



**МЕЖДУНАРОДНАЯ БАЙКАЛЬСКАЯ МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНАЯ
ШКОЛА ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ «ФИЗИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ В КОСМОСЕ И ОКОЛОЗЕМНОЙ СРЕДЕ»**



**XVI Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»
Иркутск, 16 – 21 сентября 2019 г.**

ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМЫ ТЕРМОСФЕРА-ИОНОСФЕРА

**Клименко М.В.¹, Клименко В.В.¹, Бессараб Ф.С.¹, Кореньков Ю.Н.¹,
Суходолов Т.В.¹, Розанов Е.В.¹, Захаренкова И.Е.¹, Чирик Н.В.¹,
Коренькова Н.А.¹, Котова Д.С.¹, Оводенко В.Б.¹, Лисина В.Л.²,
Ратовский К.Г.³, Ясюкевич А.С.³, Ясюкевич Ю.В.³, Карпачев А.Т.⁴,
Мингалев О.В.⁵, Мингалев И.В.⁵**

¹*Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия,
e-mail: maksim.klimenko@mail.ru*

²*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия*

³*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

⁴*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

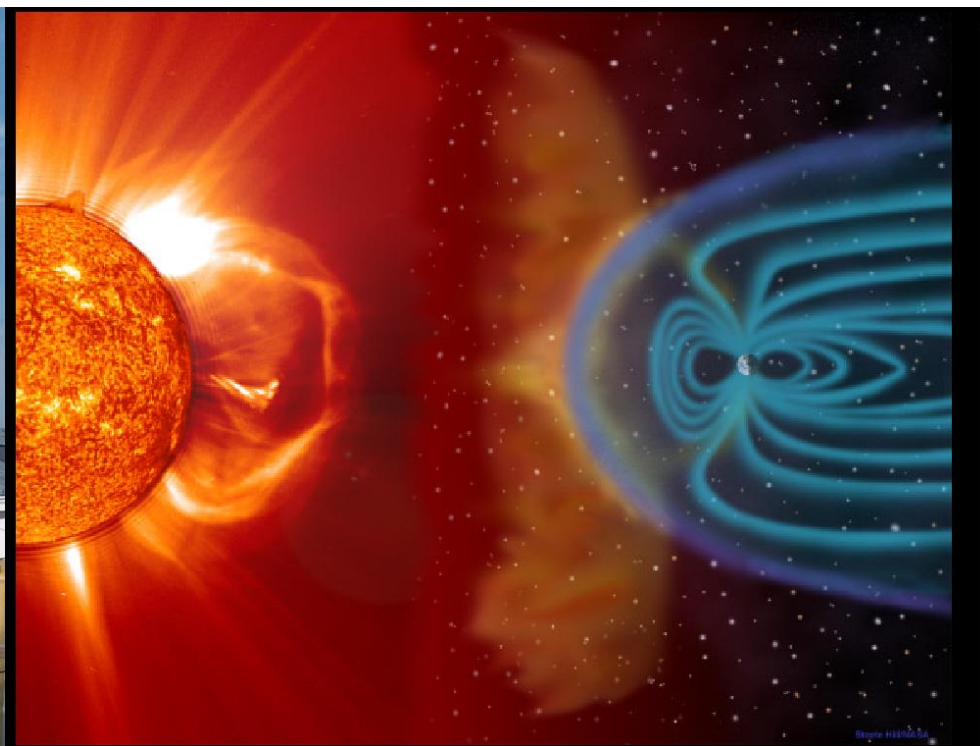
⁵*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия*

ИЗМИРАН (1939)

Москва, Троицк

КФ ИЗМИРАН (1957)

Калининград



Открытие ионосферы имеет свою интересную историю.

Вывод о существовании в космосе над Землёй проводящей области был независимо сделан, исходя из наблюдений:

1) вариаций МПЗ,

2) сверхдальнего распространения радиоволн.

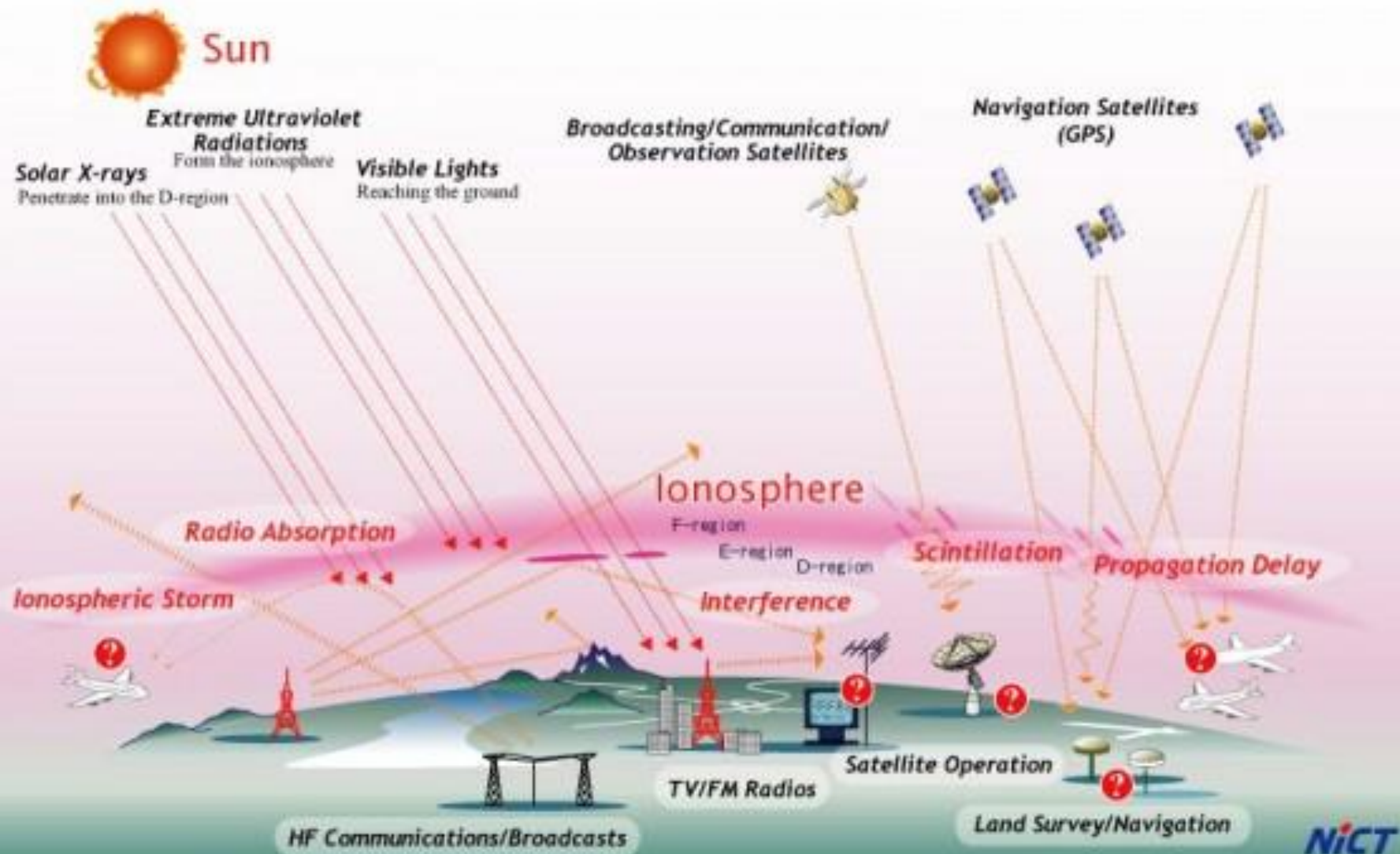
Долгое время (до 30-х годов XX ст.) факты 1) и 2) изучались параллельно и независимо.

Поэтому очень правильное название головного советского института: **ИЗМИРАН**

– Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (АН СССР).

