



О РЕАКЦИИ ИОНОСФЕРЫ НА ВСПЛЕСК ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ 9 ОКТЯБРЯ 2022г.

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.*

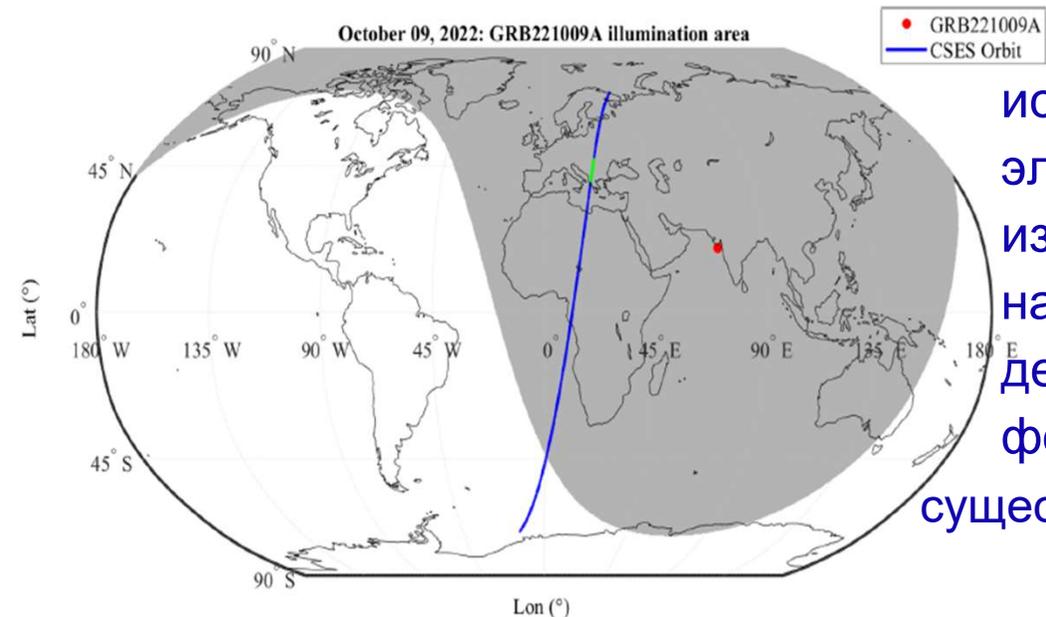
Введение

О том, что гамма-всплески могут вызывать ионосферные возмущения, впервые сообщили в 1988 году Фишман и Ина по результатам наблюдений гамма-всплеска 1 августа 1983 года. Измеренное объемное воздействие на ионосферу представляло собой изменение амплитуды радиосигналов очень низкой частоты, что является доказательством возмущения, вызванного в нижней части ионосферы этим очень энергичным внесолнечным событием. Во время космических гамма-всплесков интенсивный поток фотонов высокой энергии может аномально ионизировать нижнюю часть ионосферы, вызывая значительное увеличение плотности свободных электронов. Как следствие, концентрация электронов растет, что приводит к изменению проводимости ионосферы.

Хотя специализированные спутники регистрировали в среднем более одного гамма-всплеска в день за последнее десятилетие, интенсивные ионосферные реакции наблюдались редко. Фактически, лишь в нескольких статьях сообщается об обнаружении ионосферных возмущений, вызванных событиями гамма-всплесков, всегда в нижней части ионосферы.

Интенсивность возмущения, а также его пространственная протяженность могут быть определены путем анализа уровня увеличения ионизации. Эти результаты дают нам представление о связи между гамма-лучами и ионизированным слоем атмосферы Земли.

9 октября 2022 года в 13:21 UT очень яркий и продолжительный гамма-всплеск вызвал срабатывание многих космических обсерваторий рентгеновского и гамма-излучения, в частности Swift, Fermi, MAXI, AGILE и INTEGRAL, наблюдался большинством действующих телескопов и на Земле. Согласно *Piersanti M., Ubertini P., Battiston R., et al. 2023*, максимум гамма-излучения находился над Индией, а поток фотонов гамма-вспышки освещал Европу, Африку, Азию и часть Австралии. На рисунке этих авторов серым указана заштрихованная область, показывающая предполагаемую зону освещения трассы орбиты спутника Chinese Seismo Electromagnetic Satellite (показана синим цветом). Зеленая часть орбиты отмечает время изменения электрического поля, вызванного гамма-всплеском и обнаруженного Electric Field Detector.



На основании обнаруженного сильного изменения электрического поля в верхней ионосфере и исследования распределения общего содержания электронов в ионосфере (ПЭС) над Европой, измеренного приемниками Глобальной навигационной спутниковой системы, авторы делают вывод о том, что беспрецедентный поток фотонов, связанный с этой гамма-вспышкой, существенно повлиял на проводимость ионосферы Земли.

