

# Применение ансамблевого подхода для исследований ионосферы на основе результатов численного моделирования

Клименко М.В.<sup>1,2</sup>, Клименко В.В.<sup>1,2</sup>, Бессараб Ф.С.<sup>1,2</sup>, Ратовский К.Г.<sup>3</sup>,  
Суходолов Т.В.<sup>1,2</sup>, Розанов Е.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Калининградский филиал Института много магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия

<sup>3</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

# Краткое описание модели ГСМ ТИП

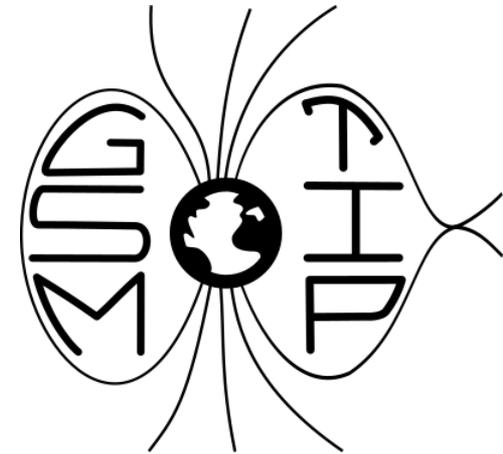
Термосферные параметры:  
 $T_n$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $O$ ,  $NO$ ,  $N(^4S)$ ,  $N(^2D)$   
плотности; вектора скоростей;  
(от 80 км до 526 км)

Ионосферные параметры:  
плотности  $O^+$ ,  $H^+$ ,  $MoI^+$ ;  
 $T_i$  и  $T_e$ ;  
вектора скоростей ионов  
(от 80 км до 15 радиусов Земли)

Электрическое поле:

В модели используется новый блок  
расчета электрического  
потенциала

*Клименко и др., 2006, 2007.*



Глобальная Самосогласованная  
Модель Термосферы,  
Ионосферы и Протоносферы  
(ГСМ ТИП), разработанная в  
ЗО ИЗМИРАН. Модель ГСМ  
ТИП детально описана

*Намгаладзе и др., 1988;*  
*Кореньков и др., 1998.*

# Структура атмосферы

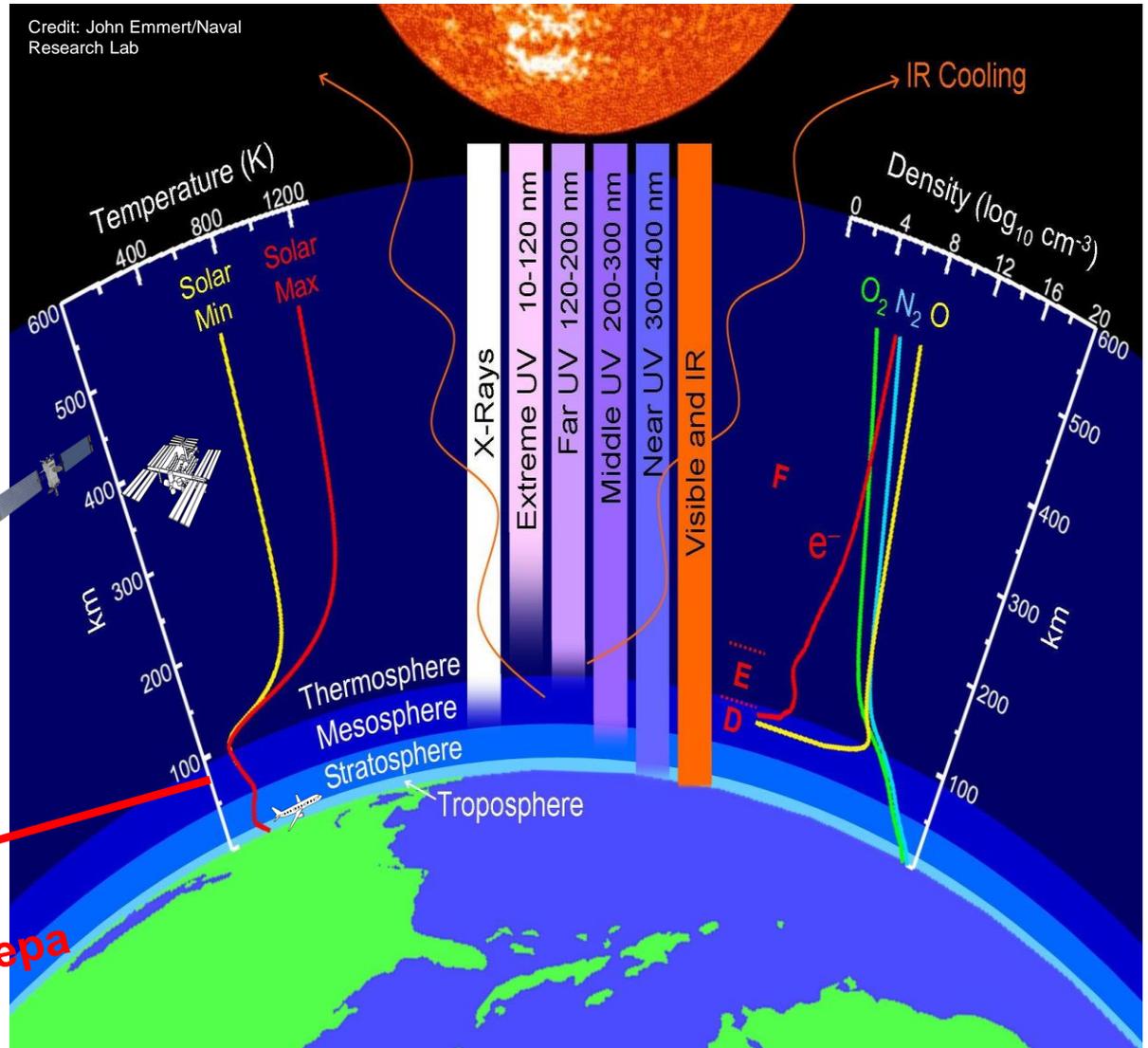
- Чем мы занимаемся?

Верхняя атмосфера

Космическая  
погода SPACE  
WEATHER

80-90 км

Средняя/нижняя атмосфера  
Погода, климат  
WEATHER,  
CLIMATE



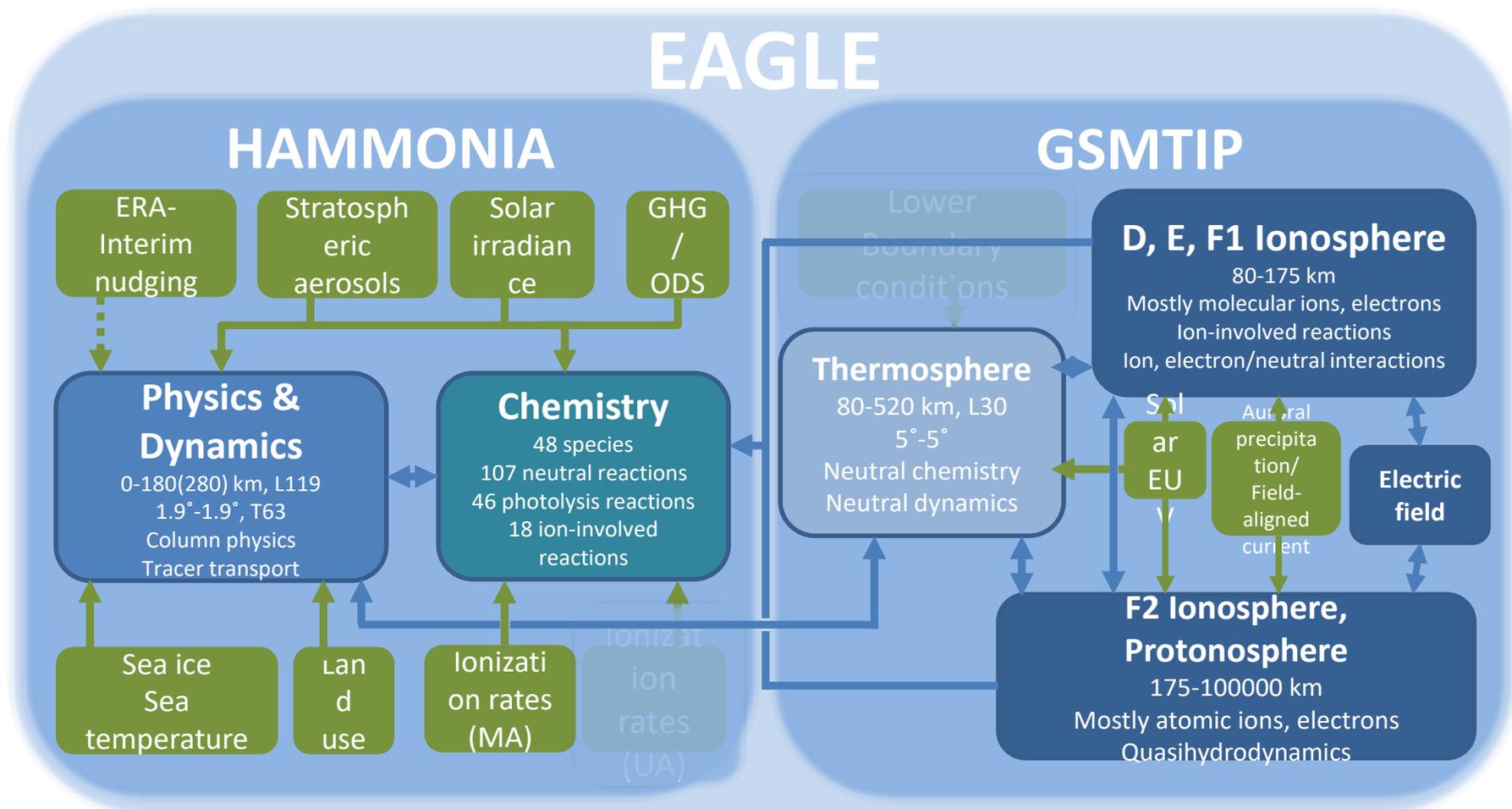
Все

взаимосвязано!