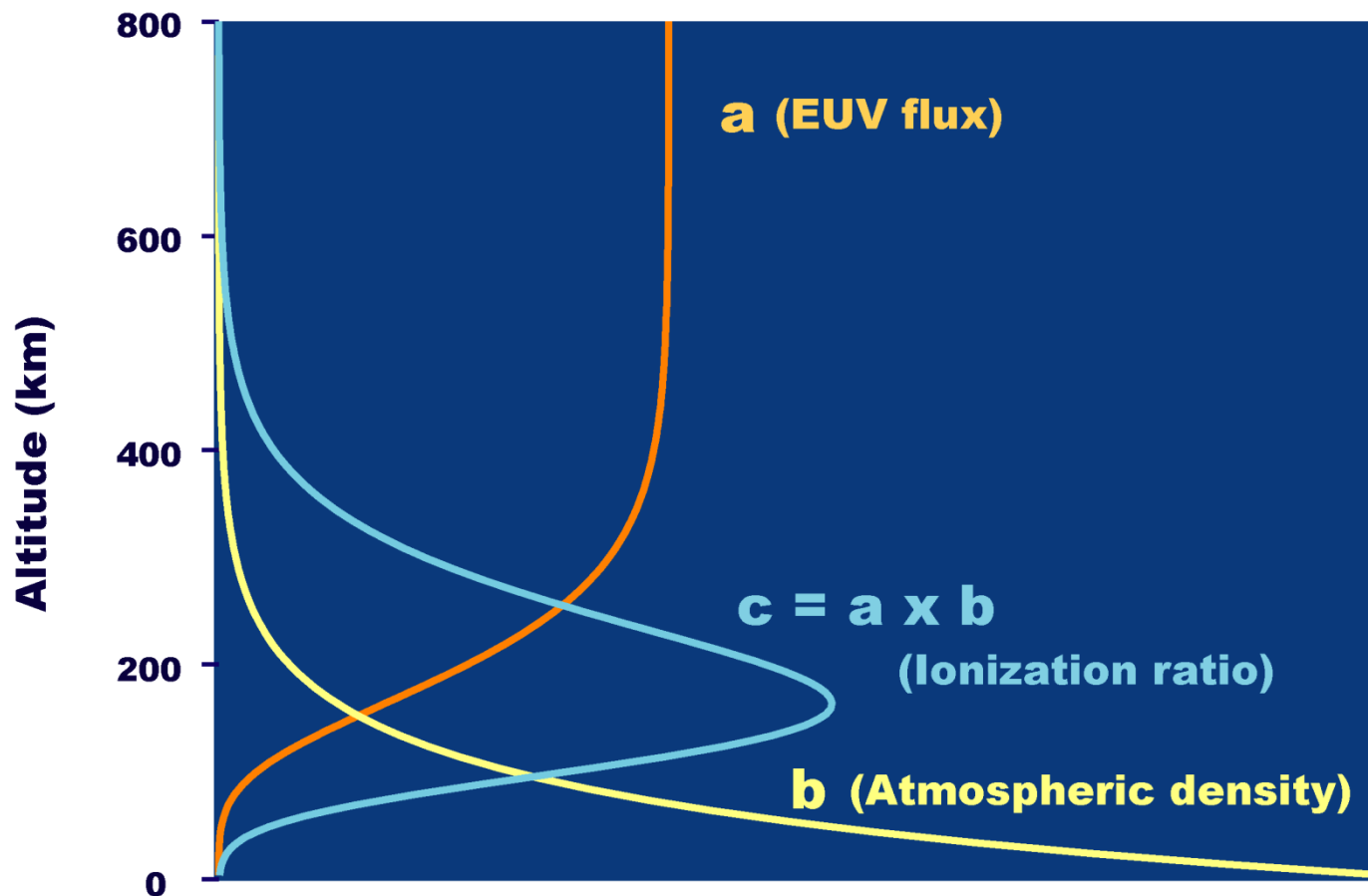
Прикладные аспекты данной задачи

Ionospheric Effects on Radio Applications



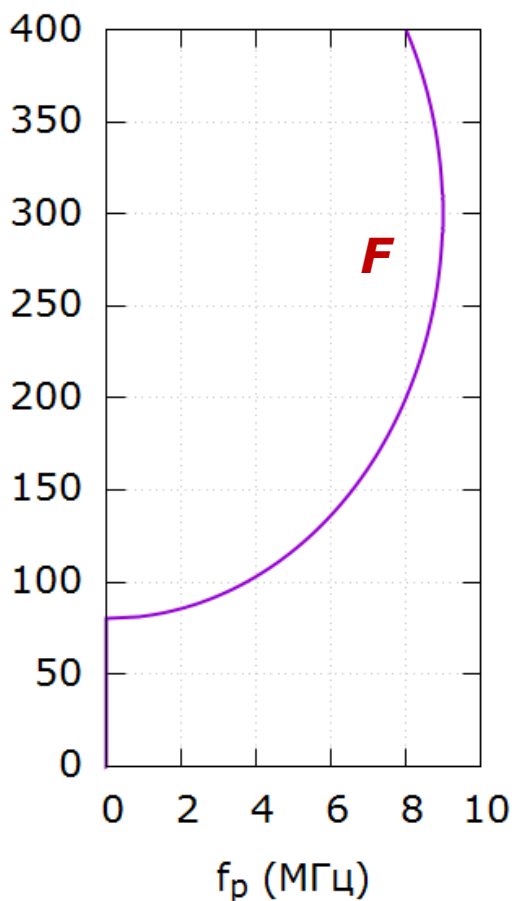
Аналитическое представление ионосферы

Ion Production by Solar EUV

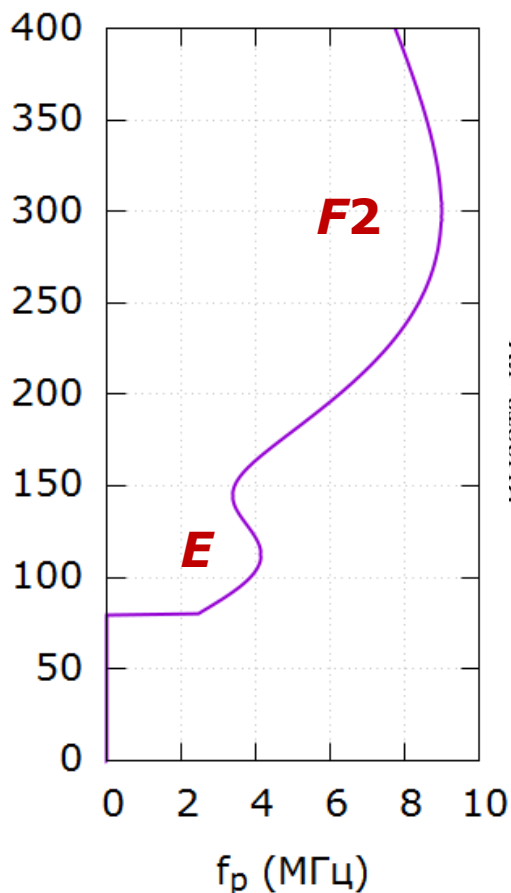


Примеры аналитического задания ионосферы

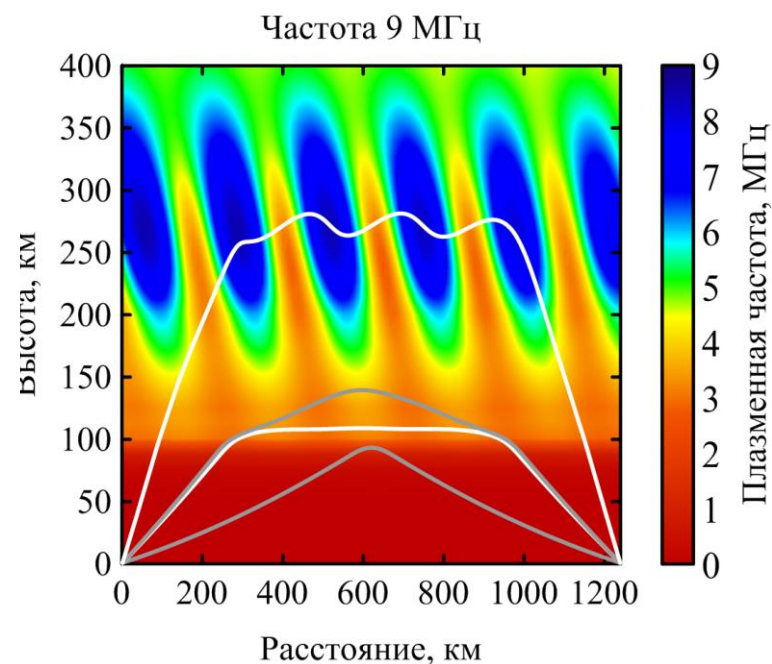
параболический



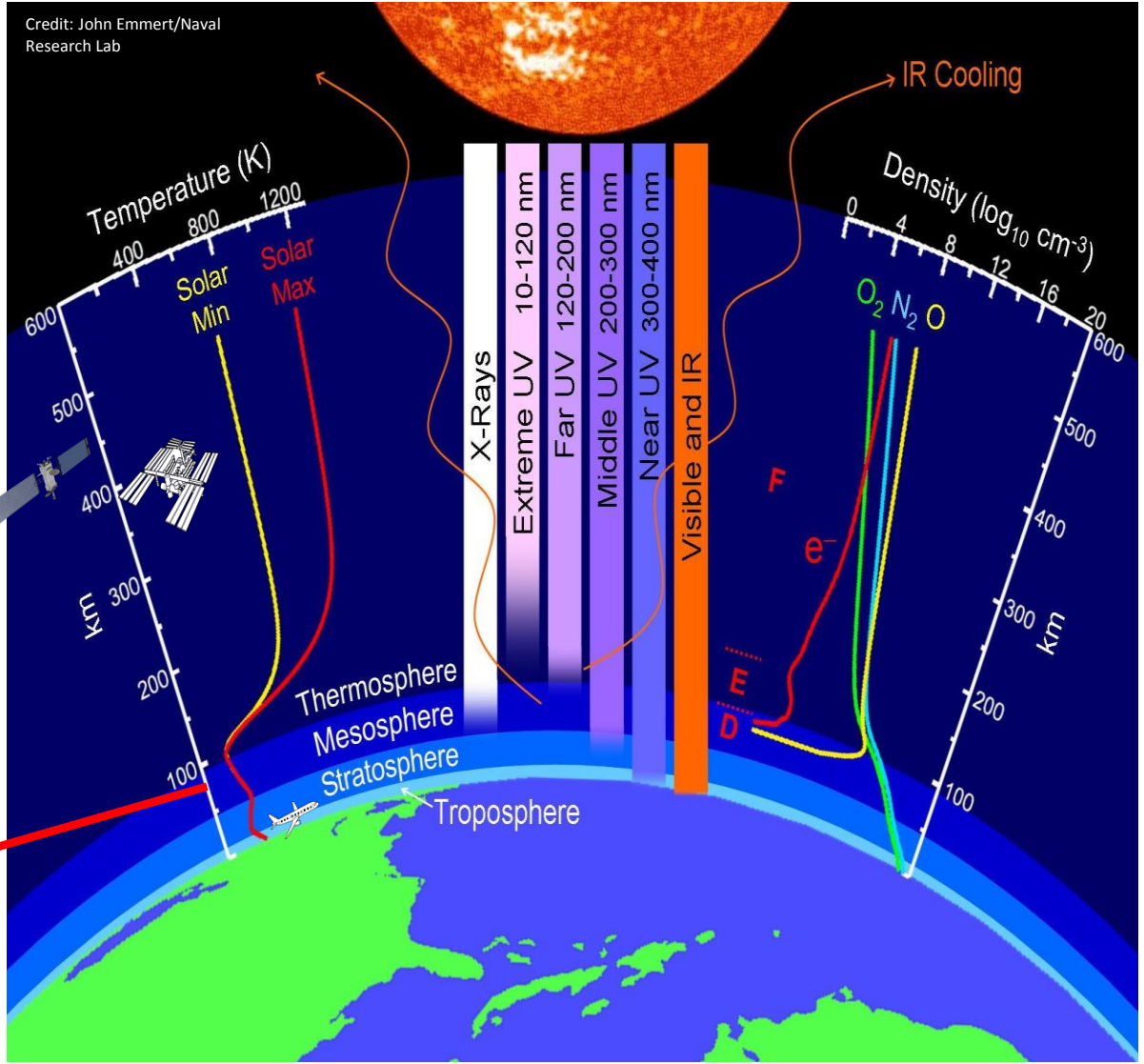
двухпараболический



с неоднородностями в виде ПИВ



Кому и Почему аналитических представлений недостаточно?



Верхняя атмосфера

Космическая погода
SPACE WEATHER

80-90 км

Средняя/нижняя атмосфера
Погода, климат
WEATHER, CLIMATE

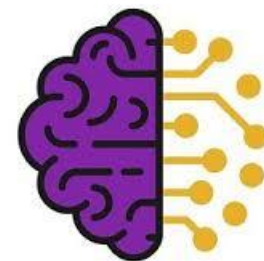
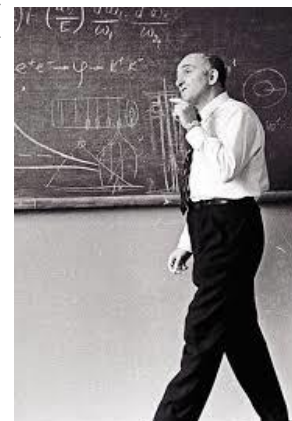
Все взаимосвязано!

Типы моделей термосферы/ионосферы

Локальные, Региональные, Глобальные



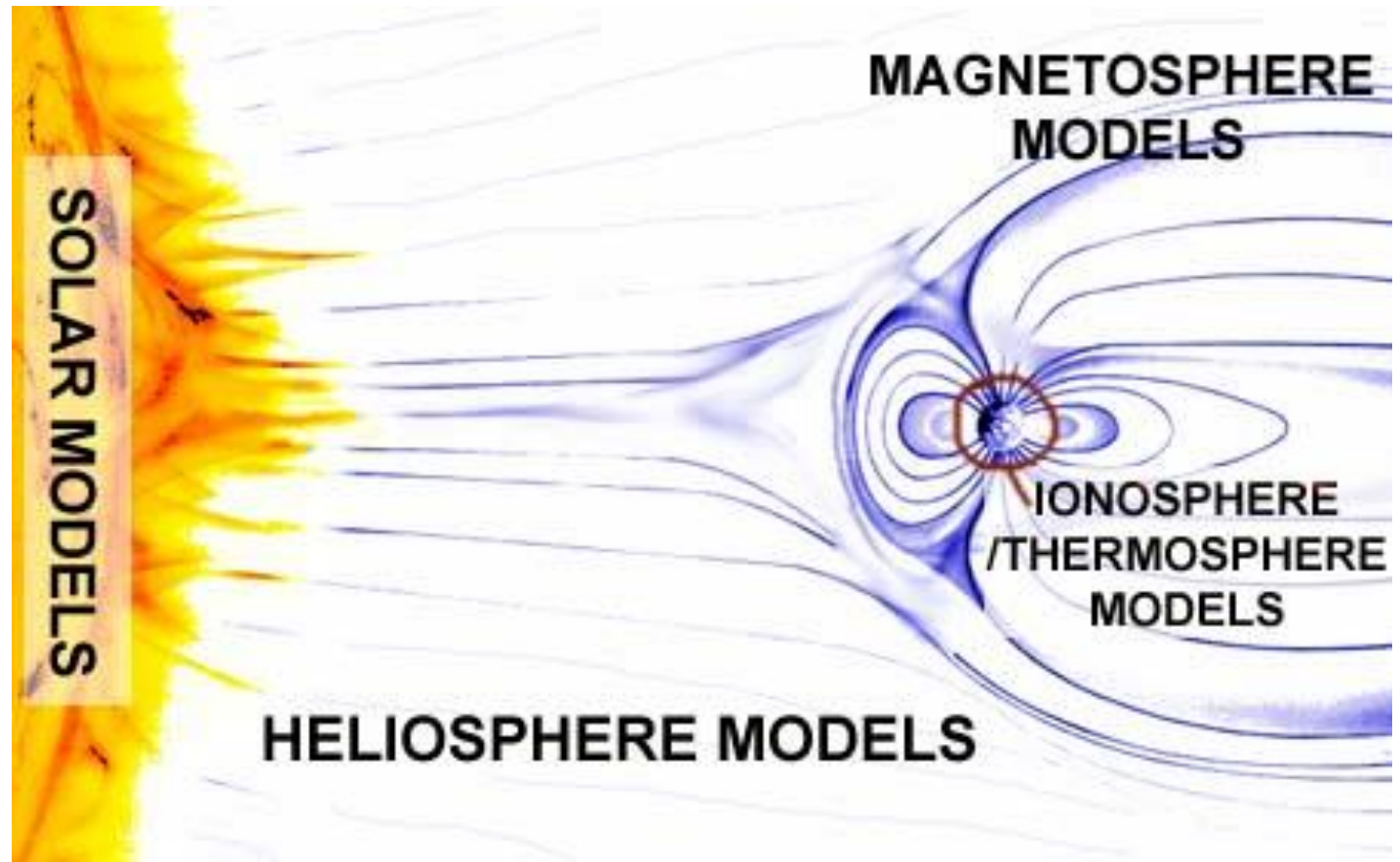
- Эмпирические (empirical)
- Искусственные нейронные сети
- Численные (first principles)
- Ассимиляционные (assimilative)



BIGDATA



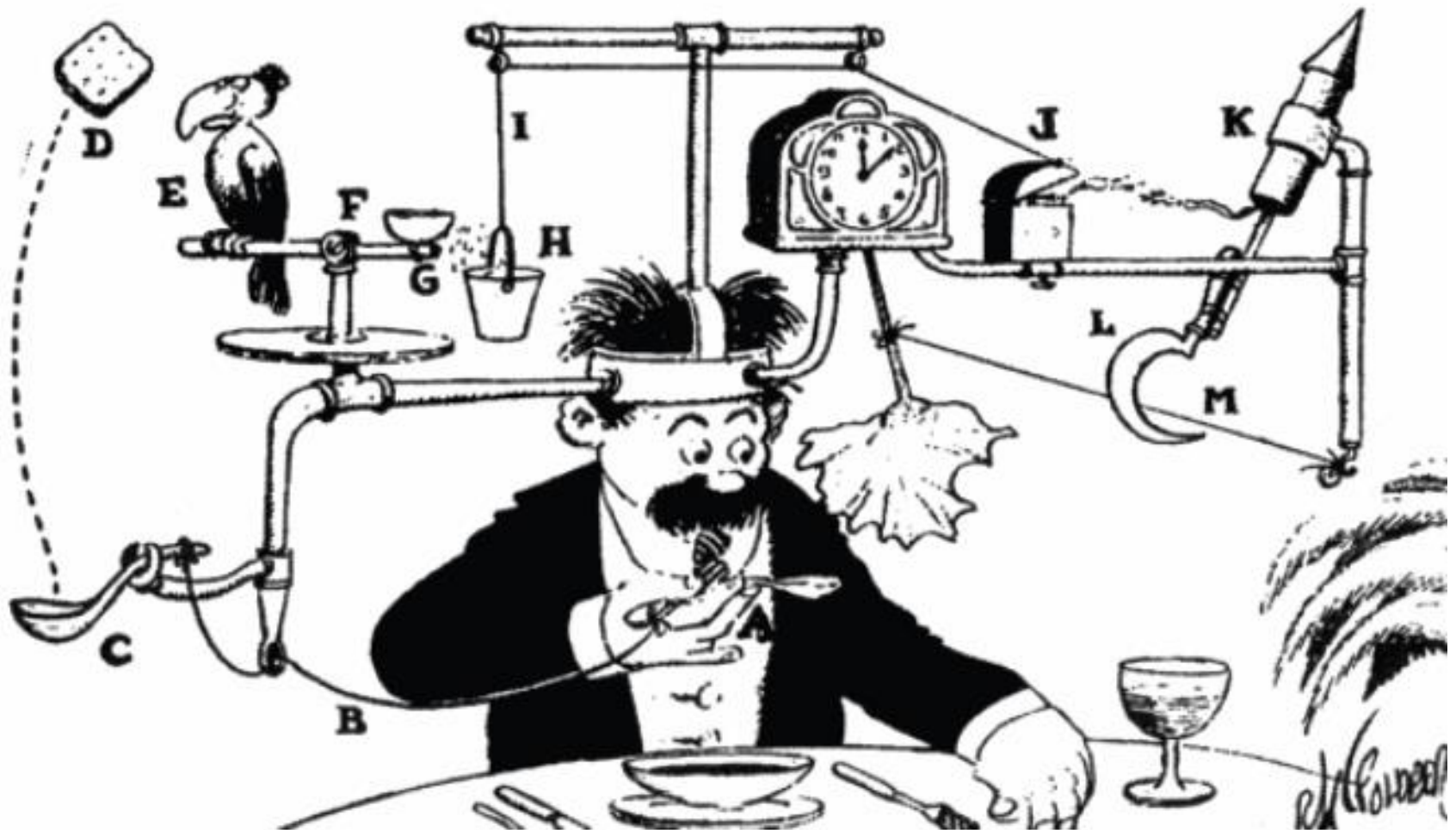
Американская база данных моделей



<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/>

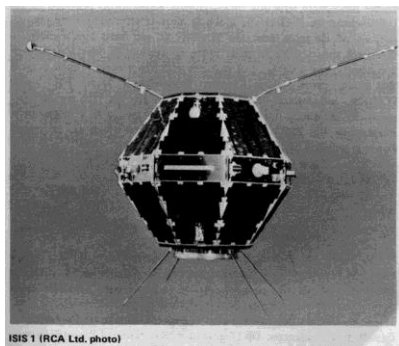
Девиз эмпирических моделей (и не только)

Sometimes simple is preferable to complicated.