В данном докладе приводятся результаты анализа возмущений в F слое ионосферы, вызванных данным гамма всплеском, по поведению критической частоты F2 слоя ионосферы (f_0F2).

Данные

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 цифрами схематично обозначено на рисунке.

№п/п	Ионозонд	Координаты
1	JULIUSRUH	54,6N 13,4E
2	PRUHONICE	50,0N 14,6E
3	SOPRON	47,6N 16,7E
4	SAN VITO	40,6N 17,8E
5	ATHENS	38,0N 23,5E
6	NICOSIA	35,0N 33,1E



Выбор станций был обусловлен тем, насколько координаты пунктов наблюдений ионосферы соответствуют сектору анализа полного электронного содержания, проведенного упомянутыми выше авторами.

Для сравнения нами проанализированы данные наблюдений ионосферы в Vasilsurske:

VASILSURSK	56,1N 46,1E
------------	-------------

Метод

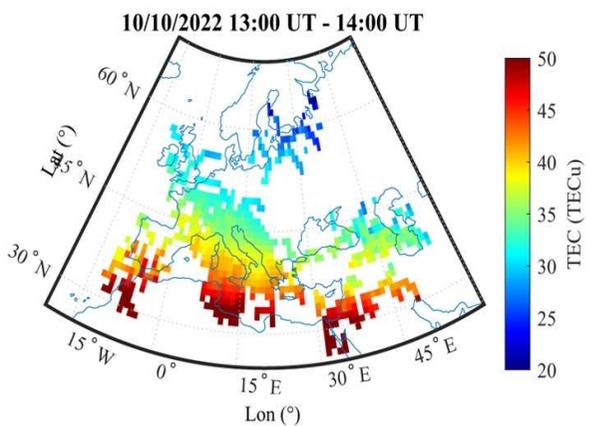
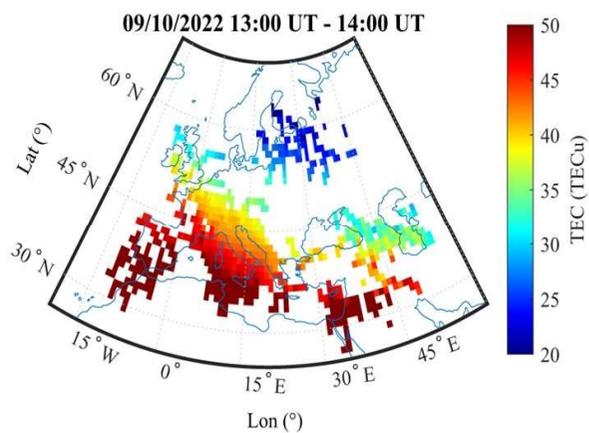
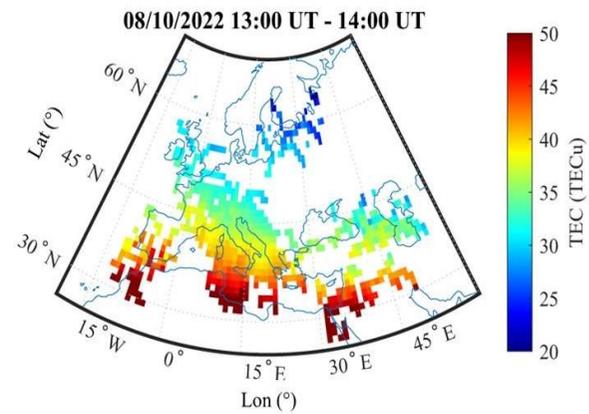
Как было показано в *Sheiner, et al. Adv. Space Res. 2020*, для повышения точности предпочтительно анализировать поведение во времени величин отклонения измеренных значений частот от их средних значений по предложенной методике для исследования возмущений критической частоты ионосферного слоя F2 ($\Delta f_0 F_2$).

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:

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

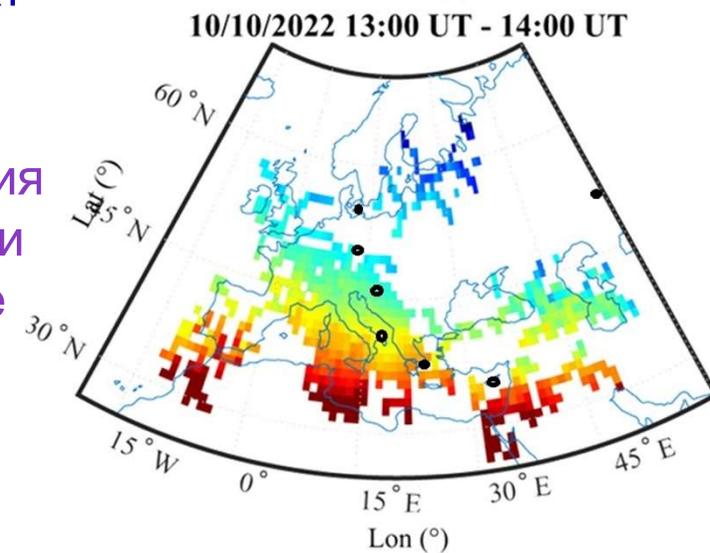
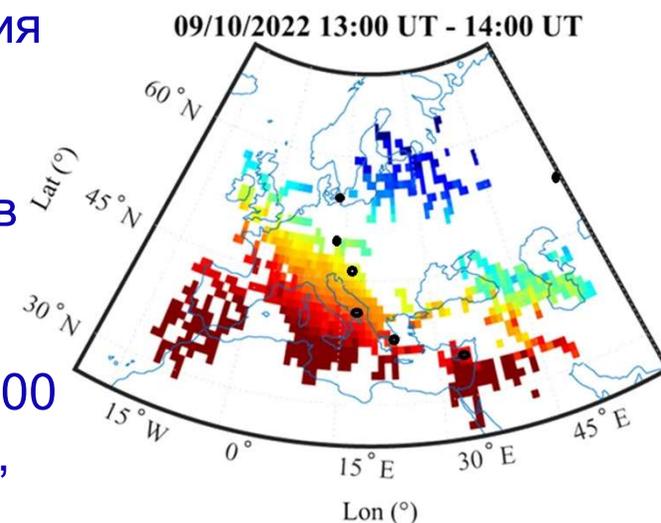
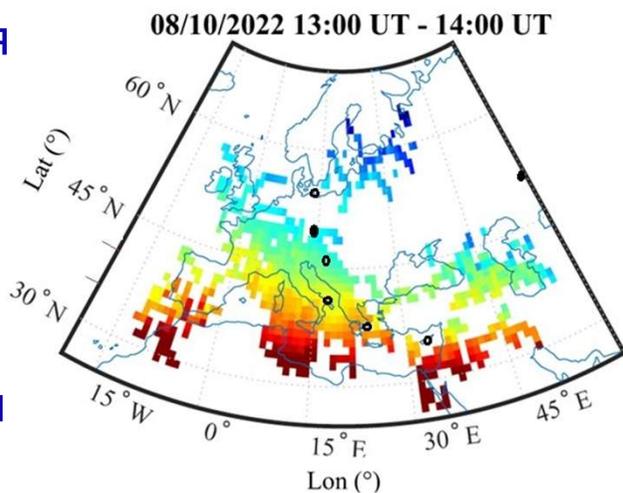
$$\overline{f_{0j}} = \sum_{k=1}^N f_{0jk} / N \quad N - \text{количество дней в месяце}$$