# Содержание доклада

1. Модель всей атмосферы EAGLE как возможность “новой жизни” Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы, Протоносферы (ГСМ ТИП)
2. Отклик ионосферы на солнечные протонные события и высыпания магнитосферных протонов во время сложного явления космической погоды в январе 2005 года
3. Ансамблевые модельные расчеты – новая парадигма для моделей атмосферно-ионосферных взаимосвязей

# Новая модель всей атмосферы



Клименко и др., 2017, 2018; Васильев и др., 2019

# Ионосфера во время высыпаний протонов

*Dmitriev et al., 2006*

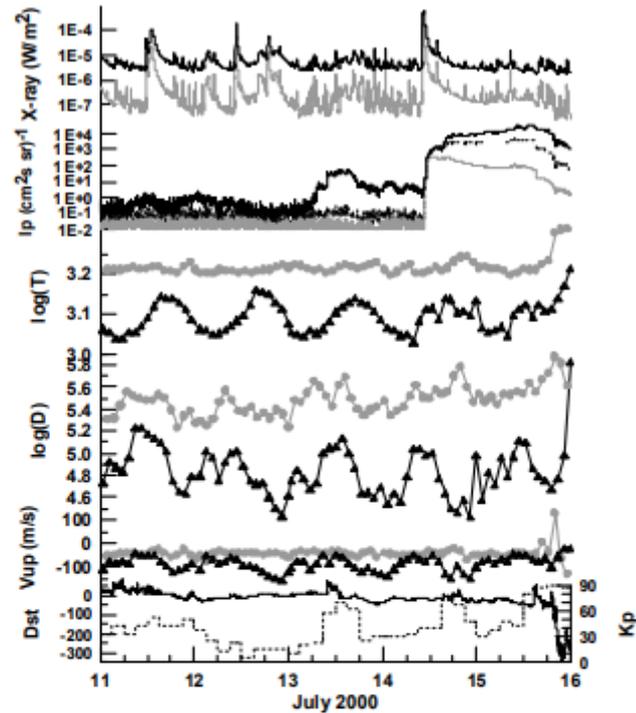
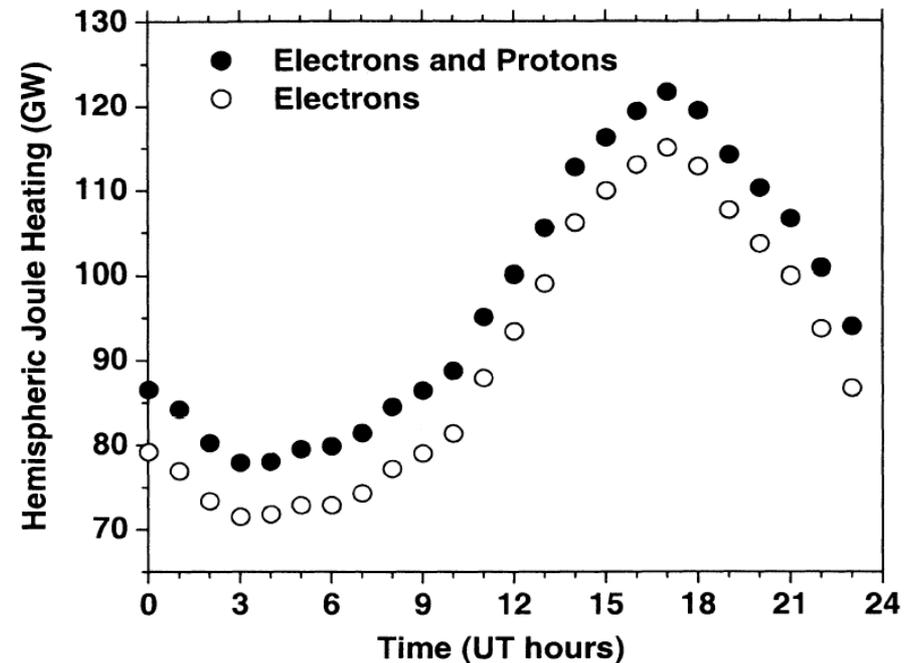
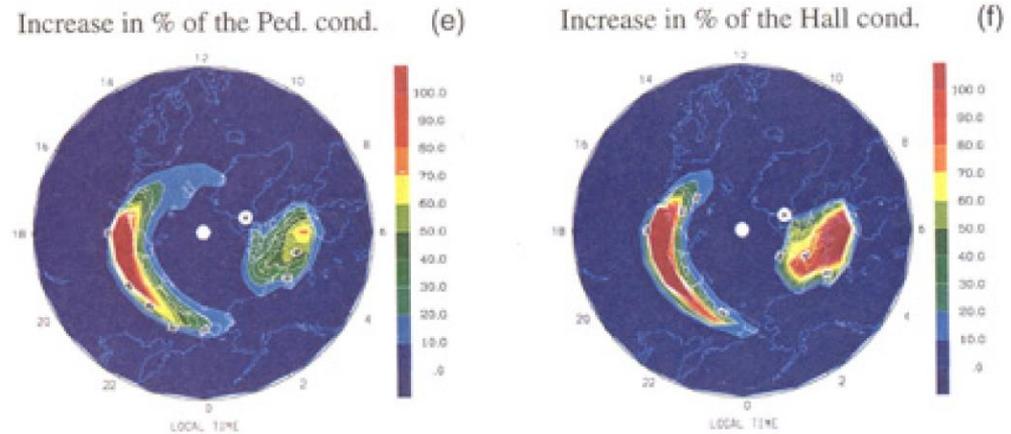


Fig. 1. Solar radiation, ionospheric and geomagnetic conditions preceding the Bastille Day from 11 to 15 July 2000 (from top to bottom): solar X-ray fluxes with wavelength 0.5–4 Å (gray line) and 1–8 Å (black line); integral fluxes of the interplanetary protons with energies  $>5$  MeV (black line),  $>30$  MeV (dashed line) and  $>100$  MeV (gray line); average temperature (K), density ( $\text{cm}^{-3}$ ), and vertical ion drift velocity measured in the top-side ionosphere by the ROCSAT-1/ IPEI during sunlit (gray circles) and night-side passes (black triangles); geomagnetic indices Kp (dashed histogram, right axis) and 1-min Dst (solid line).

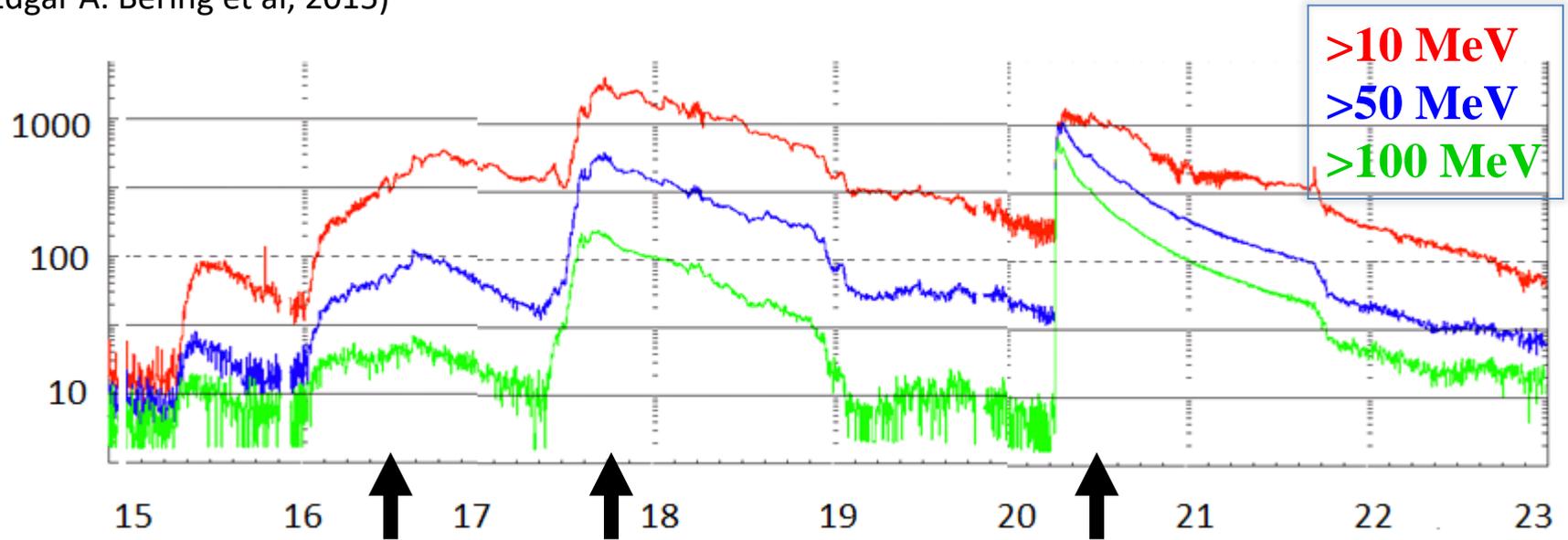
*Galand et al., 2000*



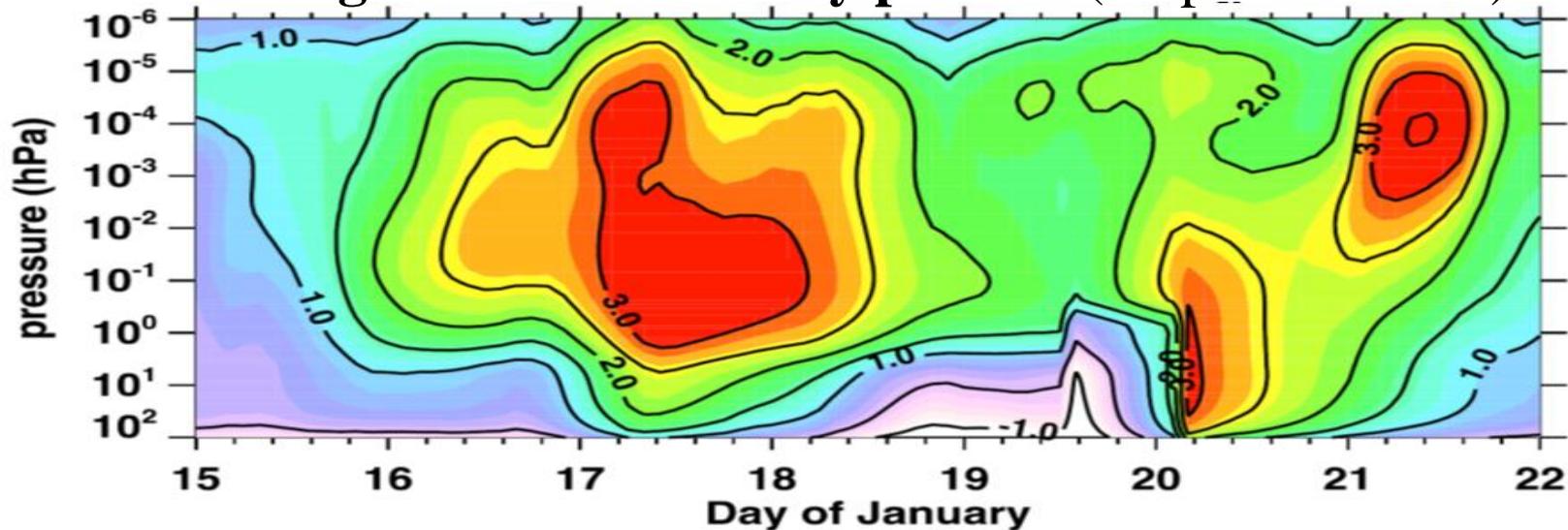
# СПС и высыпания магнитосферных протонов

Proton Flux Measurements by GOES 11 (Particles  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ )

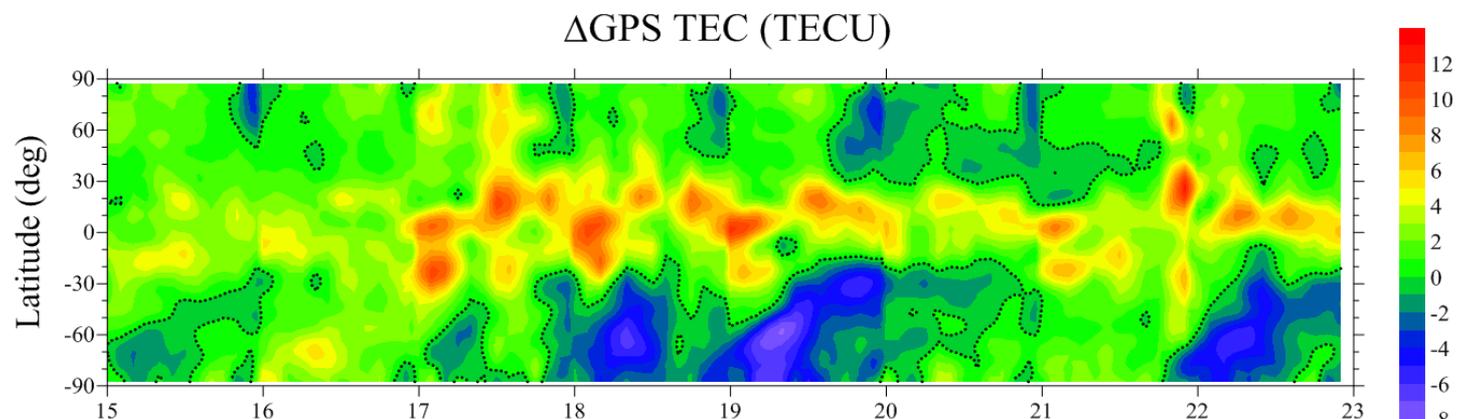
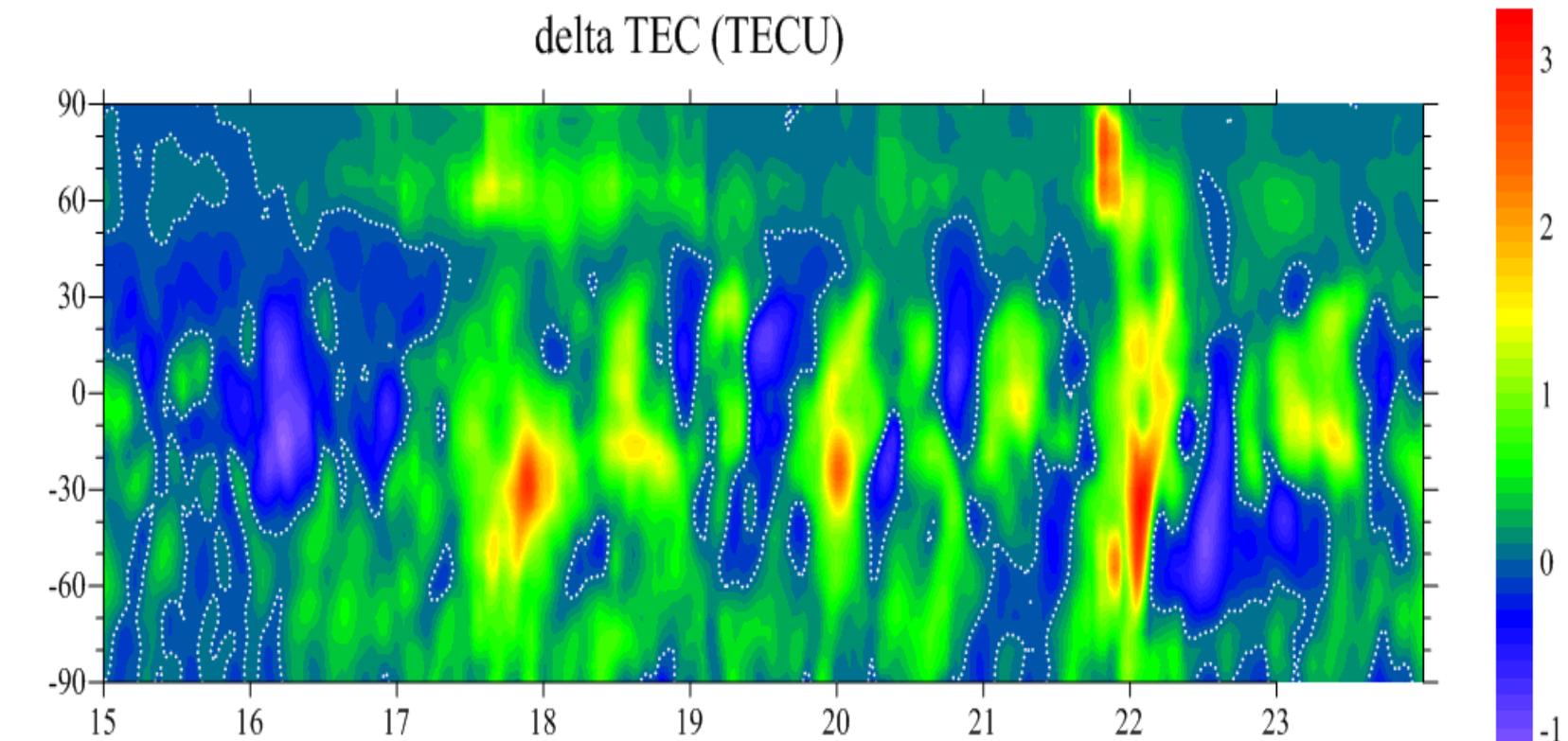
(Edgar A. Bering et al, 2015)



AIMOS log-ionization rates by protons (ionpairs  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