Иногда простое предпочтительнее сложного

Эмпирические модели (Принцип построения)

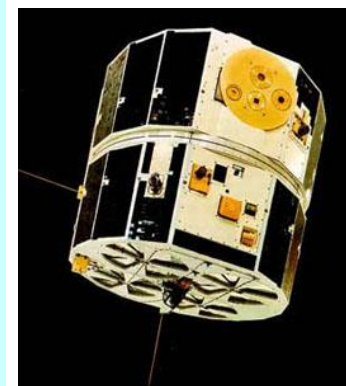


ISIS 1 (RCA Ltd. photo)

Polar Gateways Meeting
Barrow, Alaska, Jan 23-29,
2008

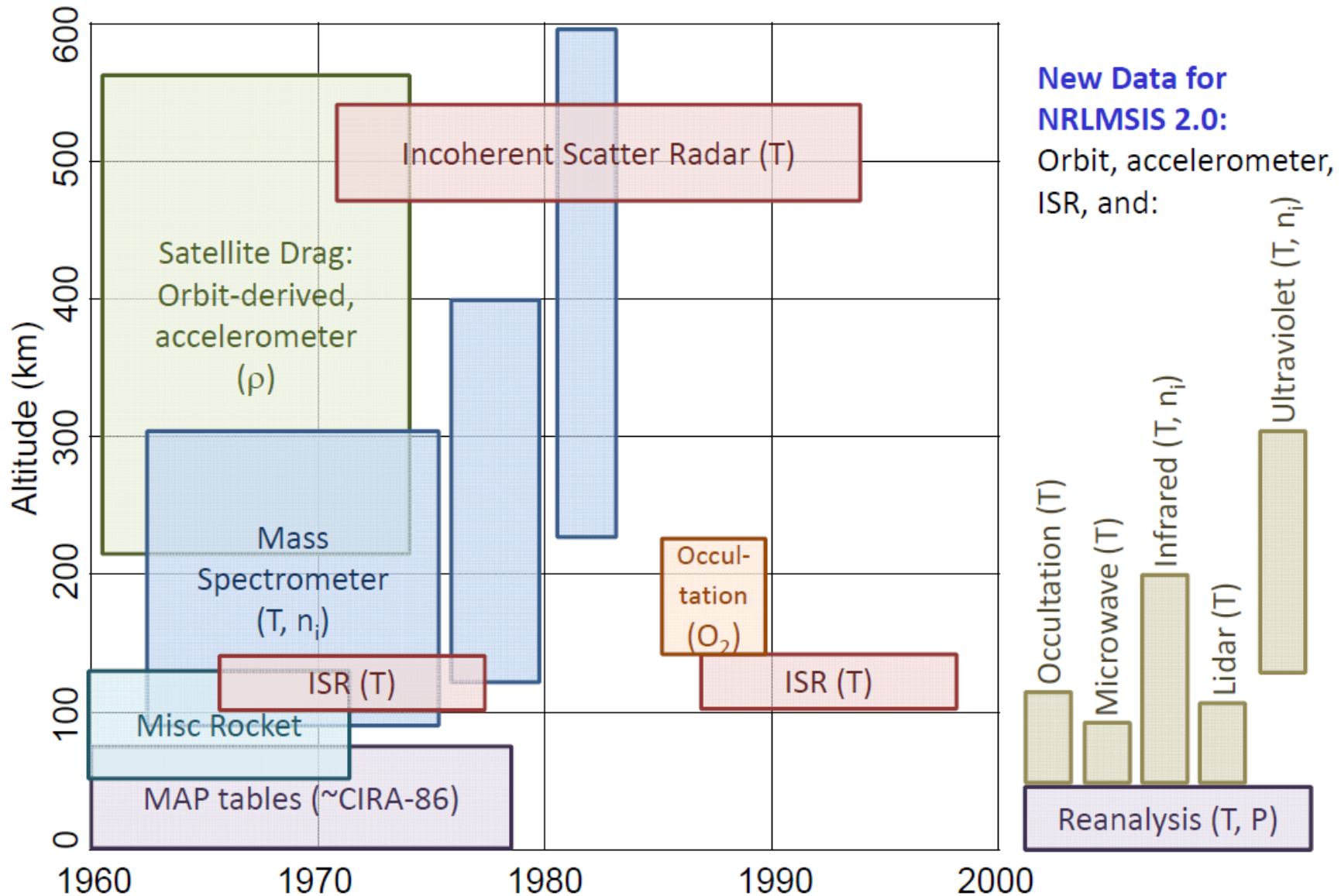
Data Sources

<i>Instrument</i>	<i>Platform</i>	<i>Used for</i>	<i>Comments</i>
Ionosondes	Worldwide Network	N_e from E to F2	Fifties to now
Incoherent Scatter Radar	Jicamarca, Arecibo, St. Santin, MillstoneH., Malvern,	N_e profile (E- valley) T_e, T_i	Few radars, many parameters
Topside Sounder	Alouette 1, 2 ISIS 1, 2	N_e topside profile	newer data from Ohzora, ISS-b, IK-19
Insitu Aeros-A,-B	AE-C,-D,-E profile,T_e,T_i, IK-24, DE-2	N_e topside profile, DMSP, OGO ion comp.	many more: Hinotori
Rocket	data compilations	N_e D-region, Ion comp.	sparse data set



Данные для построения модели MSIS

NRLMSISE-00 Data



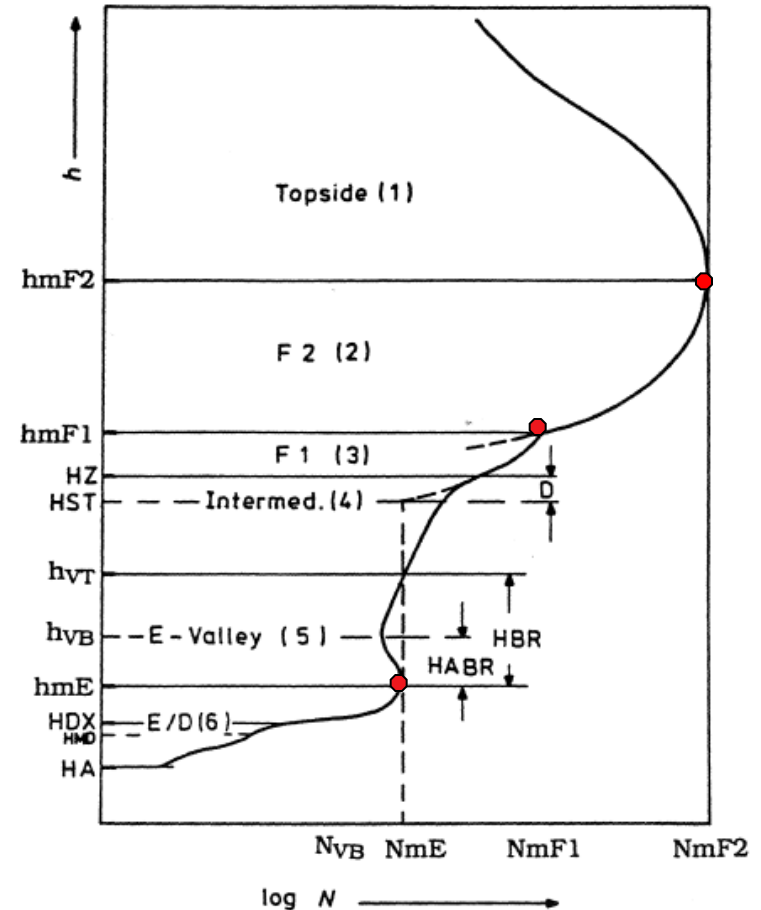
Формализм эмпирической модели на примере IRI

Математические функции:

**Глобальное распределение:
сферические гармоники,
специальные функции**

**Временные вариации:
Фурье-разложение,
простые \sin/\cos ,
пошаговые функции**

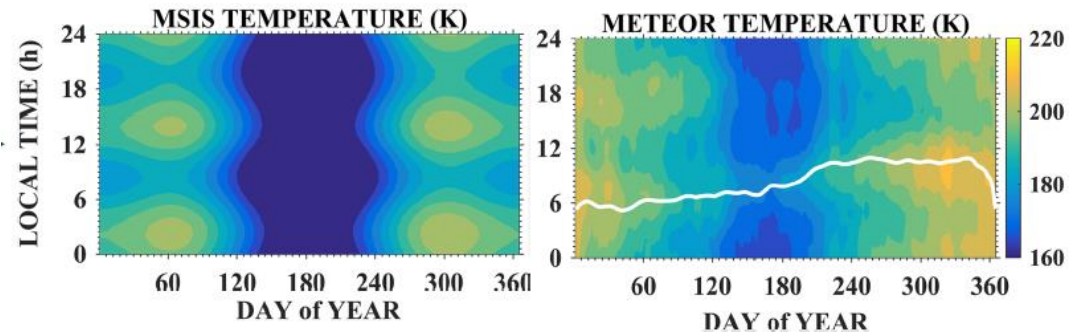
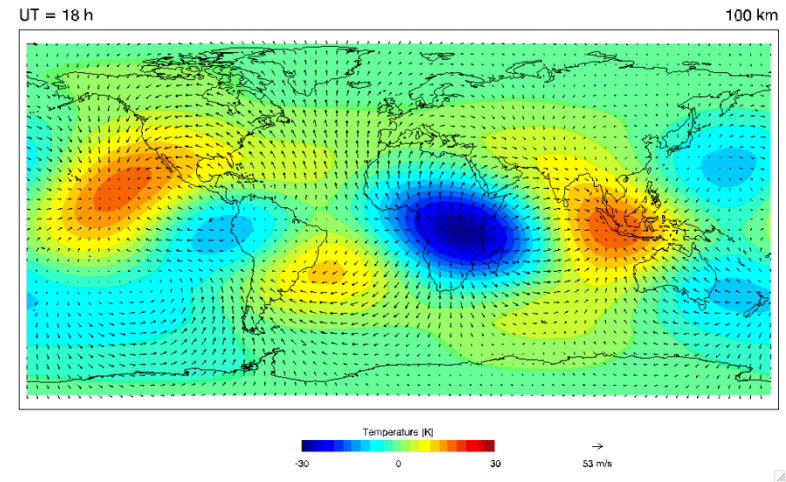
**Высотный профиль:
Эшштейновские функции**



Эмпирические модели, включающие термосферу

Density and Temperature Models

- Exospheric H Model [[info](#), [ftp](#)]
- NRLMSISE-00 Model [[info](#), [RUN](#) [ftp](#), [link](#)]
- MSISE-90 Model [[info](#), [ftp](#), [RUN](#)]
- MSIS-86 Model [[info](#), [ftp](#)]
- MET Model [[info](#), [ftp](#)]
- CIRA: Thermosphere [[info](#)]
- CIRA: 0 km to 120 km [[info](#), [ftp](#)]
- OLDER MODELS (pre-1985)



Wind Models

- Horizontal Wind Model (HWM) [[info](#), [ftp](#)]

Краткий обзор модели IRI

Модель IRI описывает климатическое поведение ионосферы и успешно используется на протяжении более 40 лет. Исследования показывают, что модель IRI в среднем дает хорошие результаты по воспроизведению ионосферных параметров в различных условиях.

CCIR – 1967

Jones and Gallet, 1962

Jones et al., 1969

Ионозонд 1954–1958

URSI – 1988

Fox and McNamara, 1988

Rush et al., 1989

IRTAM – 2012

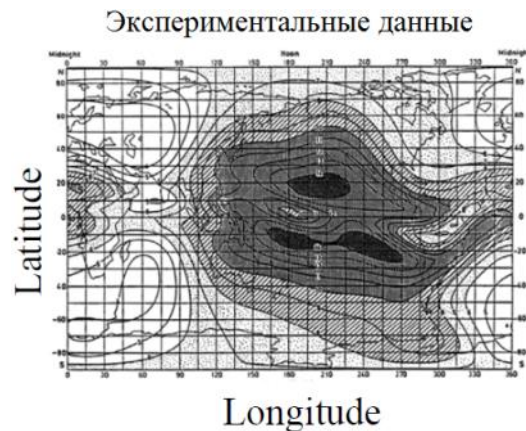
Galkin, Reinisch, Huang and

Bilitza, 2012

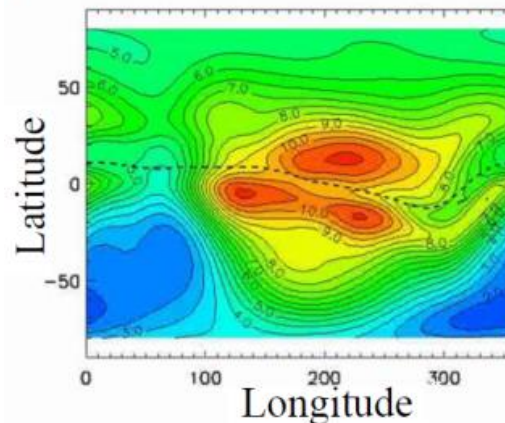
Модельные значения ионосферных параметров в южном полушарии и над океанами получают экстраполяцией вдоль линий постоянного магнитного диполя.