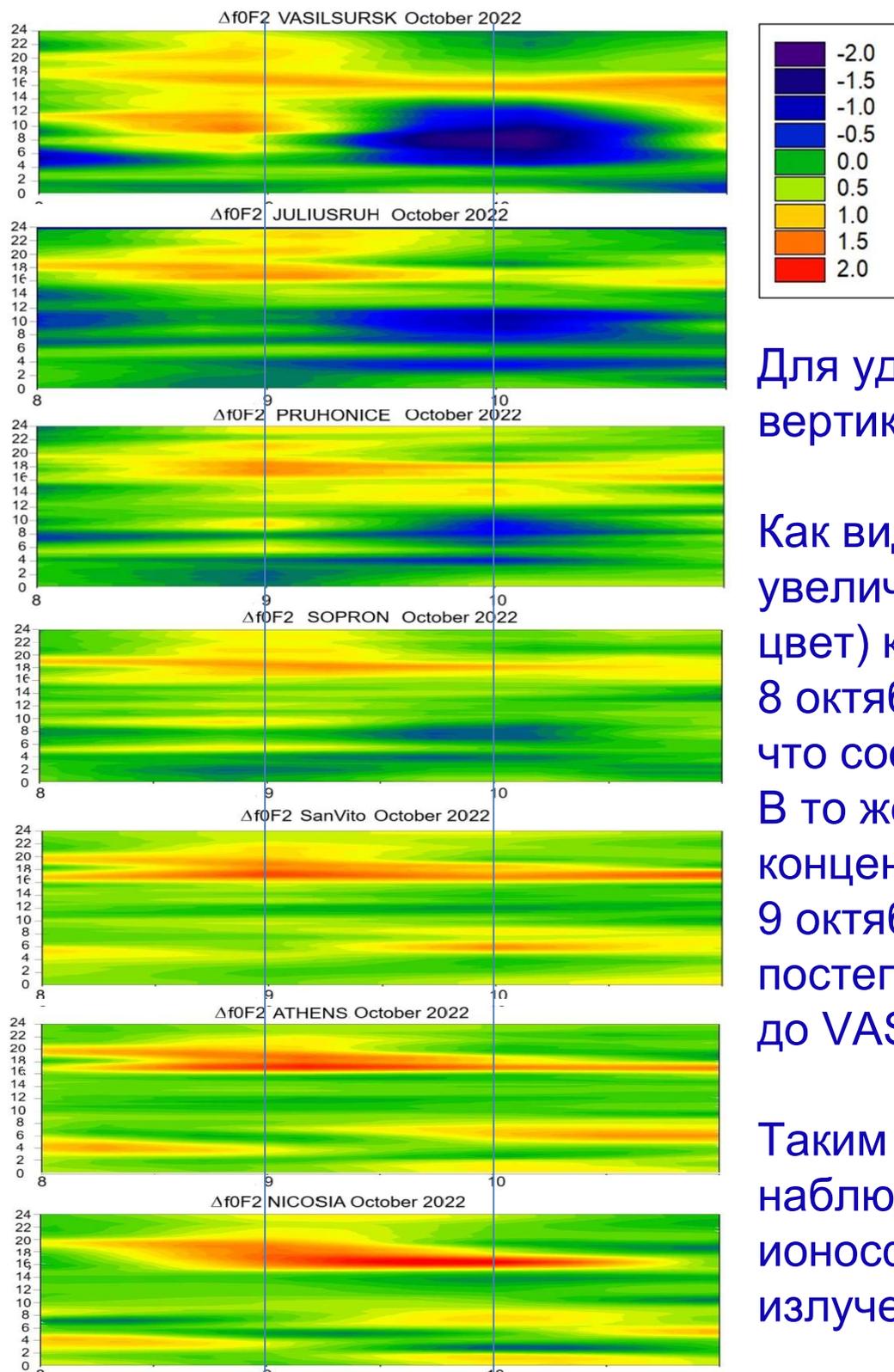
Дифференциальный параметр, предлагаемый нами для исследования данных вертикального зондирования ионосферы, позволяет повысить чувствительность и устранить стационарные зависимости (например, исключить суточное поведение), а используемая цветовая гамма – повысить чувствительность определения девиации Δf_0 в зависимости от времени суток и дня месяца.



- a) На рисунке слева авторы исследования распределения полного электронного содержания (ПЭС) привели карты полного вертикального электронного содержания в ионосфере над Европой вокруг положения спутника Chinese Seismo Electromagnetic Satellite за сутки до (панель а), в момент (панель б) и через сутки после (панель в) появления гамма-всплеска. Показано, приемники Глобальной навигационной спутниковой системы в районе Средиземноморья, зафиксировали значительное
- б) увеличение 9.10 (б) между 13:00 и 14:00 UT по сравнению с 8.10 (а) и 10.10 (в), подтверждая ионизирующий эффект интенсивного гамма-всплеска.

На рисунке справа для сопоставления результатов мы схематично черными точками указываем местоположение пунктов регулярных наблюдений ионосферы, данные которых мы используем.





На данном слайде приведены девиации критической частоты (Δf_0F_2) на всех используемых пунктах в интервале 3 дня (8-10 октября) в границах значений $(-2+2)$, как показано на шкале.

Для удобства восприятия на рисунок нанесены вертикальные линии, показывающие границы дня.

Как видно из рисунка, 9 октября наблюдается увеличение девиации, т.е. увеличение (желтый цвет) концентрации в ионосфере, по сравнению с 8 октября на станциях NICOSIA, ATHENS и SanVito, что соответствует результатам исследований ПЭС. В то же время, на остальных станциях увеличение концентрации смещено на 8 октября, и наоборот, 9 октября наблюдается уменьшение (синий цвет), постепенно увеличивающееся со станции SOPRON до VASILSURSK.

Таким образом, можно утверждать, что наблюдаемые значительные внезапные ионосферные возмущения коррелируют с гамма-излучением 9 октября 2022 года.

Заключение

Проведен анализ данных вертикального зондирования ионосферы (f^oF2), полученных из регулярных наблюдений на 7 мировых станциях: JULIUSRUN, PRUHONICE, SOPRON, SAN VITO, ATHENS, NICOSIA и VASILSURSK с использованием метода, основанного на отклонении частоты от среднего за месяц (предложенного авторами ранее), в период регистрации мощной гамма-вспышки 9 октября 2022 года.

Показано: наблюдаемые значительные внезапные ионосферные возмущения коррелируют с гамма-излучением 9 октября 2022 года.

Благодарим за внимание!