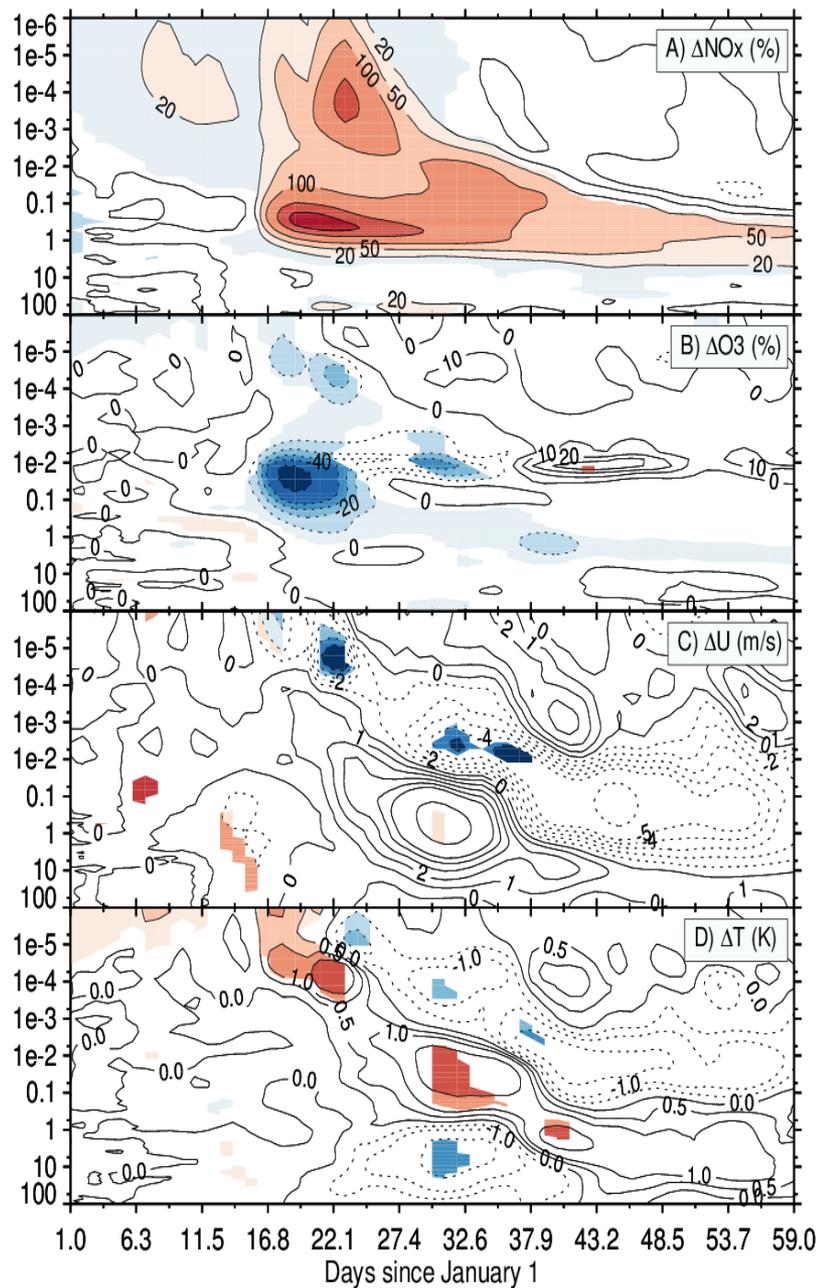


# Отклик ПЭС на солнечное протонное событие



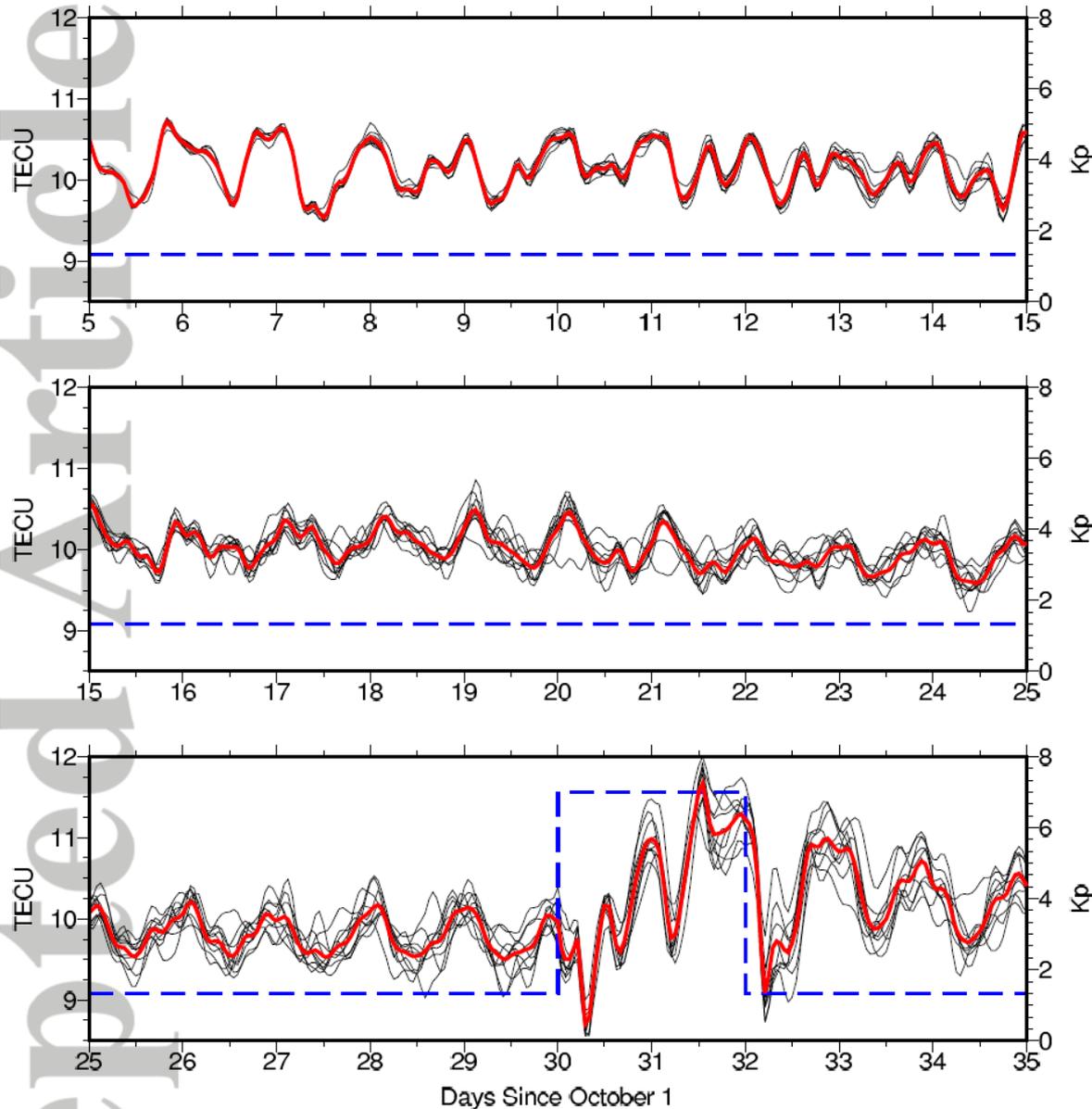
January 2005

# Ансамблевые расчеты в средней атмосфере



# Ансамблевые расчеты в ионосфере

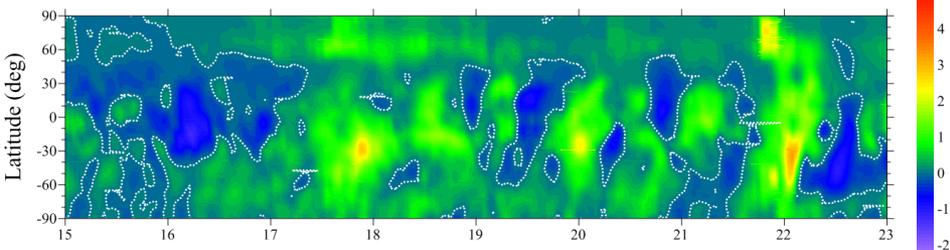
Equatorial Average Total Electron Content



Pedatella, H.-L Liu,  
2018

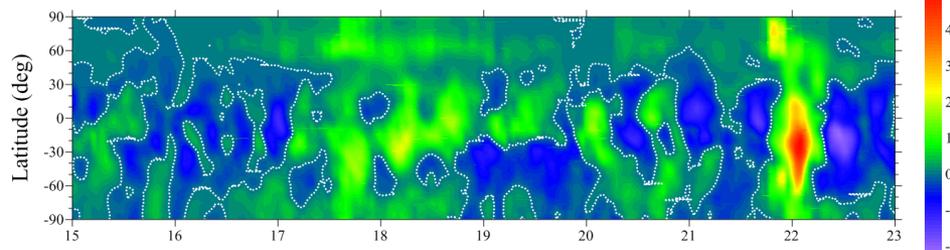
# Возмущения ПЭС в 8 ансамблевых расчетах

$\Delta\text{TEC}_{\text{mean 1}}$  (TECU)



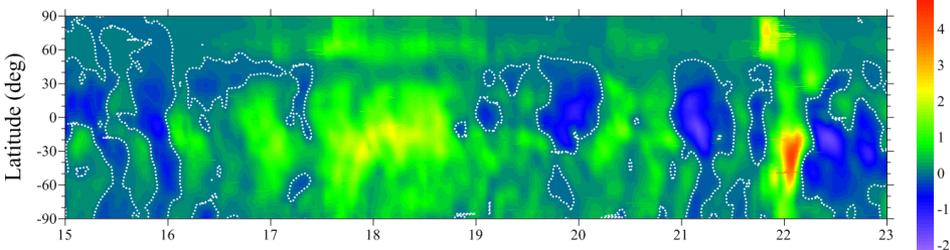
January 2005

$\Delta\text{TEC}_{\text{mean 5}}$  (TECU)



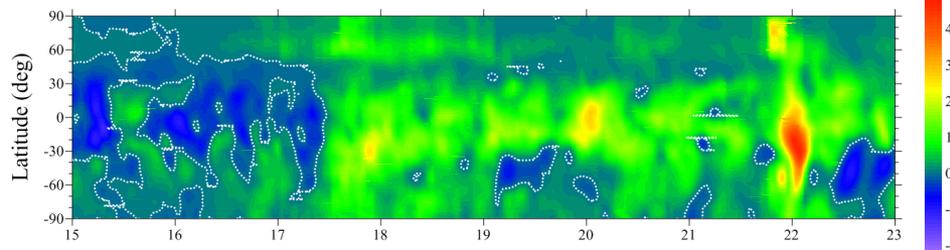
January 2005

$\Delta\text{TEC}_{\text{mean 2}}$  (TECU)



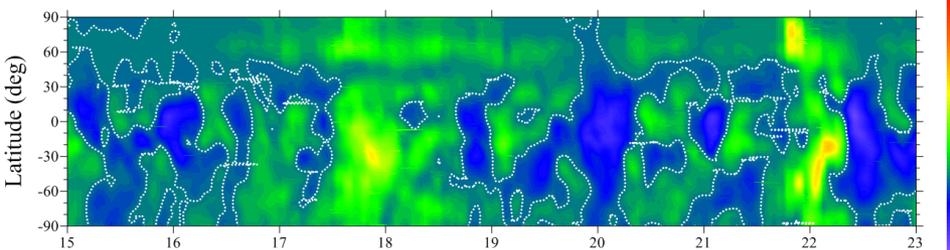
January 2005

$\Delta\text{TEC}_{\text{mean 6}}$  (TECU)



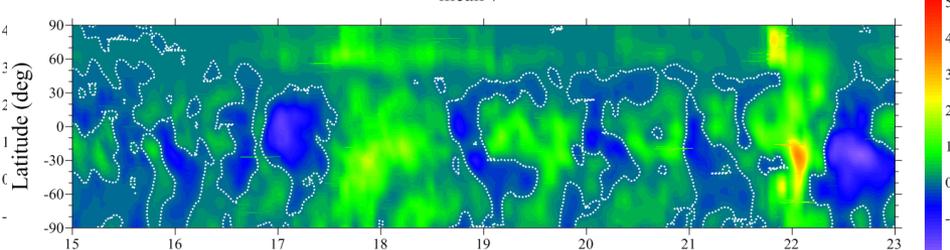
January 2005

$\Delta\text{TEC}_{\text{mean 3}}$  (TECU)



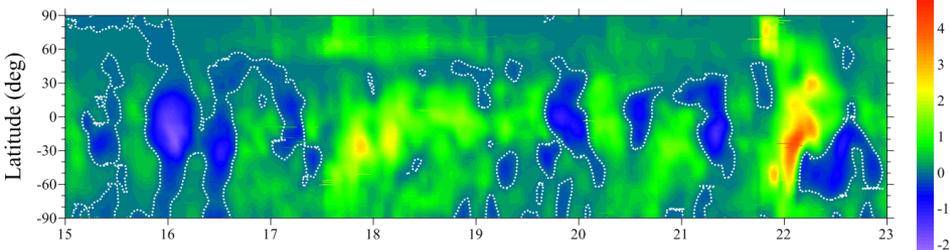
January 2005

$\Delta\text{TEC}_{\text{mean 7}}$  (TECU)



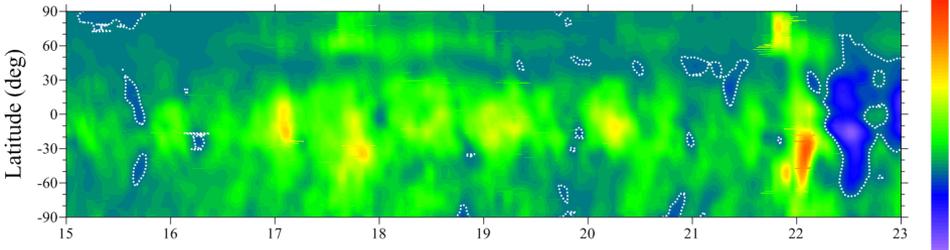
January 2005

$\Delta\text{TEC}_{\text{mean 4}}$  (TECU)



January 2005

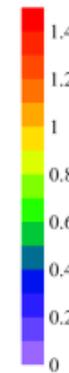
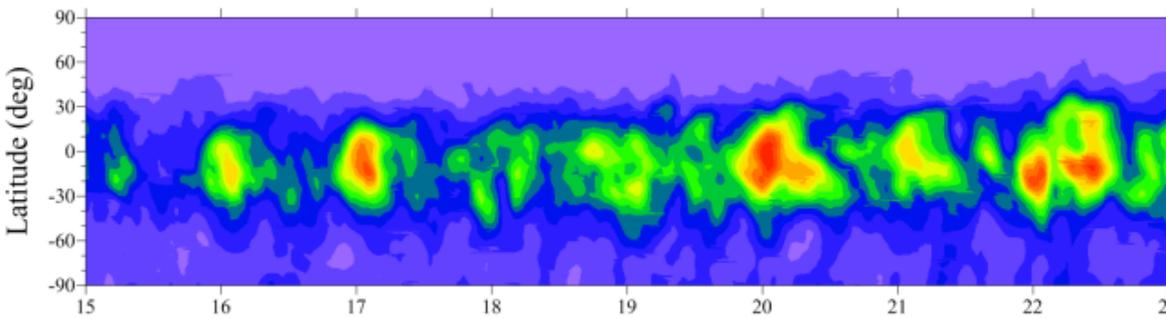
$\Delta\text{TEC}_{\text{mean 8}}$  (TECU)