Около 45,000 массивов среднемесячных данных зондирования ионосферы. Теоретическая модель приводится в соответствие с значениями параметра f_oF2 , наблюдающимися на мировой сети станций.

45 цифровых ионозондов. Используется Non-linear Error Compensating Technique for Associative Restoration (NECTAR) для уточнения коэффициентов CCIR и сравнения модельных результатов с данными наблюдений, полученными в реальном времени на сети ионозондов Global Ionosphere Radio Observatory (GIRO)).



Результаты моделирования с опцией URSI

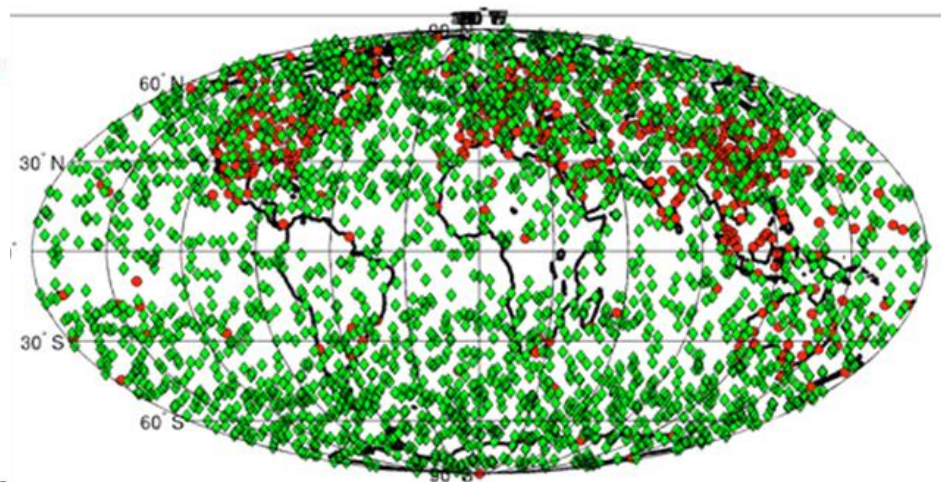
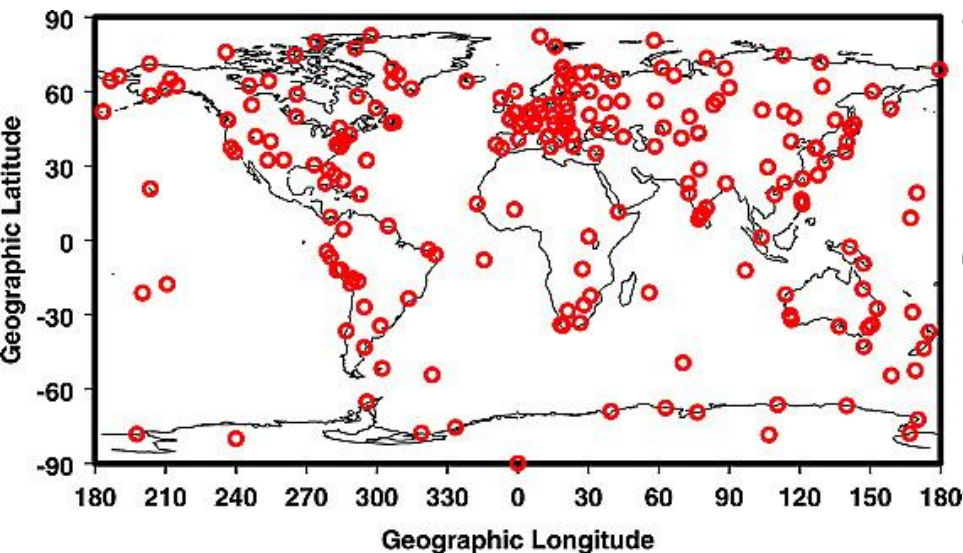


Преимущества спутниковых наблюдений

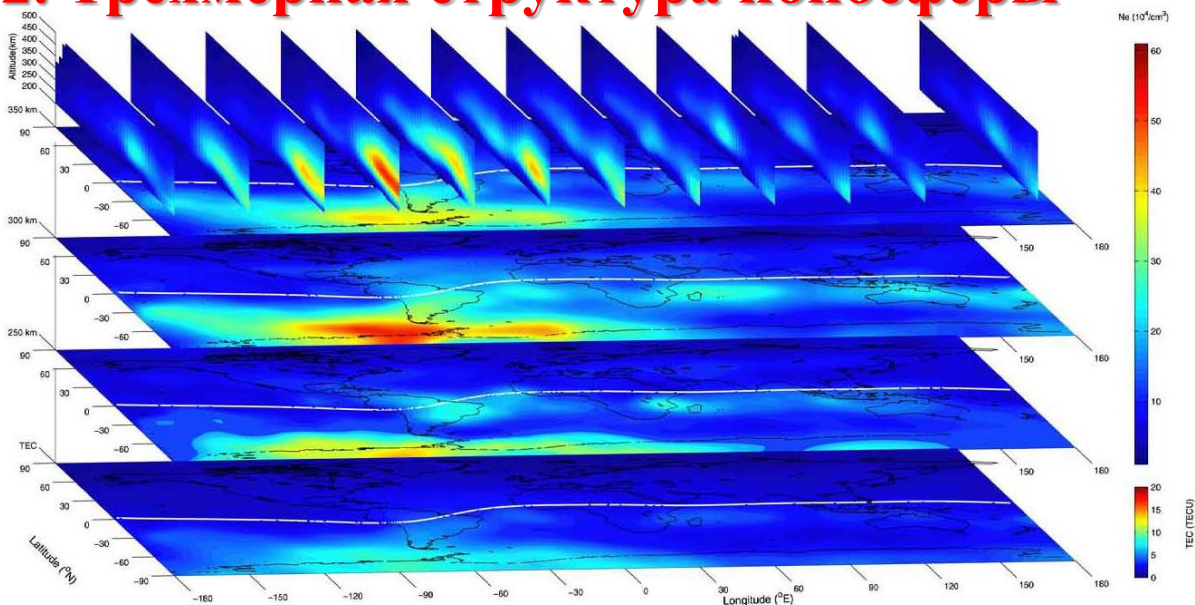
1. Глобальное покрытие

1 день измерений РЗ

Ионозонды



2. Трёхмерная структура ионосферы



Lin et al., 2009

Банк данных

5 500 000 COSMIC профилей (2006-2015)

200 000 GRACE профилей (2007-2015)

300 000 CHAMP профилей (2001-2008)

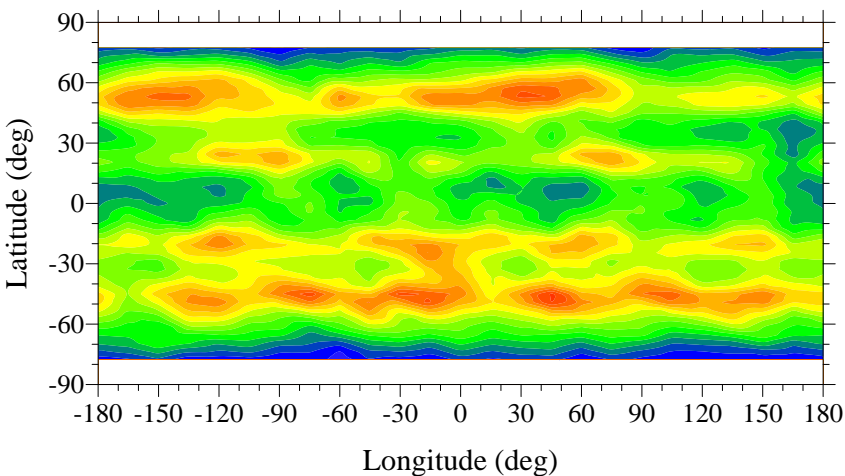
<http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/products.html> - массив данных

http://lasp.colorado.edu/lisird/tss/noaa_radio_flux.html - значения F10.7

Количество данных COSMIC, CHAMP, GRACE

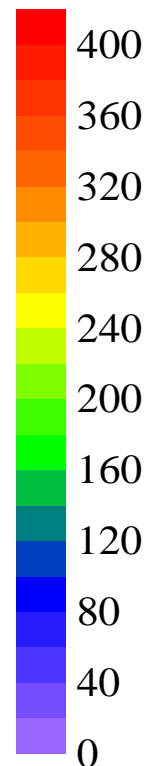
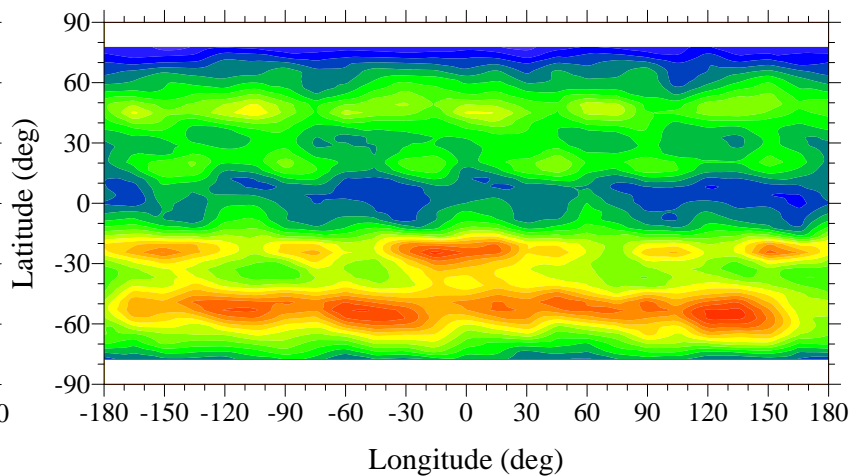
Июнь, 12:00 LT

Measurements count



Декабрь, 24:00 LT

Measurements count



Для модели MIT

200 000 N(h)-профилей Интеркосмос-19

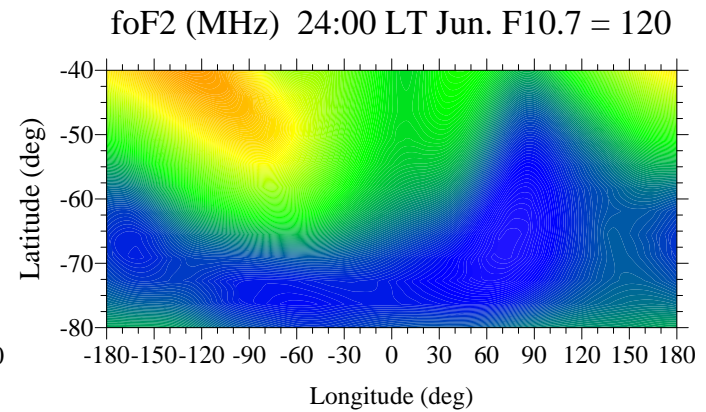
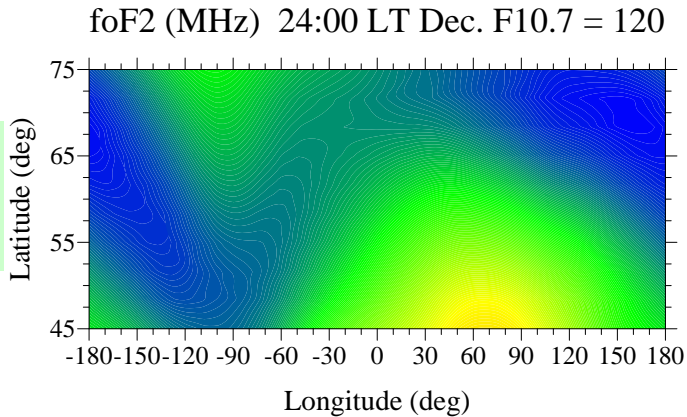
in-situ Ne на спутнике CHAMP <http://www.izmiran.ru/ionosphere/sm-mit/>

Сравнение для F10.7=120

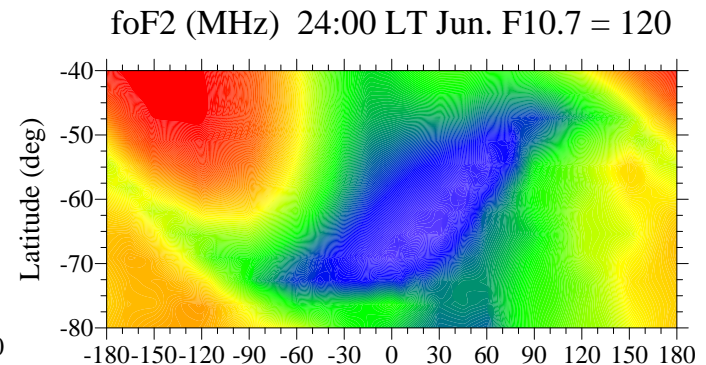
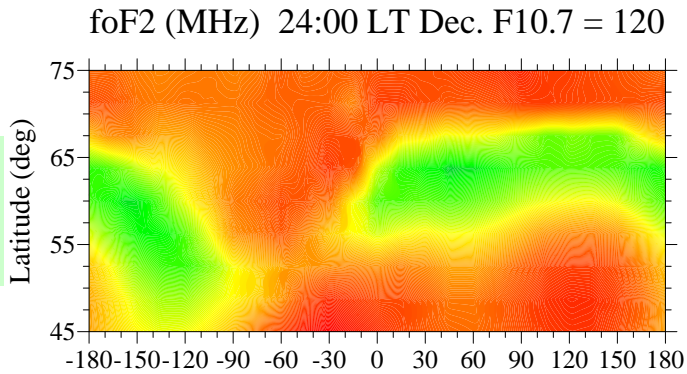
Northern Hemisphere

