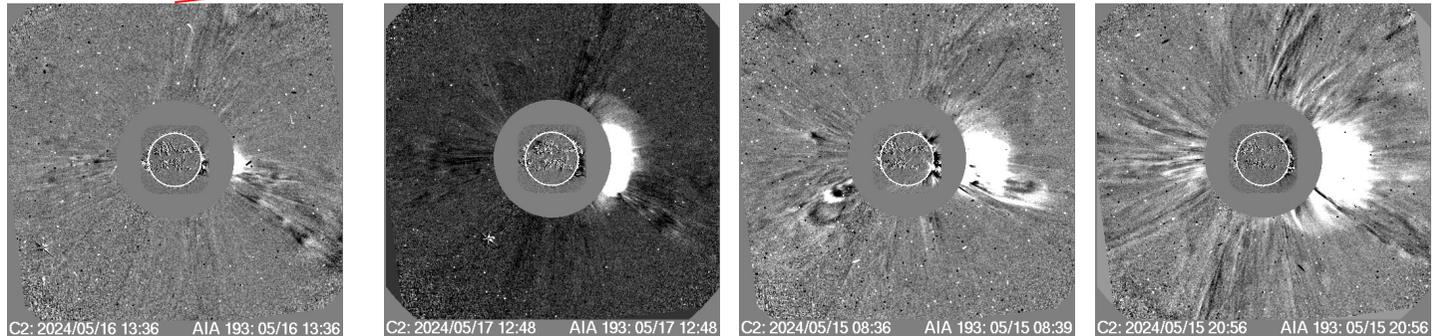
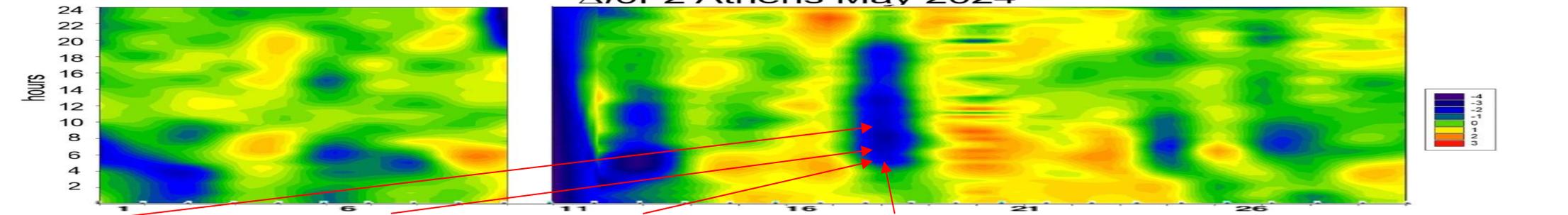


Реакция ионосферы на залимбовые корональные выбросы массы 1 и 2 мая не столь продолжительна, как отклик 5-6 мая на корональные выбросы 4 и 5 мая. Причем, сопоставление результатов разных станций показывает, что большее проявление наблюдается в Vasilsurske.