January 2005

# Ансамблевые модельные расчеты – новая парадигма в моделировании ионосферы

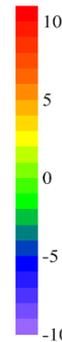
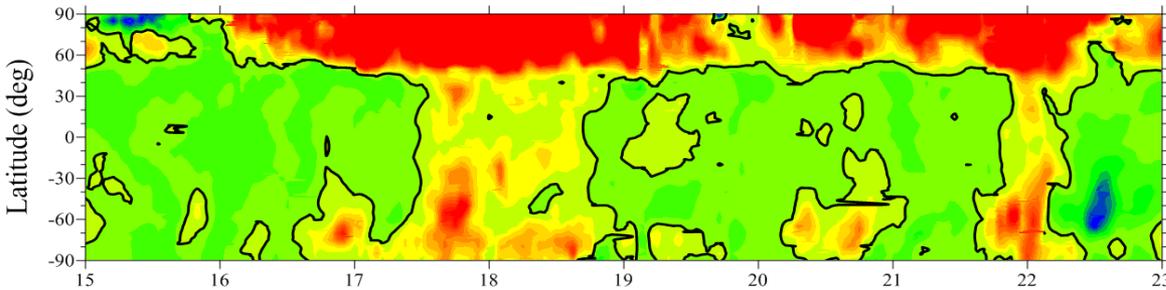
EAGLE  $\sigma\Delta\text{TEC}_{\text{mean}}$  (TECU)



$$\sigma(\varphi, t) = \sqrt{\frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^8 (\Delta f_i(\varphi, t) - \langle \Delta f(\varphi, t) \rangle)^2}$$

**шум за счет  
вариаций в  
атмосфере**

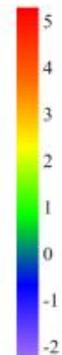
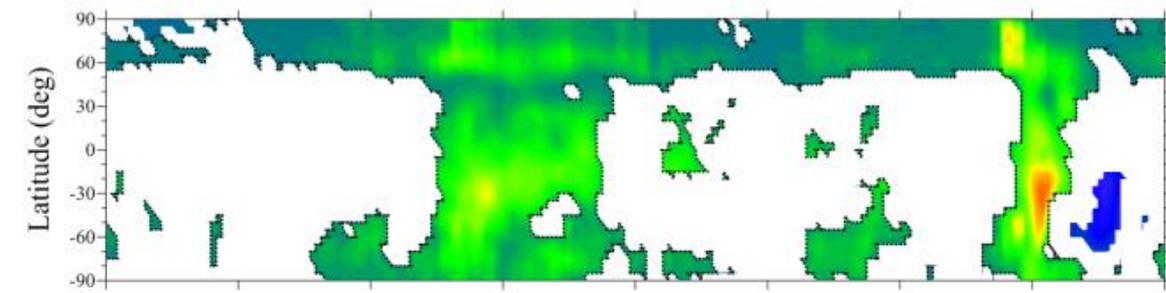
January 2005  
EAGLE  $\Delta\text{TEC}_{\text{mean}}/\sigma\Delta\text{TEC}_{\text{mean}}$



**Отношение  
сигнал/шум**

$$Rs(\varphi, t) = \langle \Delta f(\varphi, t) \rangle / \sigma(\varphi, t)$$

January 2005  
EAGLE  $\Delta\text{TEC}_{\text{mean}}^{\text{sign}}$  (TECU)

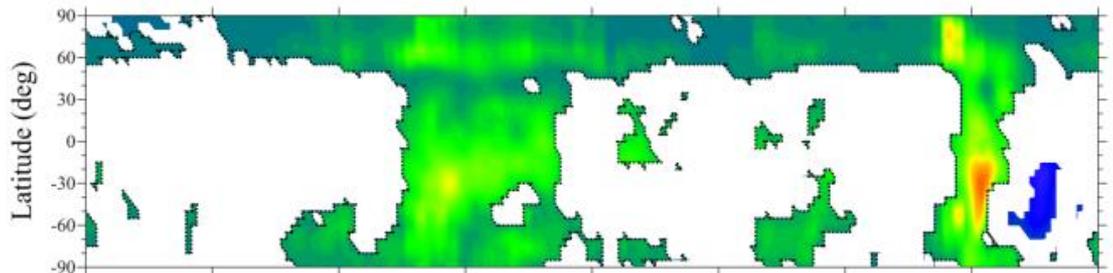


**Значимые  
возмущение**

$$\langle \Delta f(\varphi, t) \rangle = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^8 \Delta f_i(\varphi, t)$$

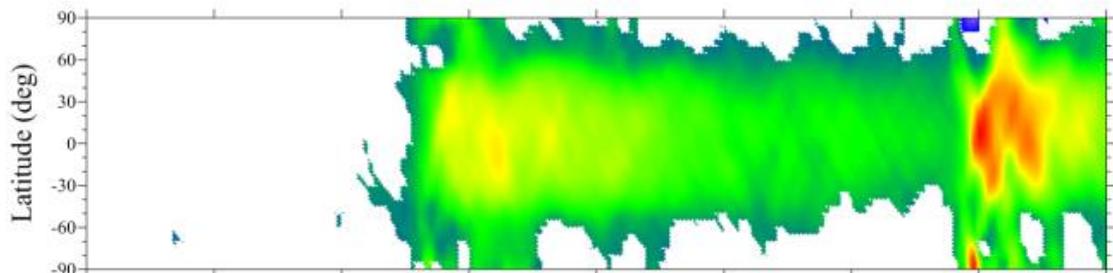
15 16 17 18 19 20 21 22

EAGLE  $\Delta\text{TEC}_{\text{mean}}\text{sign}$  (TECU)



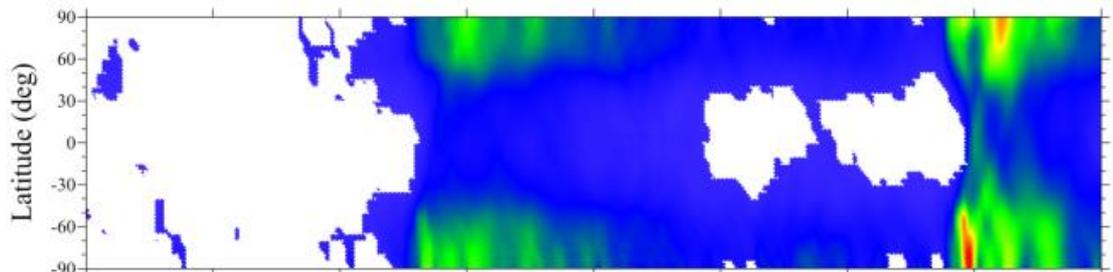
**Значимые  
возмущение  
возмущения ТЕС**

EAGLE  $\Delta n(\text{O})_{\text{mean}}\text{sign}$  ( $10^8 \text{ cm}^{-3}$ )  $h = 250 \text{ km}$



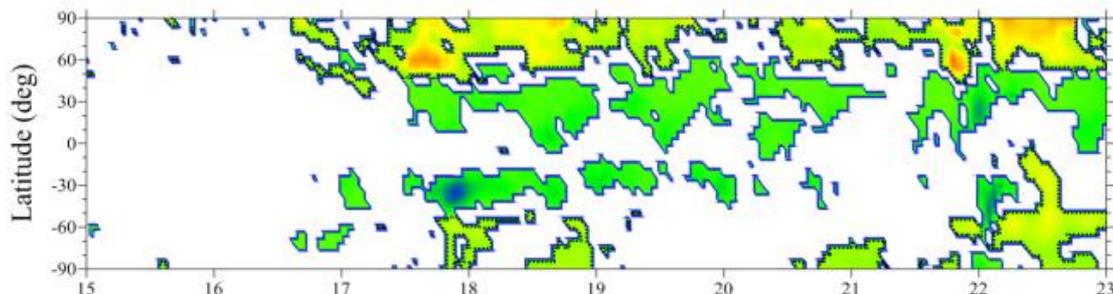
**возмущения  $n(\text{O})$**

EAGLE  $\Delta n(\text{N}_2)_{\text{mean}}\text{sign}$  ( $10^8 \text{ cm}^{-3}$ )  $h = 250 \text{ km}$



**возмущения  $n(\text{N}_2)$**

EAGLE  $\Delta T_e$  mean sign (K)  $h = 250 \text{ km}$



**возмущения  $T_e$**

**15 16 17 18 19 20 21 22**  
January 2009

# А) Главная фаза геомагнитной бури

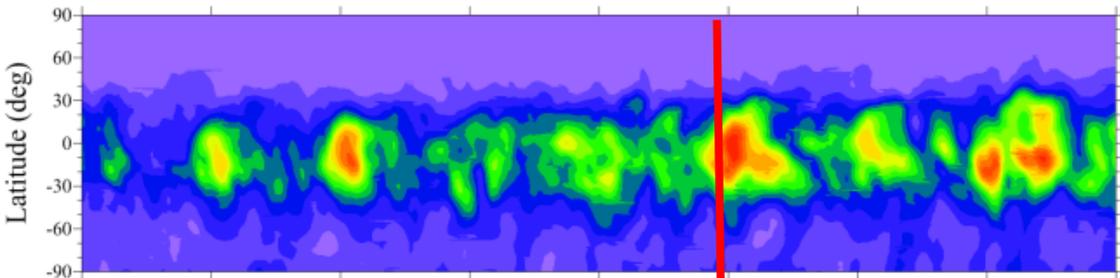
С момента начала бури

1 – 3 часа после  
начала бури

4 – 12 часов после  
начала бури



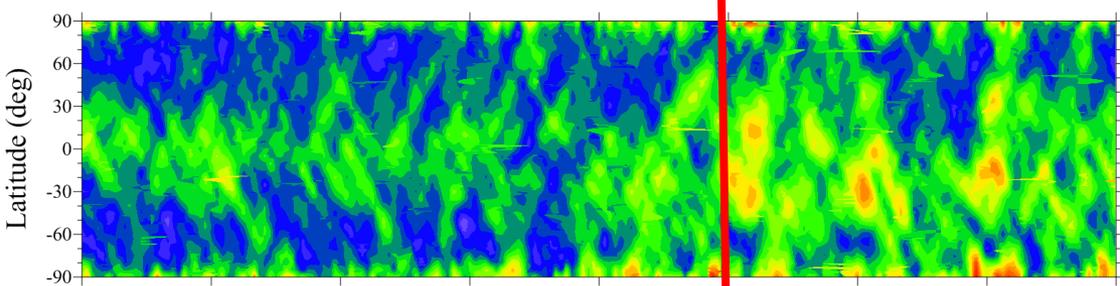
EAGLE  $\sigma\Delta\text{TEC}_{\text{mean}}$  (TECU)



$$\sigma(\varphi, t) = \sqrt{\frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^8 (\Delta f_i(\varphi, t) - \langle \Delta f(\varphi, t) \rangle)^2}$$

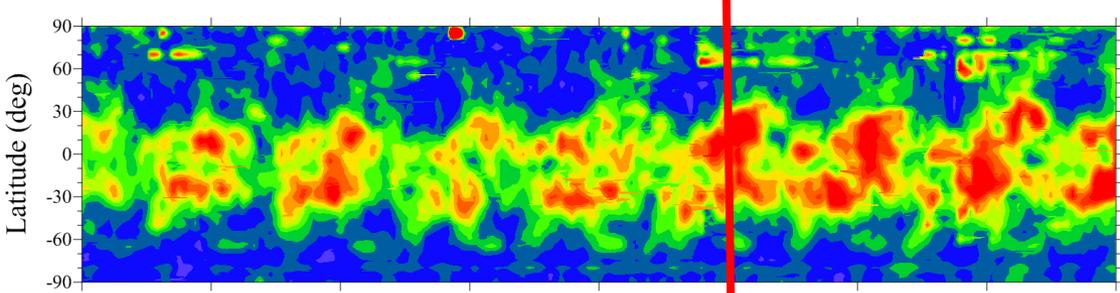
**Среднеквадратичное шум ТЕС отклонение**