Southern Hemisphere

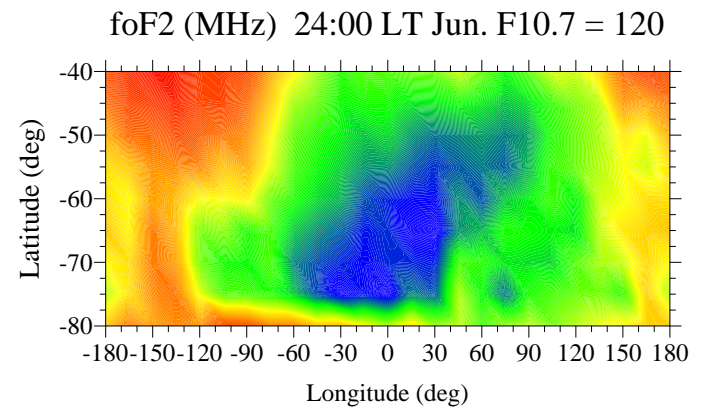
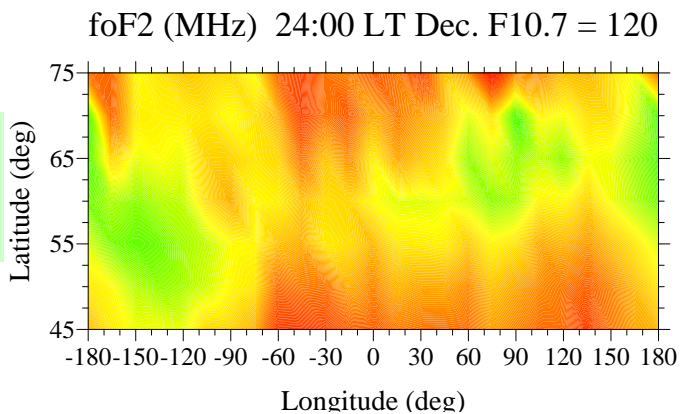
IRI
model



MIT
model



RO
data



3.5

3

2.5

2

1.5

1

Цели и ограничения эмпирических моделей

- Модели используются главным образом для спецификации и прогностических целей.
- Часто используются как входные данные для численных моделей связанных областей.
- Эмпирические модели описывают некое среднее (климатическое) состояние.
- Модели реалистичны в пространственно – временных областях, достаточно охваченных наблюдениями.
- Легки в использовании.
- Мало применимы для гелиогеофизических событий

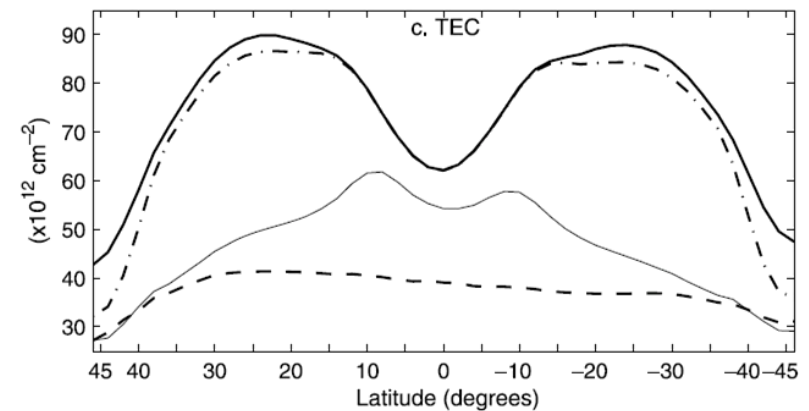
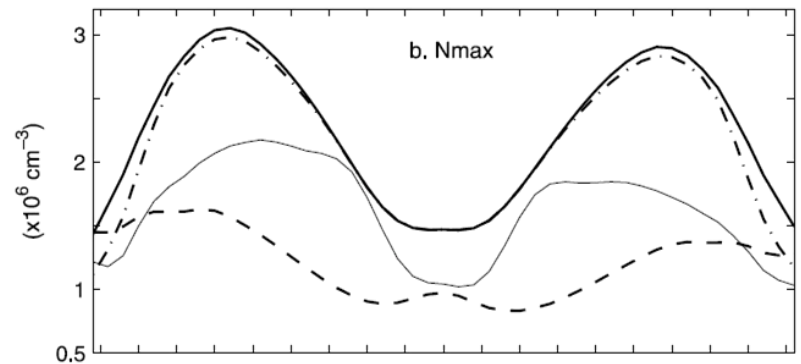
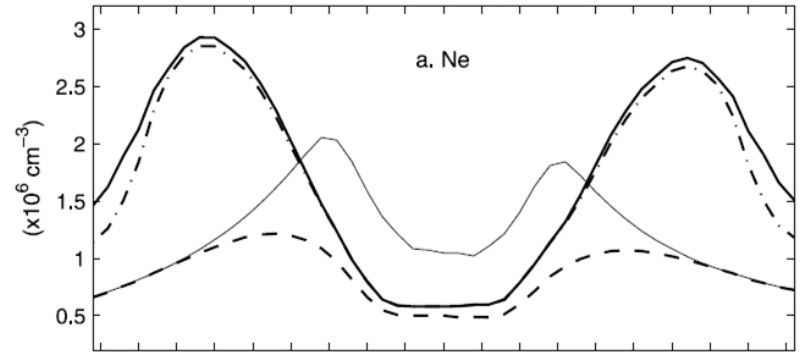
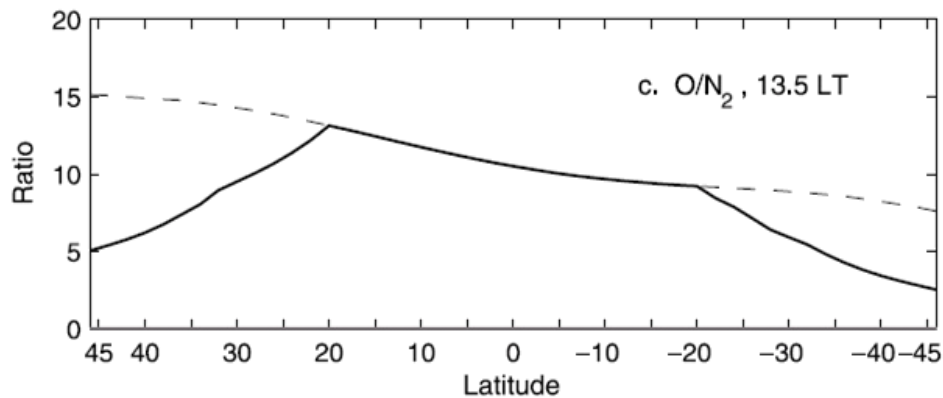
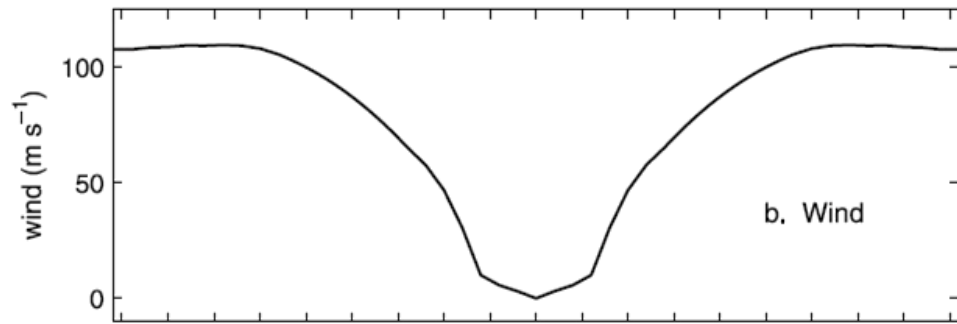
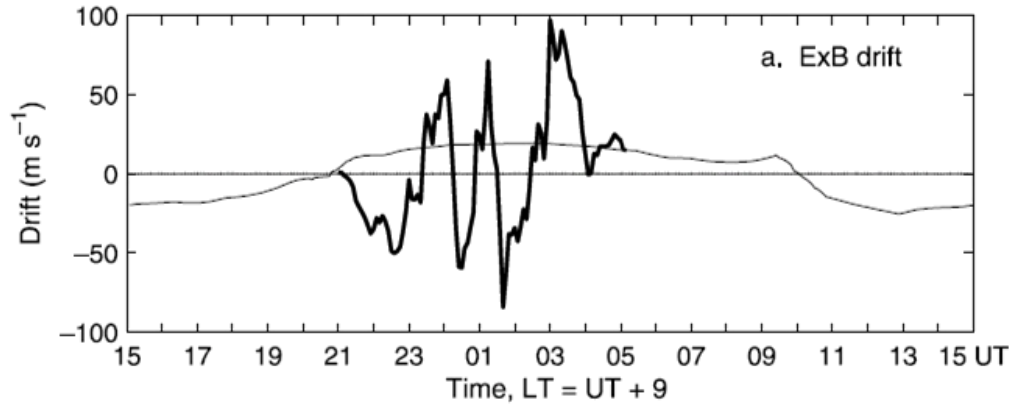
- **Ионосферные Physics-Based (stand-alone)**
модели Тащилина, Павлова, Голикова и Колесника, Мингалева
(USU-TDIM, IPM, IFM, FLIP, SUPIM)
все эти модели используют диффузионное приближение
- **Самосогласованные модели системы термосфера-ионосфера Coupled Physics-Based**
UAM, GCM ТИП, EAGLE
(TIE-GCM, TIME-GCM, CTIM, CTIP, CMIT, GAIA, WAM)
во всех этих моделях термосфера по вертикали в гидростатическом, а ионосфера в диффузионном приближении

Physics-Based Models

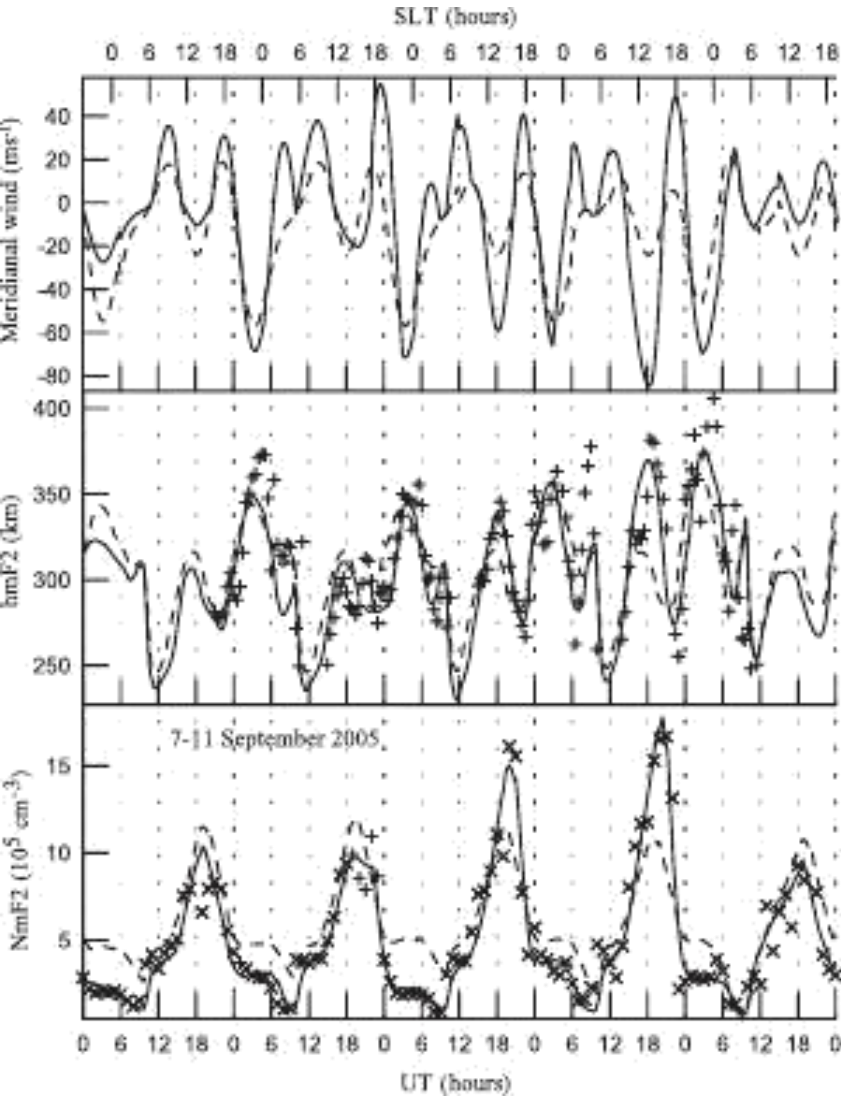
(stand-alone ionosphere)

- Модели численно решают 3-D динамические уравнения непрерывности, движения и сохранения энергии для электронов и ионов (NO^+ , O_2^+ , N_2^+ , N^+ , O^+ , He^+ , H^+).
- Все важные химические реакции и процессы переноса учитываются (ионизация, перезарядка и рекомбинация, амбиполярная и тепловая диффузия, $i-i$, $i-n$ и $e-n$ соударения, и т.д.).
- Такие модели в основном используются для научных исследований.
- Требуются:
 - Магнитосферные входные параметры - (магнитосферная конвекция и высыпания авроральных частиц)
 - Атмосферные входные параметры - (нейтральная плотность, температура и ветер)
 - Динамо поле и буревое электрическое поле на низких широтах
 - Геомагнитное поле (фиксированное, без временных вариаций)**Обычно все это задается из соответствующих эмпирических моделей.**