Δf_oF_2 Vasilsursk May 2024

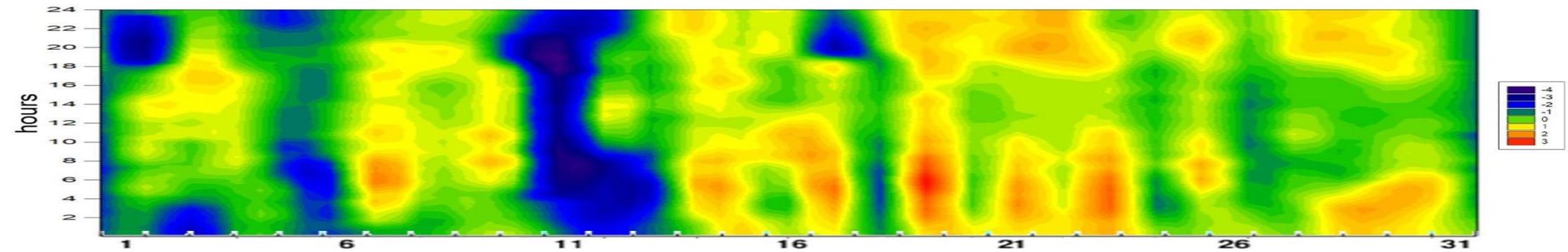


Δf_oF_2 Athens May 2024

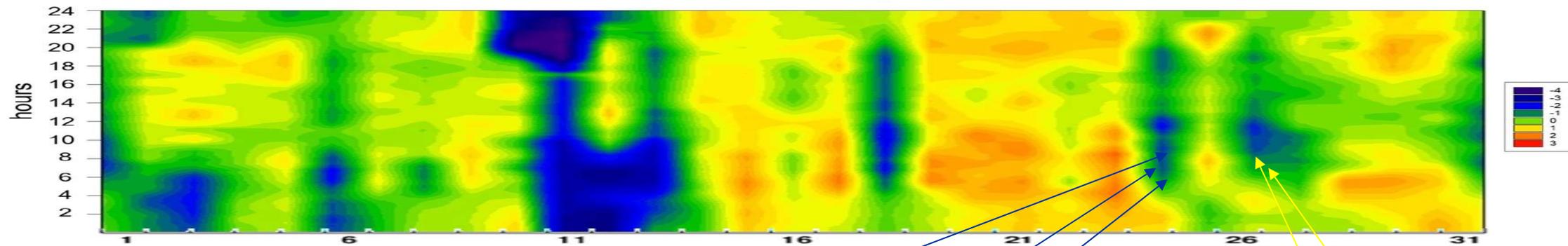


В то же время реакция ионосферы 18 мая на корональные выбросы типа гало 15, 16 и 17 мая проявляется постепенно, увеличиваясь при приближении к южным станциям.

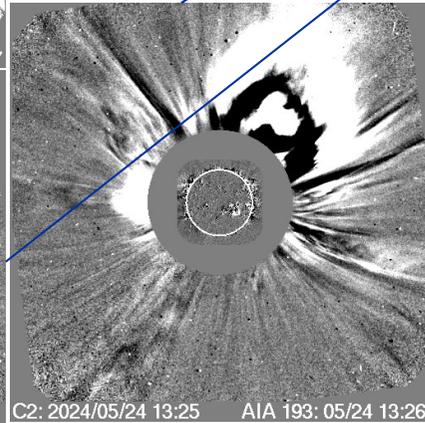
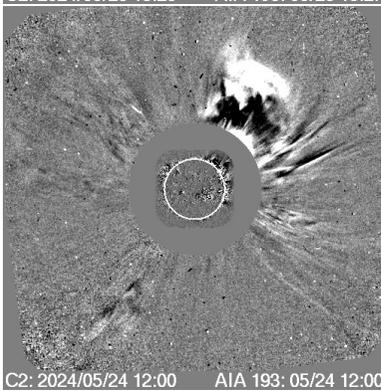
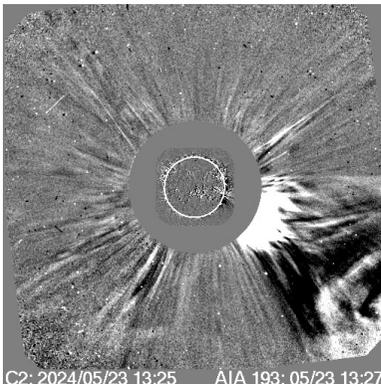
Δf_0F_2 Vasilsursk May 2024



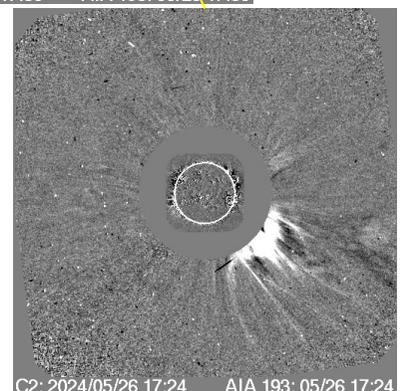
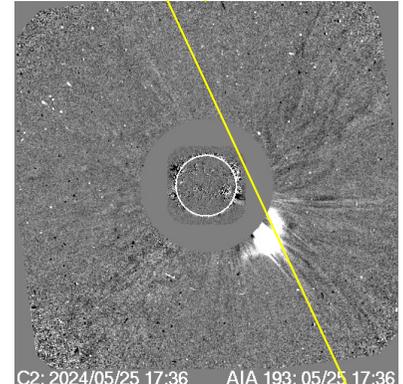
Δf_0F_2 Pruhonice May 2024



Аналогичная ситуация складывается и с откликом ионосферы 24 и 27 мая. Корональные выбросы массы, ответственные за уменьшение девиации 24 мая, показаны справа: 23, 24.05.



Возмущения в ионосфере 26-27 мая вызываются корональными выбросами 25 и 26 мая с источником за западным лимбом.



Заключение

Проведен анализ данных вертикального зондирования ионосферы, полученных из регулярных наблюдений в мае 2024 года в нескольких ионосферных станциях, расположенных близко к одному меридиану: Vasilsursk, Juliusruh, Pruhonice и Athens.

Использовался метод, основанный на отклонении частоты от средней за месяц, предложенный авторами ранее.

В результате проведенных исследований степени ионосферных возмущений в зависимости от кратковременных вариаций солнечной активности (регистрации корональных выбросов массы) подтверждено наличие закономерности во влиянии корональных выбросов на параметры ионосферы: наблюдается продолжительное снижение значений Δf_0F_2 после начала корональных выбросов типа петля и типа гало.

Отмечено, наибольшее влияние оказывают сложные мощные выбросы, образованные слиянием корональных выбросов.

Благодарим за внимание!