EAGLE  $\sigma\Delta n(\text{O})_{\text{mean}}$  ( $10^8 \text{ cm}^{-3}$ )  $h = 250 \text{ km}$



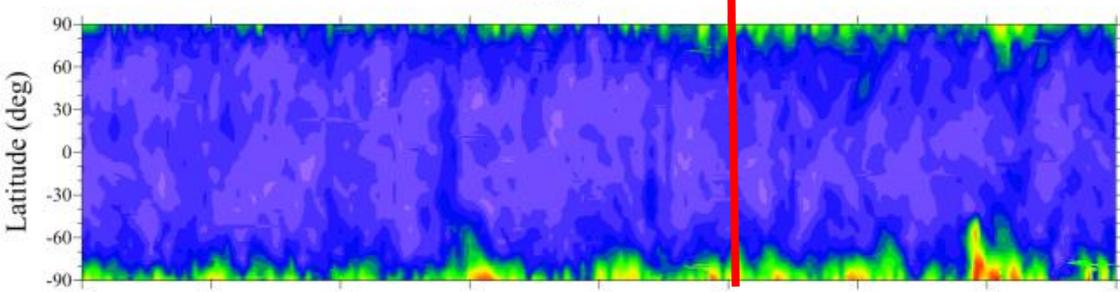
**Шум за счет вариаций в атмосфере - Internal atmospheric variability**

EAGLE  $\sigma\Delta T_e_{\text{mean}}$  (K)  $h = 250 \text{ km}$



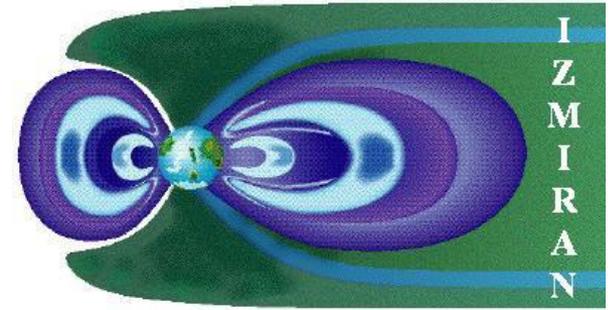
**шум n(N2)**

EAGLE  $\sigma\Delta n(\text{N}_2)_{\text{mean}}$  ( $10^8 \text{ cm}^{-3}$ )  $h = 250 \text{ km}$



**шум Te**

15 16 17 18 19 20 21 22 23  
January 2005



## Заключение

- В рамках гранта РФФИ создана первая Российская модель всей атмосферы - EAGLE, охватывающая высоты от поверхности Земли до 100 000 км
- Подтверждена важная роль атмосферно-ионосферного взаимодействия при описании ионосферных возмущений во время сложного явления космической погоды
- Представлена оценка роли высыпаний протонов на динамические процессы и вариативность параметров верхней атмосферы

## Планы

Расчет этого события с учетом эффектов геомагнитных возмущений на моделях GCM ТИП и EAGLE.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-17-00208.

# THANKS FOR YOUR ATTENTION!

## Welcome to Kaliningrad in 2023 (AIS and MIAC)



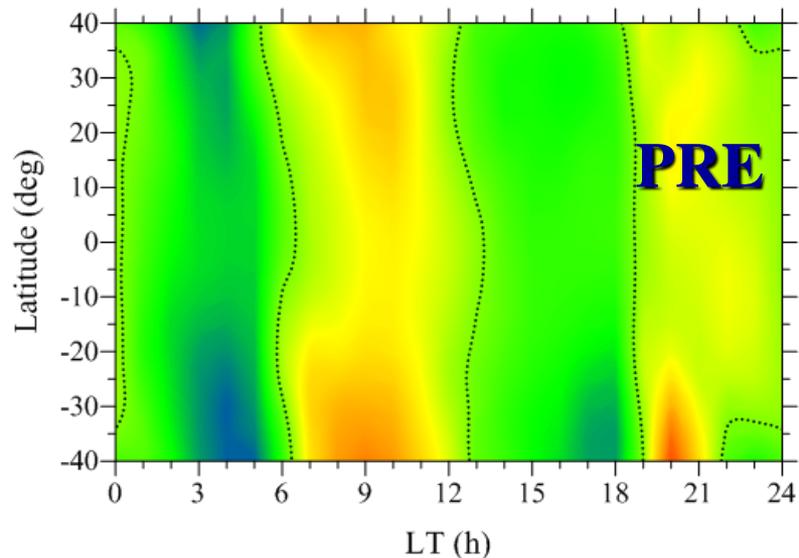
**AIS – Atmosphere, Ionosphere, Safety conference**

**MIAC – Magnetosphere-Ionosphere-Atmosphere  
Coupling School for Young Scientists**

# PRE и 4-пиковая структура в зональном поле

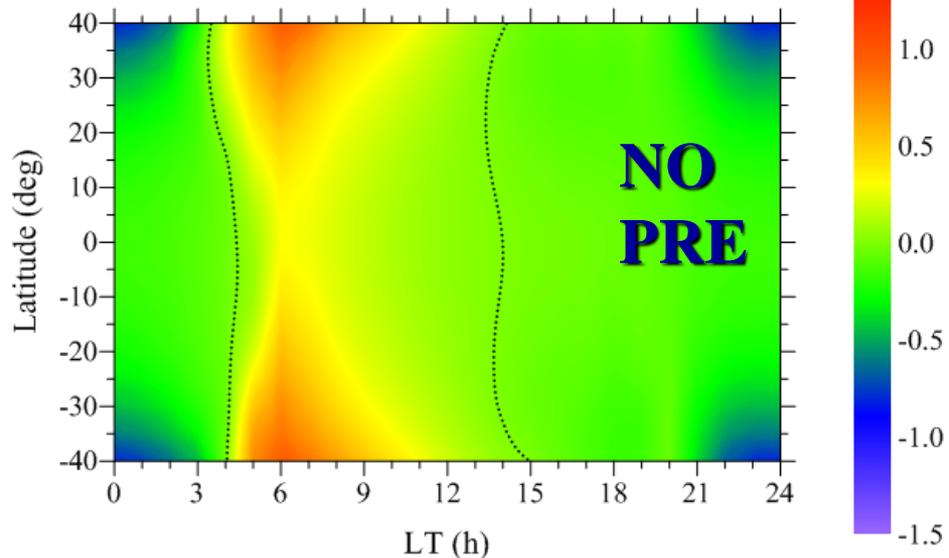
## EAGLE

$E_{zon}$  (mV/m) h=175 km EAGLE-120 15.01.2009

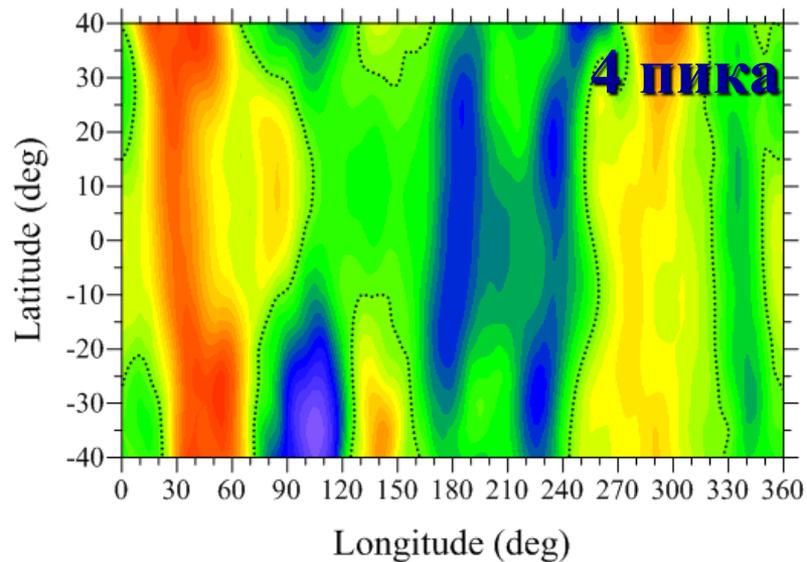


## ГСМ ТИП

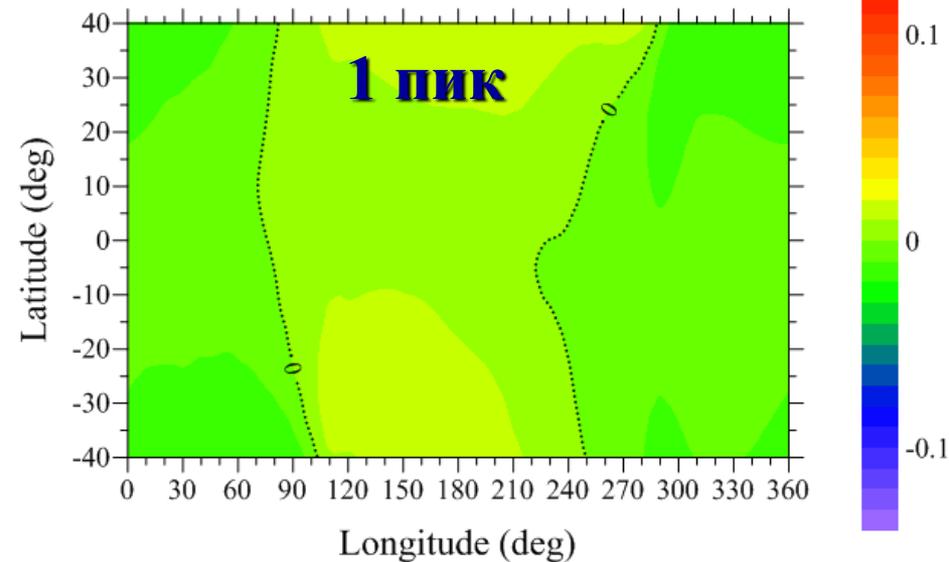
$E_{zon}$  (mV/m) h=175 km GSM TIP 15.01.2009



$E_{zon}$  (mV/m) EAGLE-120 with offset 15.01.2009



$E_{zon}$  (mV/m) h=175 km GSM TIP 15.01.2009



# Солнечные протонные события

## *Reames, 1999*

Выброс корональной массы → ускорение плазмы → Солнечное Протонное Событие (СПС)

Интегральный поток протонов с энергиями выше 10 MeV превышает 1 pfu = 1 cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup>