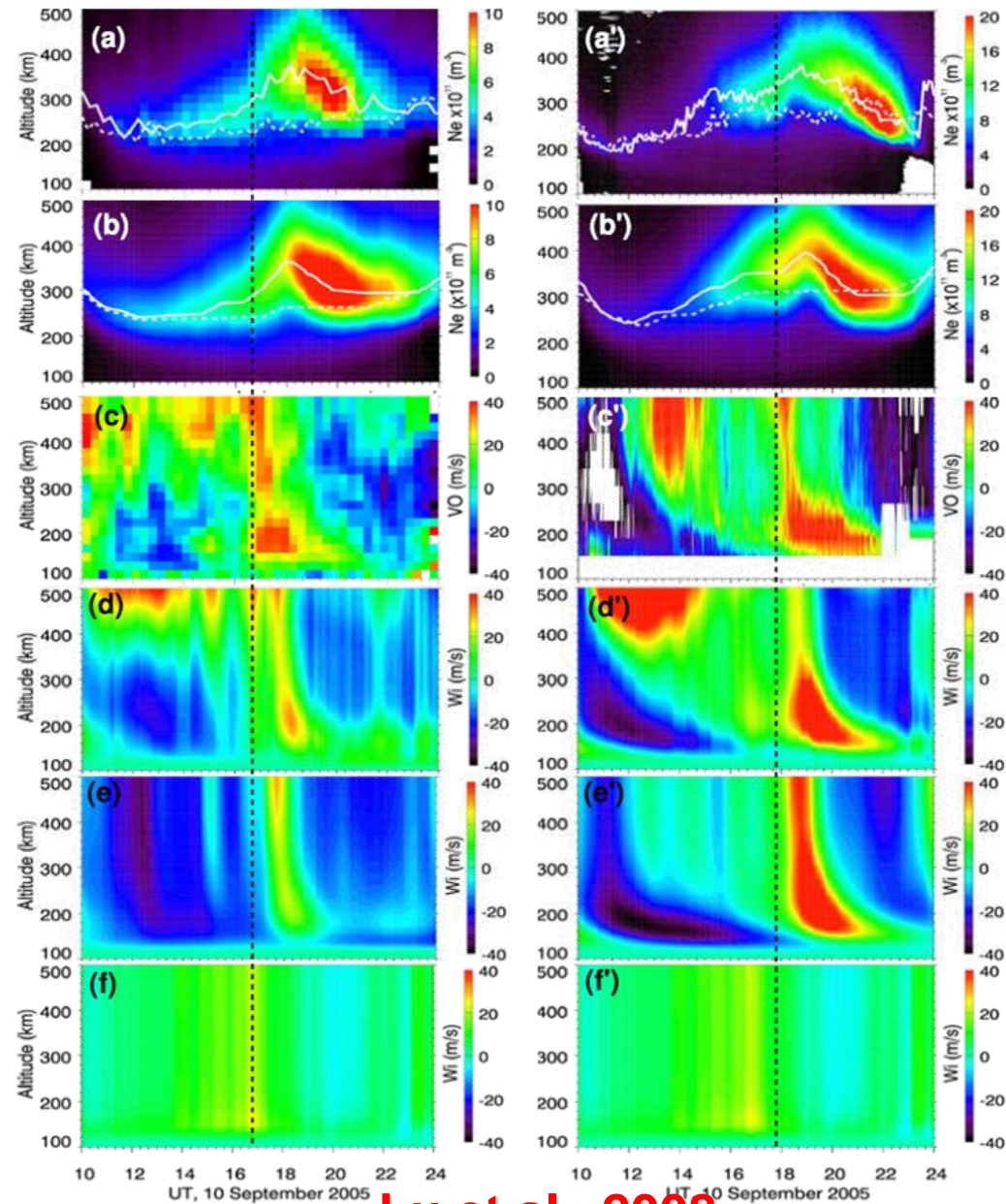
Пример учета эффектов геомагнитной бури



Ветер и положительная фаза ионосферной бури



Pavlov and Pavlova, 2011



Lu et al., 2008

Создатели модели ГСМ ТИШ (трое слева)



+ И.В. Карпов, Ф.С. Бессараб, В.А. Суроткин

Краткое описание модели ГСМ ТИП

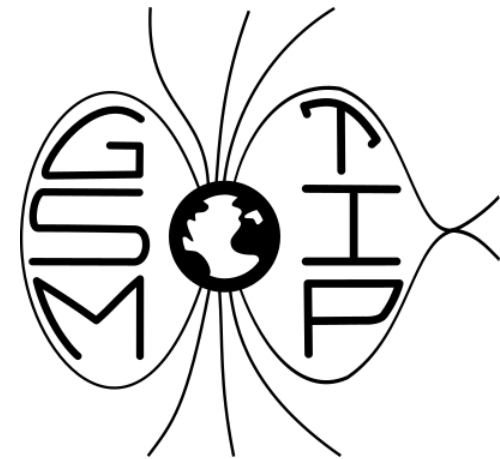
Термосферные параметры:
 T_n , O_2 , N_2 , O , NO , $N(^4S)$, $N(^2D)$
плотности; вектора скоростей;
(от 80 км до 526 км)

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

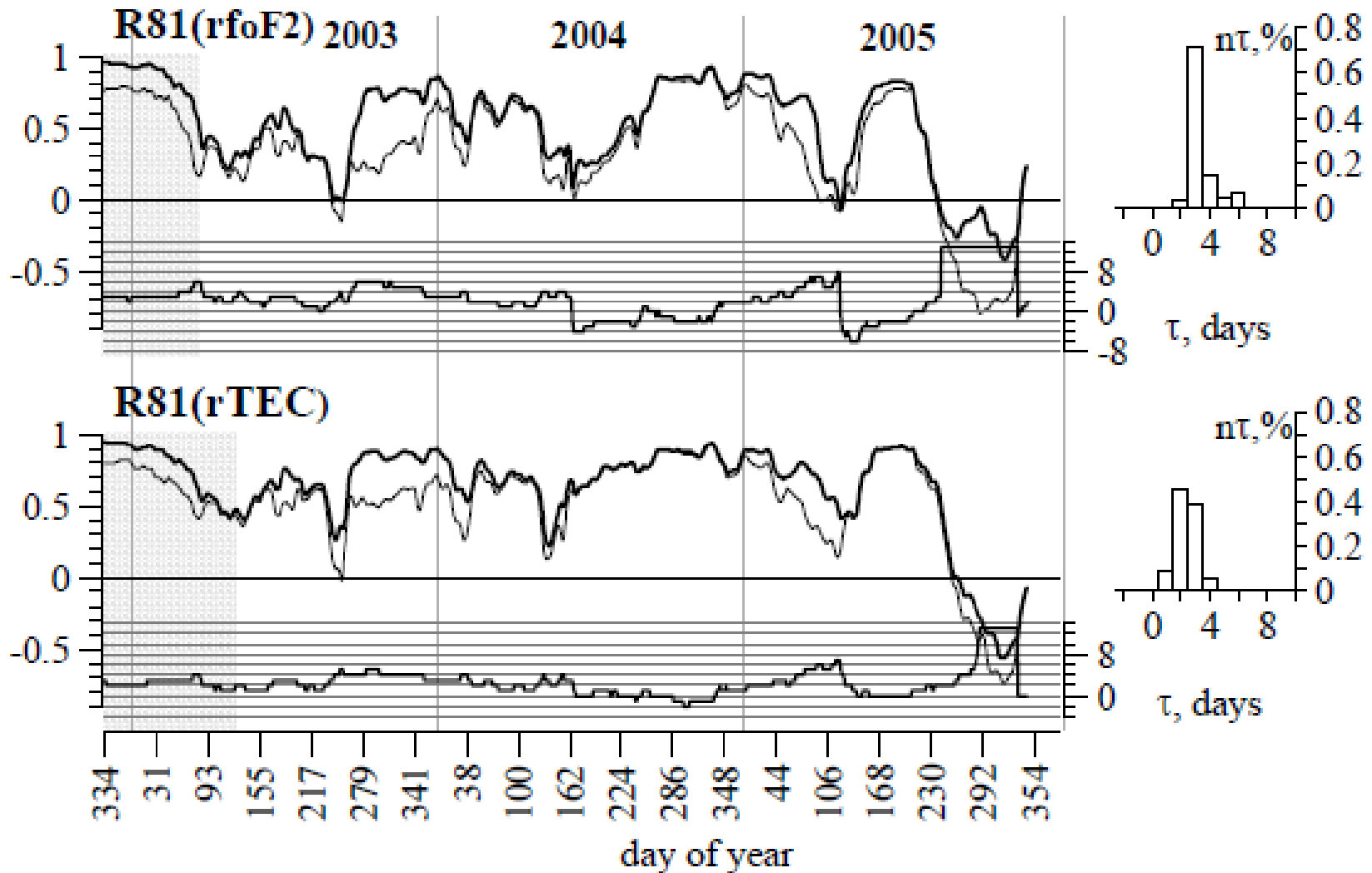
Клименко и др., 2006, 2007.



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

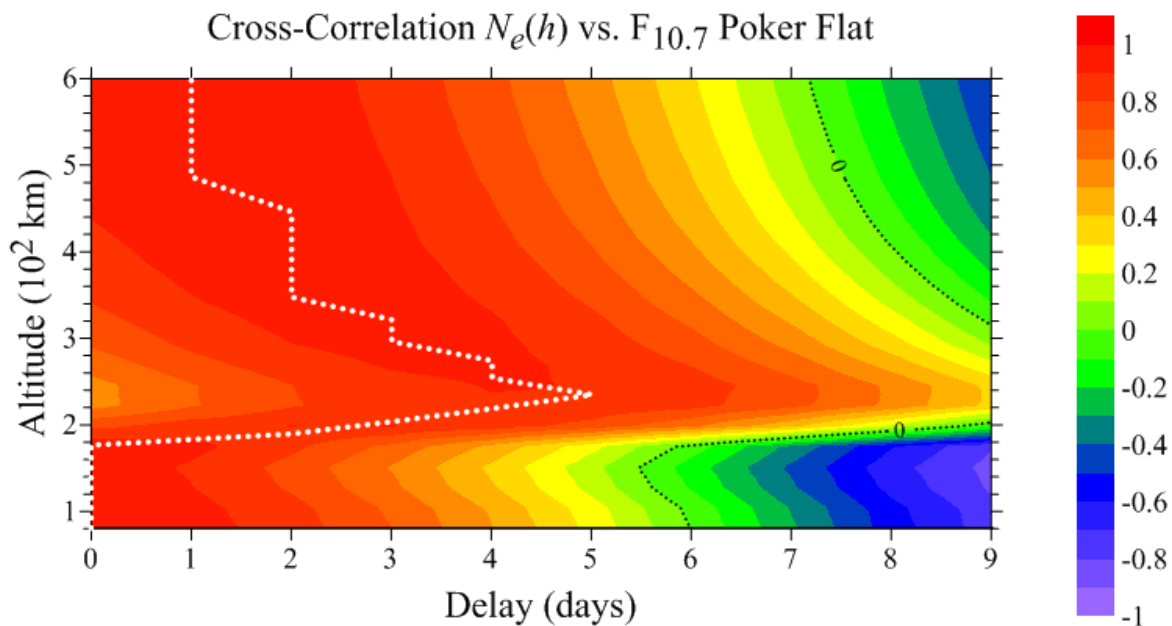
Намгаладзе и др., 1988;
Кореньков и др., 1998.

Oinats et al., JASR 2008: foF2 delay of 2-4 days, TEC delay of 1-2 days

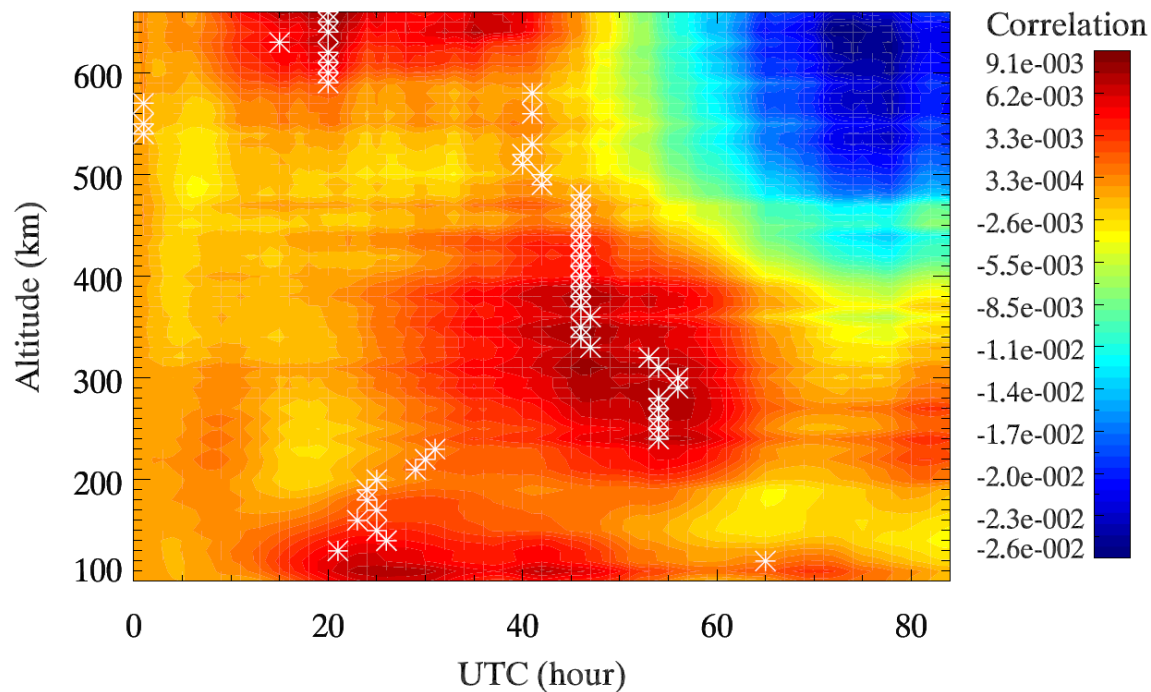


Correlation coefficients based on 81 days sample length between relative quasi-27-days variations rfoF2 (or rTEC) and rF10.7 and corresponding time delays.

Вертикальная структура задержки N_e относительно $F_{10.7}$

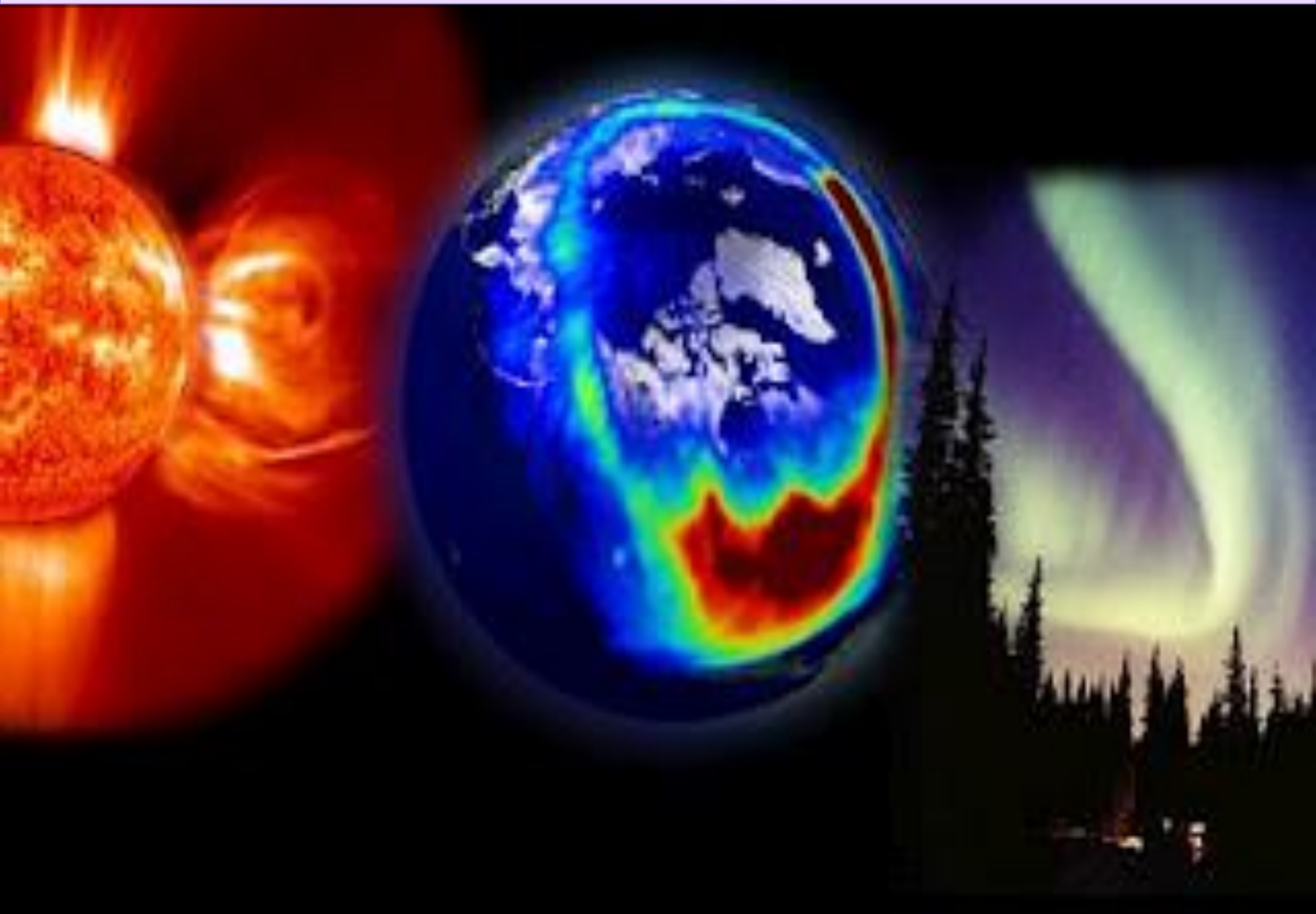


ГСМ ТИП



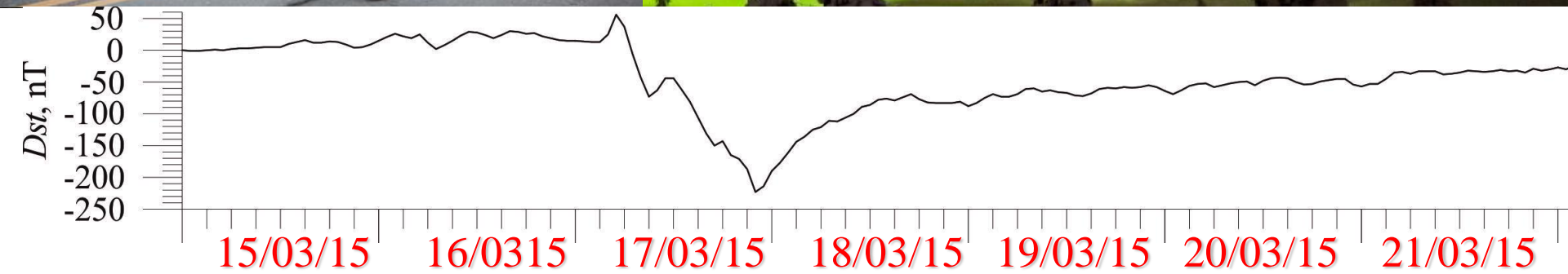
Poker Flat ISR

Солнечно-магнитосферное влияние



St. Patrick's Day Storm of 2015

Image by Ronn and Marketa Murray

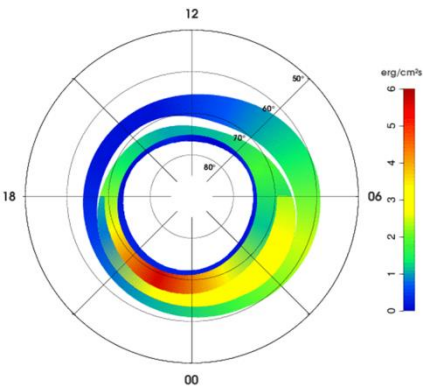


JGR special issue in 2017

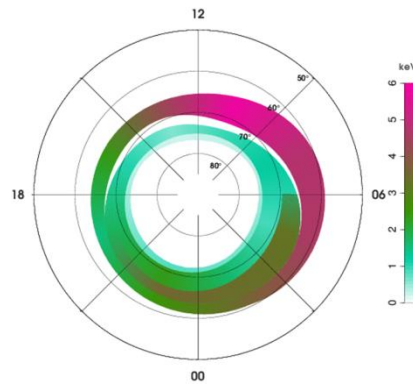
Входные параметры GSM ТИП

Energy and energy flux of auroral electrons

Energy Flux (erg/cm²)



Energy (keV)



Empirical model

Vorobyov and Yagodkina (2005, 2008)
or Zhang and Paxton (2008)

Latitudinal displacement of R2 FAC

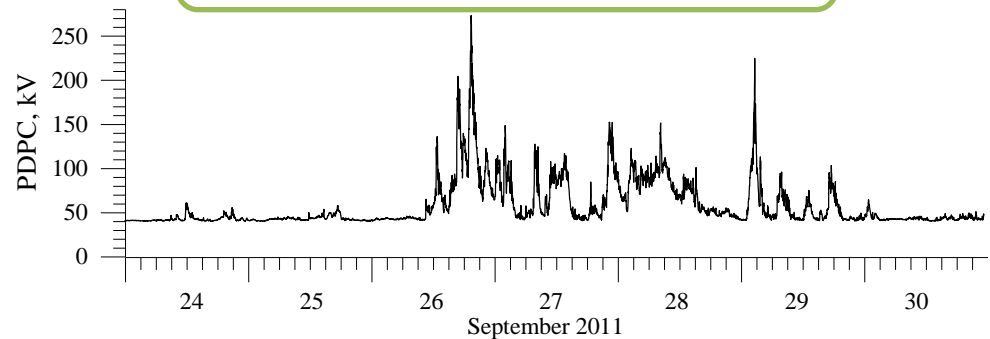
Sojka, J.J., R.W. Schunk, and W.F. Denig (1994)

- | | |
|---|---|
| ±65° для $\Delta\Phi \leq 40$ кВ; | ±60° для $40 \text{ кВ} < \Delta\Phi \leq 50$ кВ; |
| ±55° для $50 \text{ кВ} < \Delta\Phi \leq 88.5$ кВ; | ±50° для $88.5 \text{ кВ} < \Delta\Phi \leq 127$ кВ; |
| ±45° для $127 \text{ кВ} < \Delta\Phi \leq 165.4$ кВ; | ±40° для $165.4 \text{ кВ} < \Delta\Phi \leq 200$ кВ; |
| ±35° для $200 \text{ кВ} < \Delta\Phi$ | |

Cross-polar cap potential

$$\Delta\Phi \text{ (кВ)} = 38 + 0.089 \times AE$$

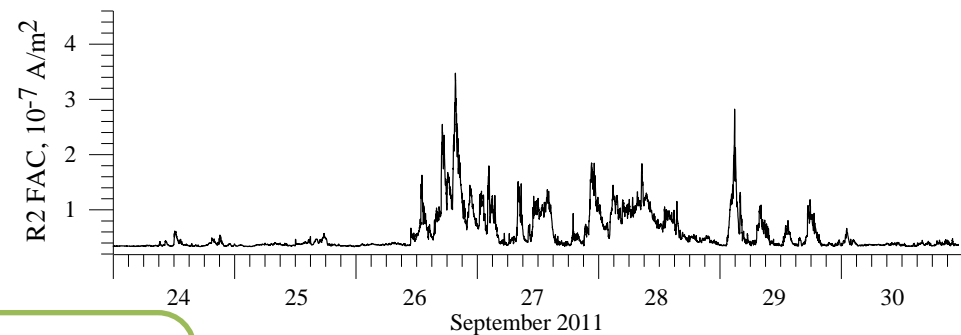
Feschenko, Maltsev (2003)



Region 2 field-aligned currents (R2 FAC)

$$j_2 \text{ (A/m}^2\text{)} = 3 \times 10^{-8} + 1.2 \times 10^{-10} \times AE$$

Cheng et al. (2008), Snekvik et al. (2007)

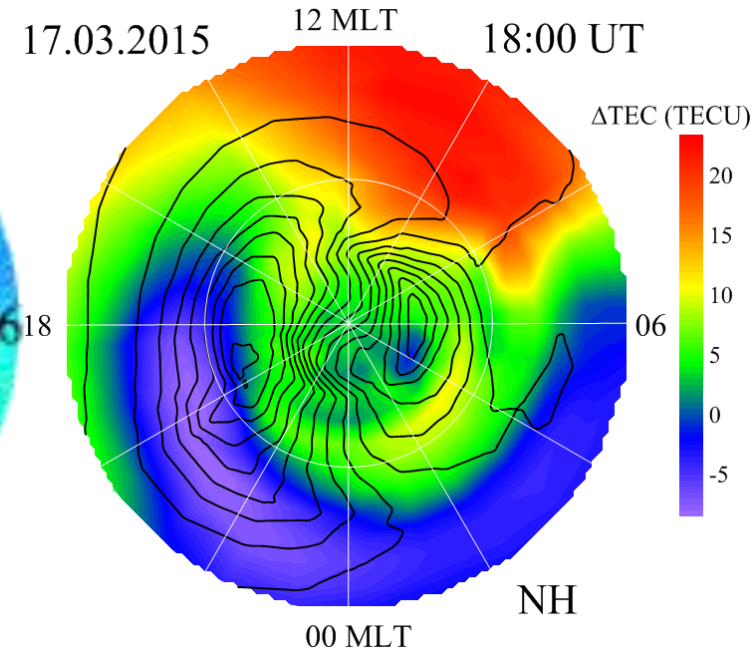
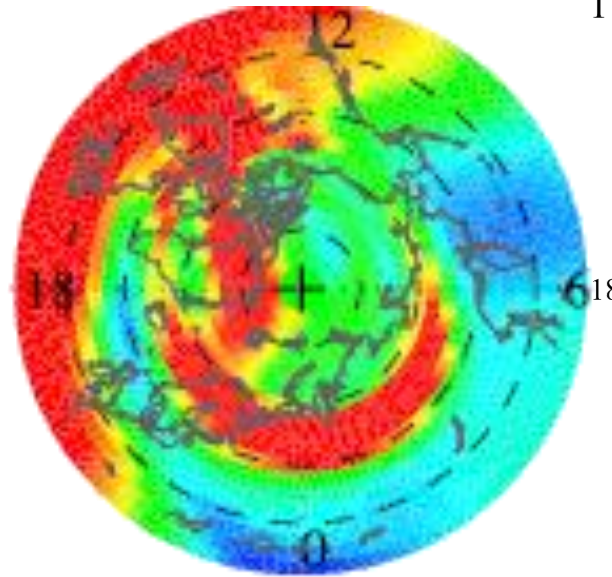
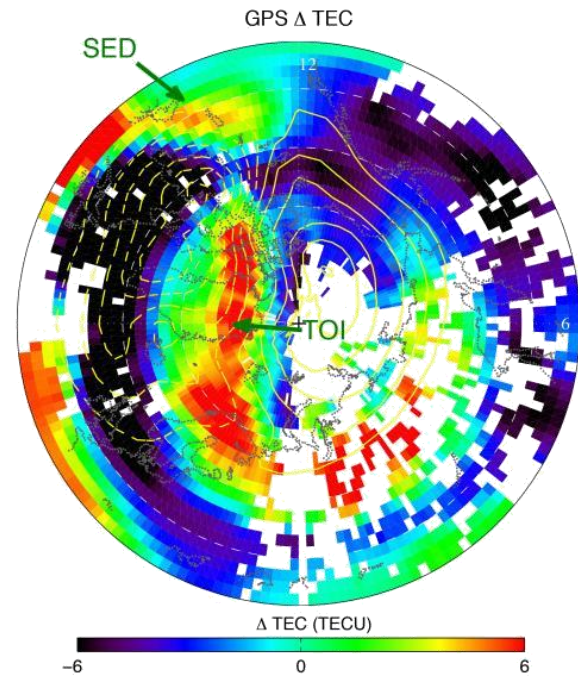