## *Patterson et al., 2001*

Солнечные протоны высыпаются в магнитосферу в основном в области полярных шапок

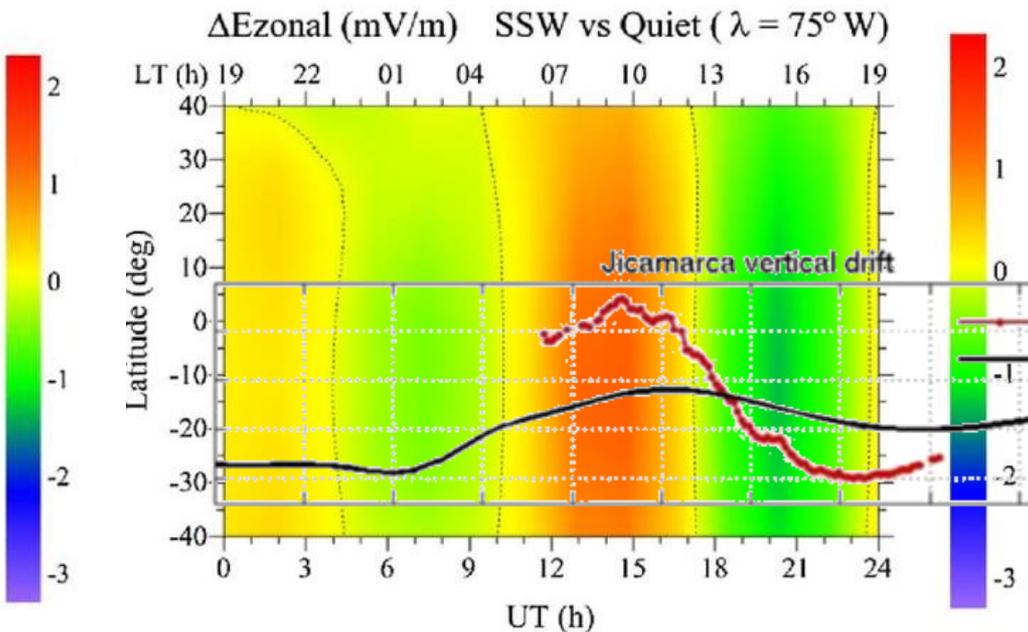
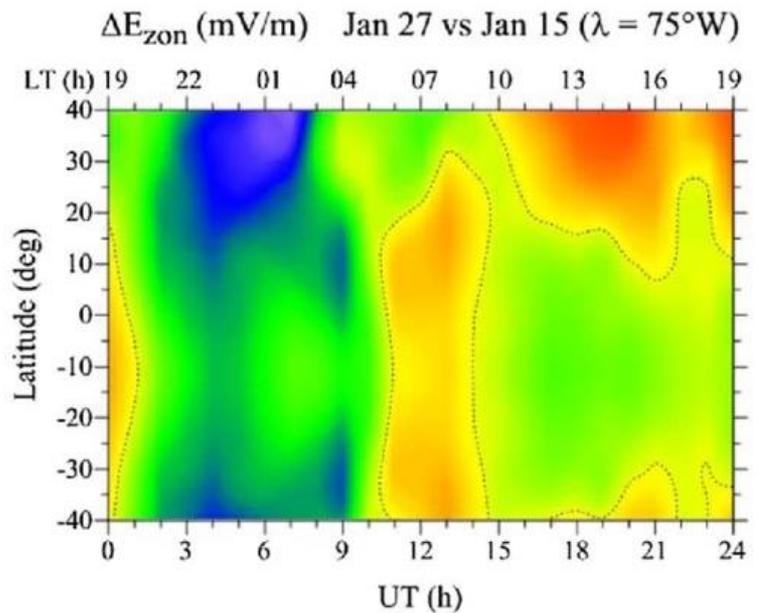
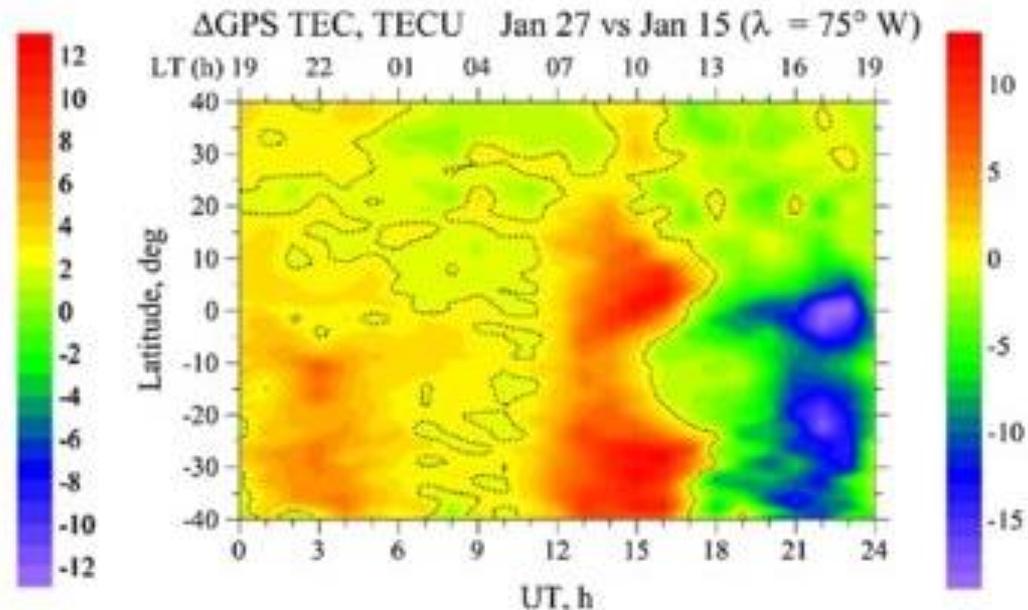
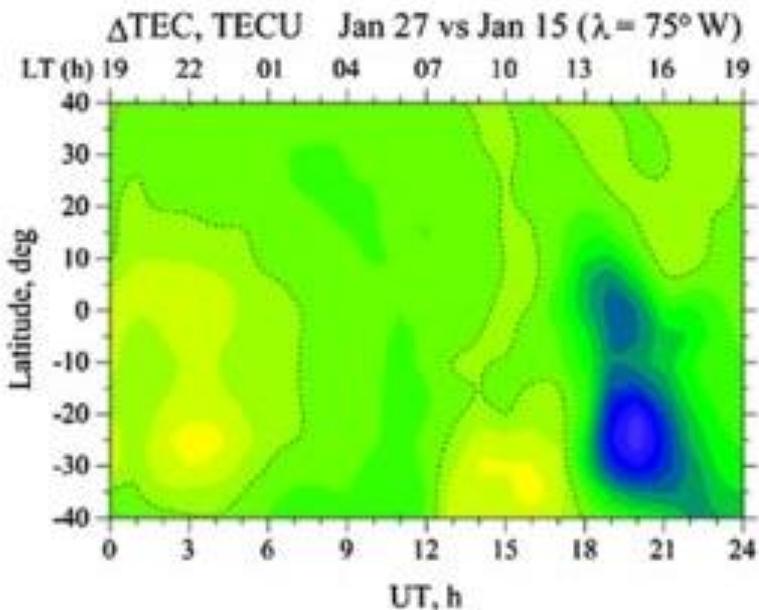
Протоны могут иметь очень высокие энергии (до ГэВ)

Наибольшее количество энергии высвобождается в мезосфере и стратосфере

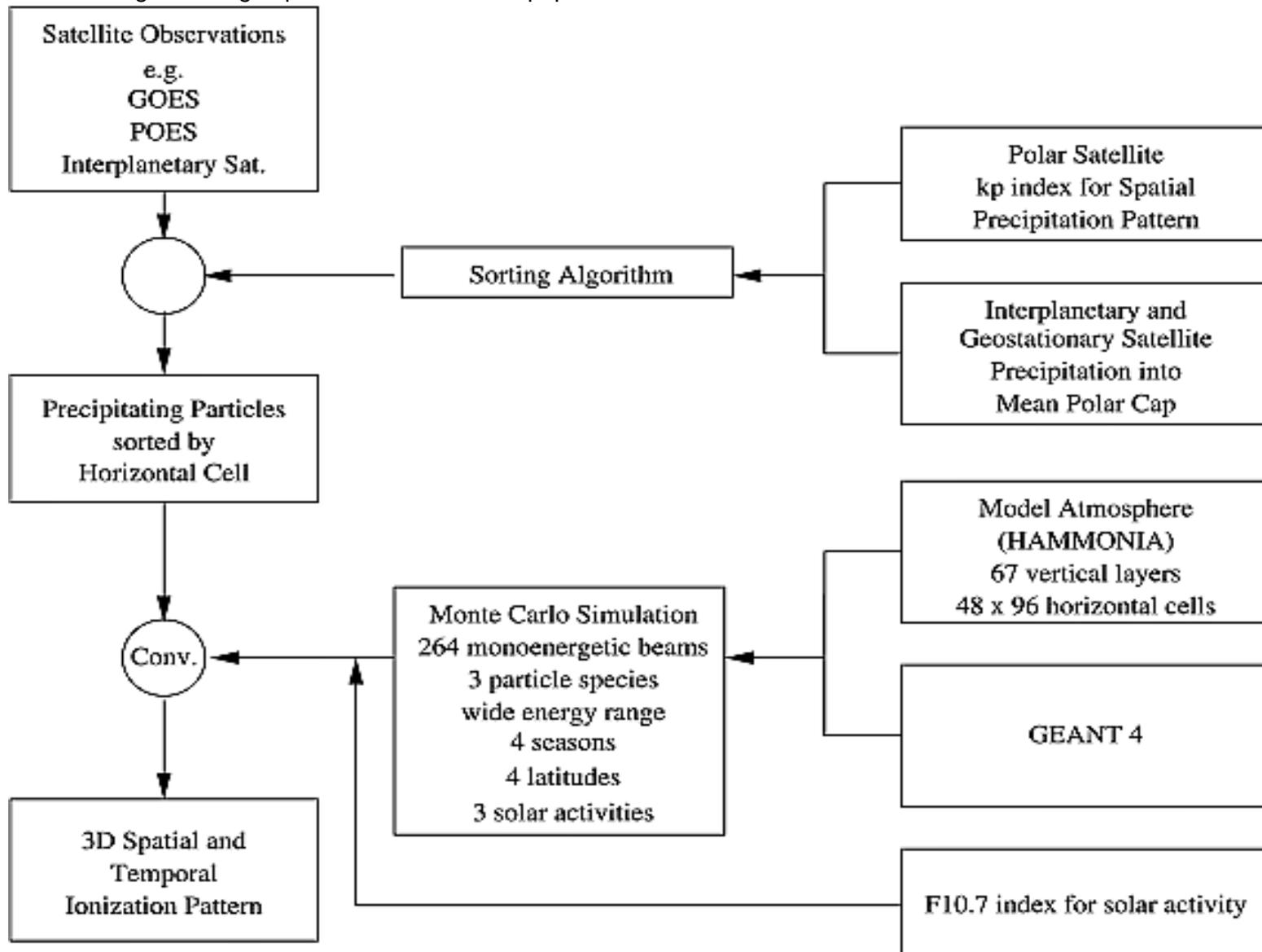
С 1976 по 2017, 267 СПС было зарегистрировано

В среднем около 80 случаев за 11-летний солнечный цикл (<http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>).

# Отклик на стратосферное потепление 2009 г.



Atmospheric Ionization Module Osnabrück (AIMOS): A 3-D model to determine atmospheric ionization by energetic charged particles from different populations

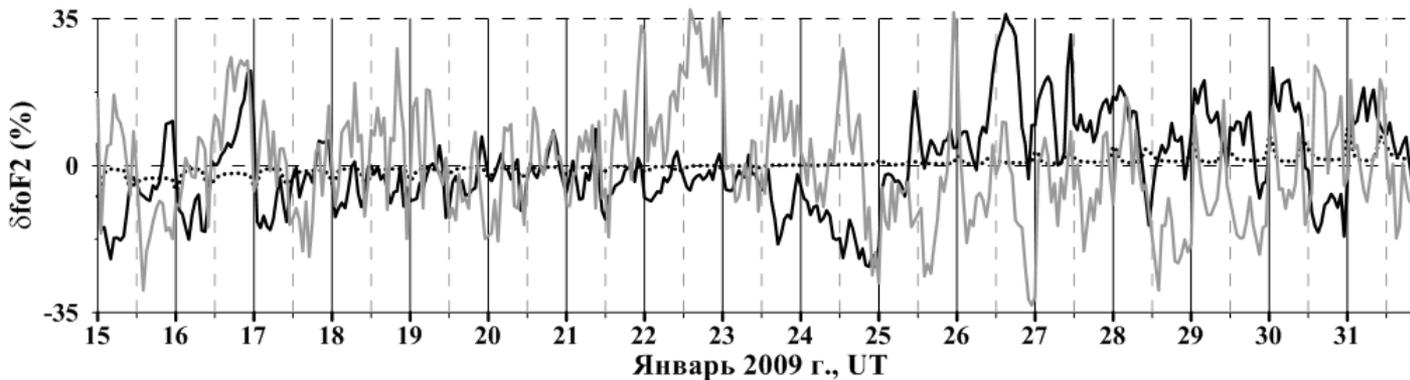


In ensemble calculations, the initial conditions of the temperature fields at altitudes of 0-90 km randomly changed by 1 K. These temperature changes at different heights and different points in space were not systematic but rather represent a spatial white noise. Calculations were carried out from January 1 to January 31 for quiet and disturbed conditions. In the quiet conditions runs, the precipitation of protons was prescribed on the January 1 level, while in the perturbed conditions runs the proton precipitation changed every 2 hours according to the AIMOS model.

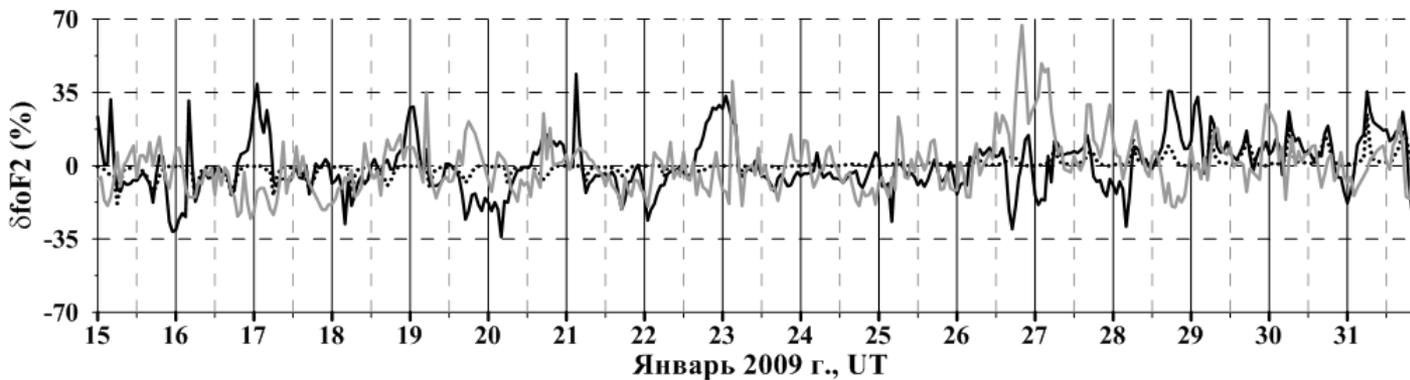
Based on calculations for each ensemble member, we obtained zonal mean values of the different thermospheric and ionospheric parameters ( $T_e$ ,  $n(O)$  and  $n(N_2)$  at 250 km altitude and TEC) for quiet,  $f_{q,i}(\varphi, t)$ , and disturbed,  $f_{d,i}(\varphi, t)$ , conditions. Here  $i$  is the number of ensemble members,  $\varphi$  is geographic latitude,  $t$  is a time in UT. Then we calculated of 8 anomalies of the zonal mean values of these thermospheric and ionospheric parameters:

$$\Delta f_i(\varphi, t) = f_{d,i}(\varphi, t) - f_{q,i}(\varphi, t)$$

# Атмосферно-ионосферные связи в формировании изменчивости ионосферы



Irkutsk



Kaliningrad

	dfoF2 (%)	
	Kaliningrad	Irkutsk
EAGLE	13	11
GSMTIP	4	2
Observations	13	13

# Использование ансамблевых расчетов

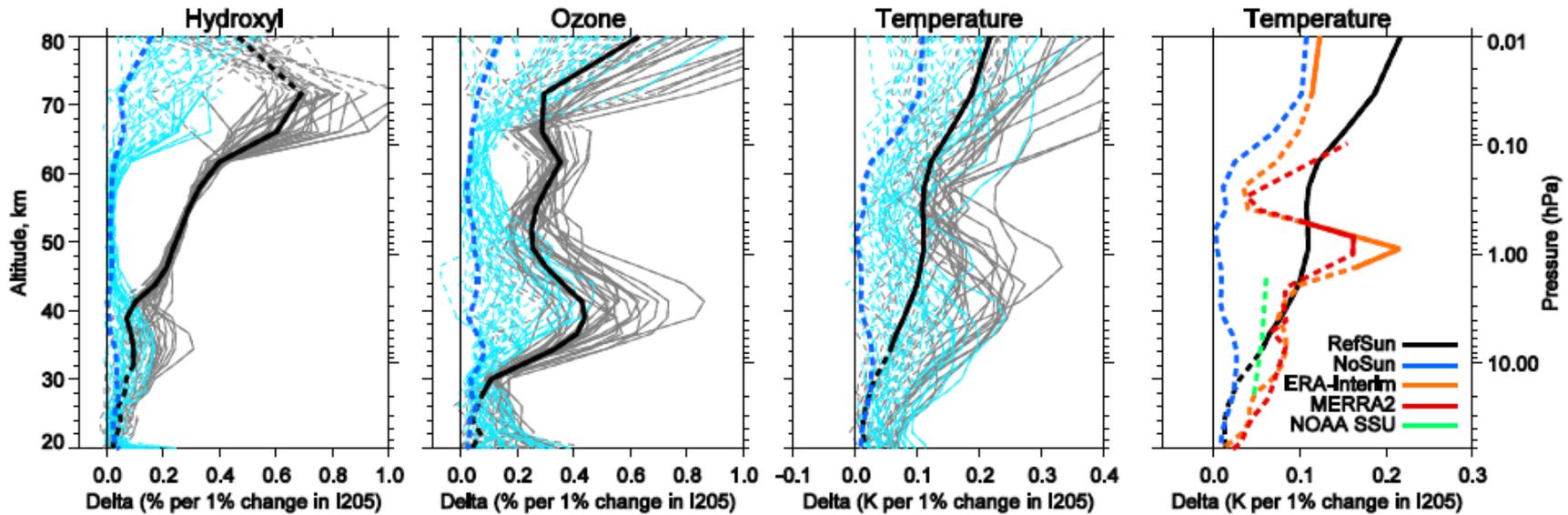


Fig. 7. Sensitivities of tropical mean hydroxyl, ozone and temperature to 1% change in I205. Sensitivities are derived using a linear regression method at a lag of maximum positive correlation. Thin lines represent results obtained from separate ensemble members; thick lines represent results obtained from ensemble mean cases, reanalysis and observations. Dashed lines represent cases when the related correlation coefficient is lower than 0.2.

Sukhodolov et al., 2016

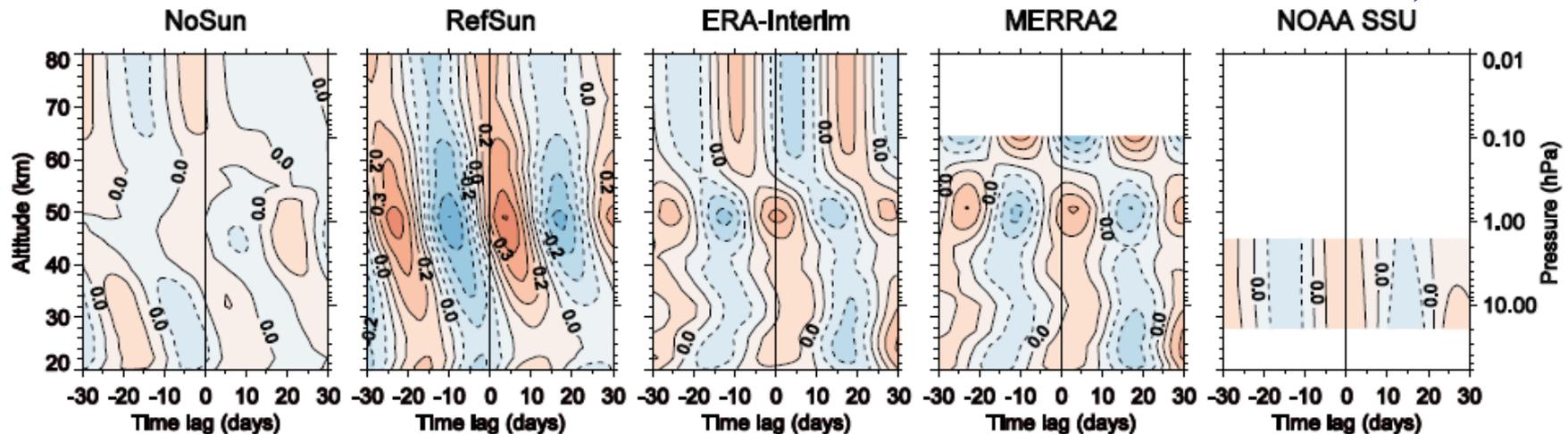


Fig. 5. Cross-correlation functions of tropical mean (21S-21N) zonal mean temperature versus the solar irradiance at 205 nm, obtained from the ensemble mean NoSun run, ensemble mean RefSun run, ERA-Interim and MERRA2 reanalysis, and NOAA SSU observations for the 2003–2004 years period. Contour lines are plotted at 0.1 intervals; red represents positive correlations, blue negative.

# $\Delta$ TEC Correlation