Язык ионизации во время геомагнитной бури

GPS Δ TEC

TIE GCM Δ TEC

GSM TIP Δ TEC



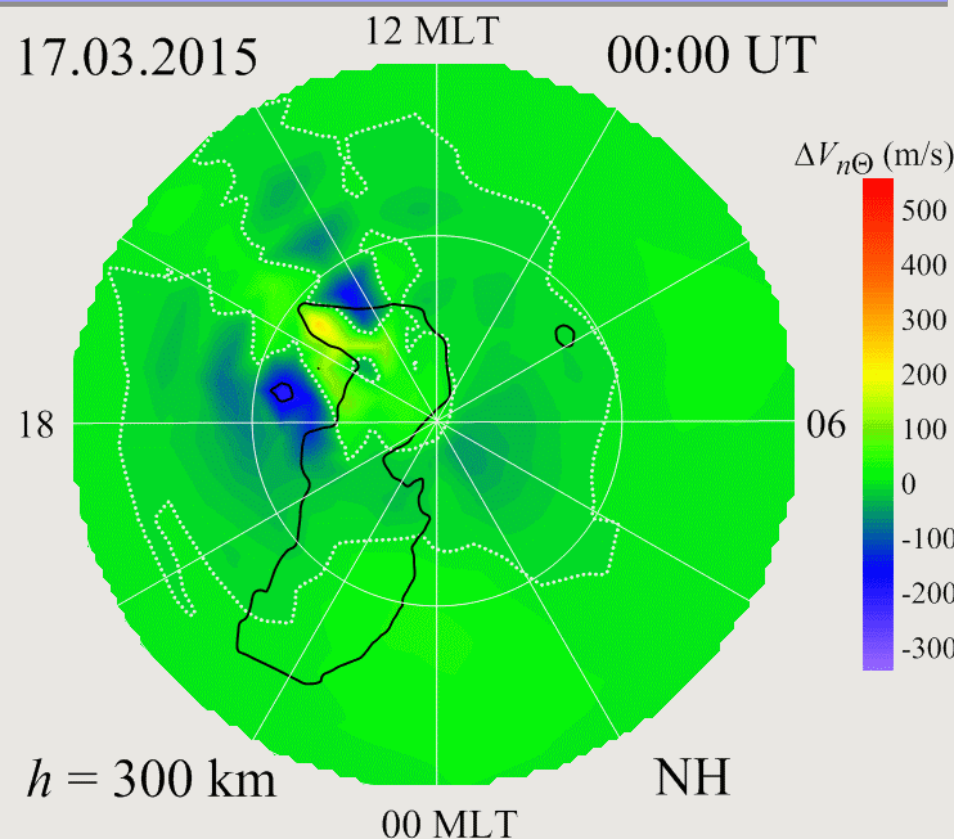
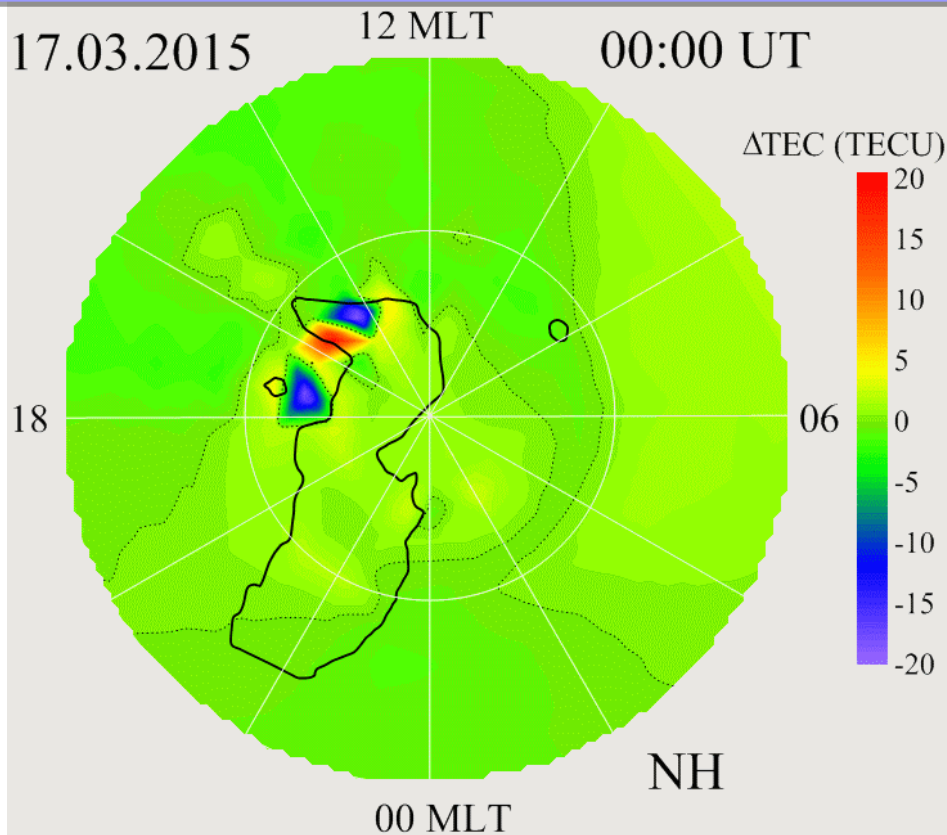
Liu et al., 2016 JGR

Klimenko et al., 2019 SW

Модельные возмущения TЕС и Vntet

$\Delta TЕС$

$\Delta V_{n\Theta}$



latitudinal circles from 30 deg North to pole

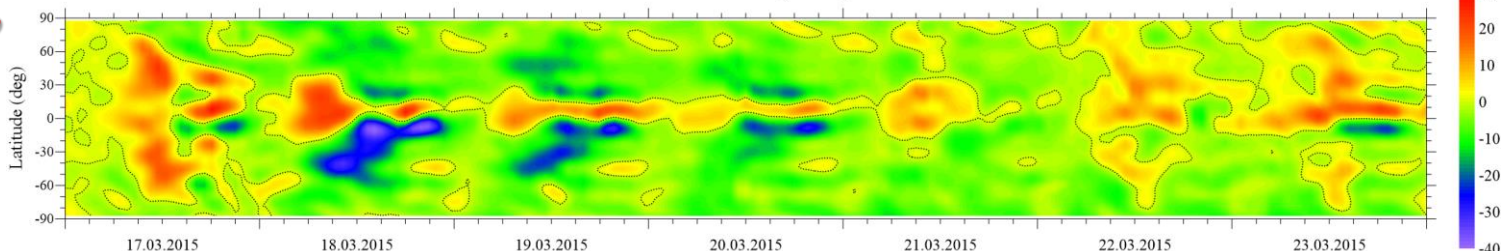
Disturbances in ExB horizontal plasma drift is presented by isolines

Буревой и послебуревой ионосферный отклик

Klimenko et al., 2015, 2017 Geomagnetism and Aeronomy, ANGEО

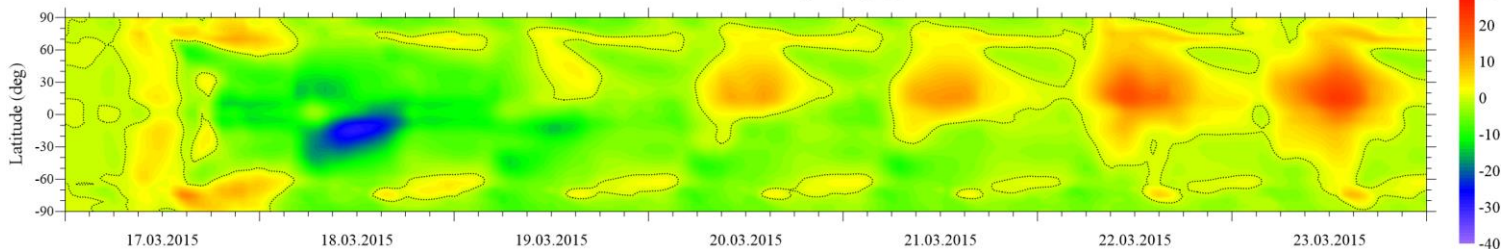
**Klimenko et al.,
2018 JASTP
GPS Δ TEC**

GPS TEC Disturbances (TECU) $\lambda = 30^\circ$



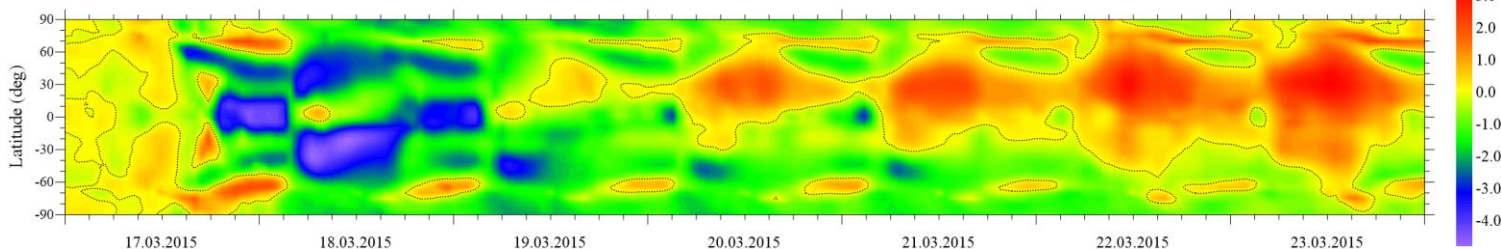
model Δ TEC

GSM TIP TEC Disturbances (TECU) $\lambda = 30^\circ$



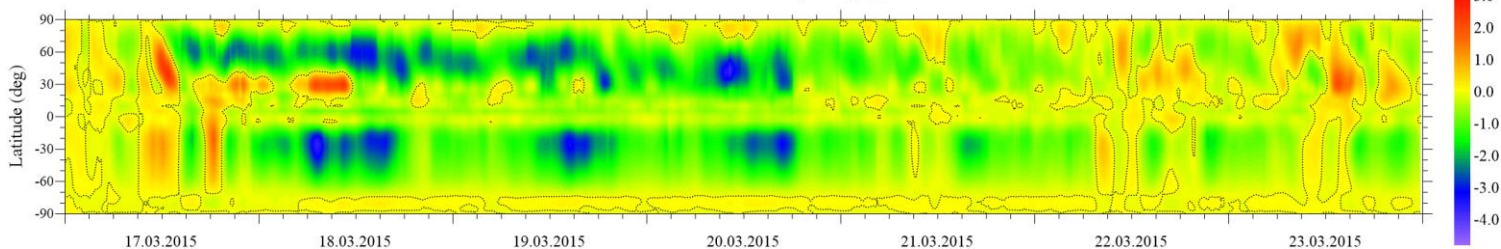
model Δ foF2

GSM TIP foF2 Disturbances (MHz) $\lambda = 30^\circ$

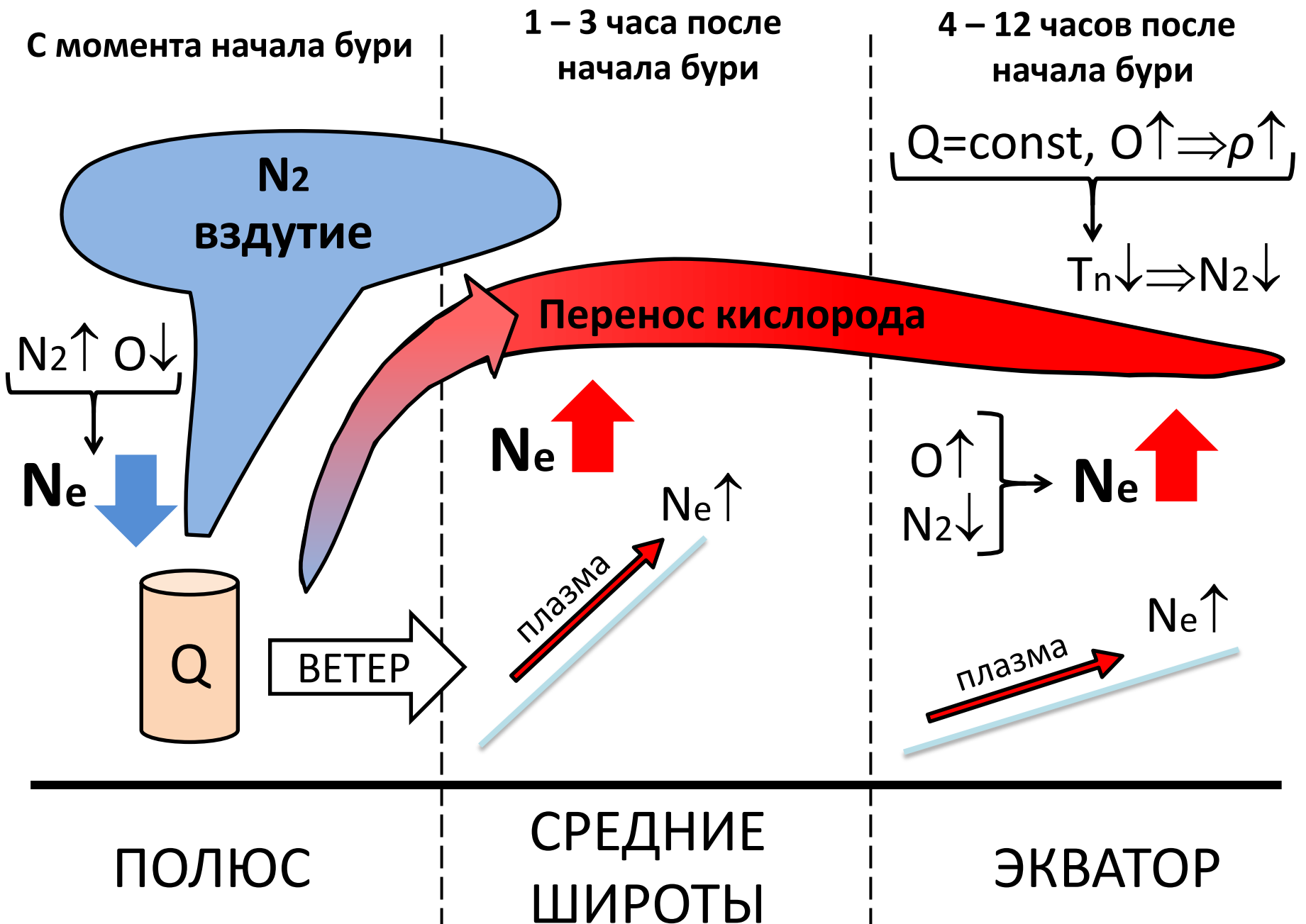


irtam Δ foF2

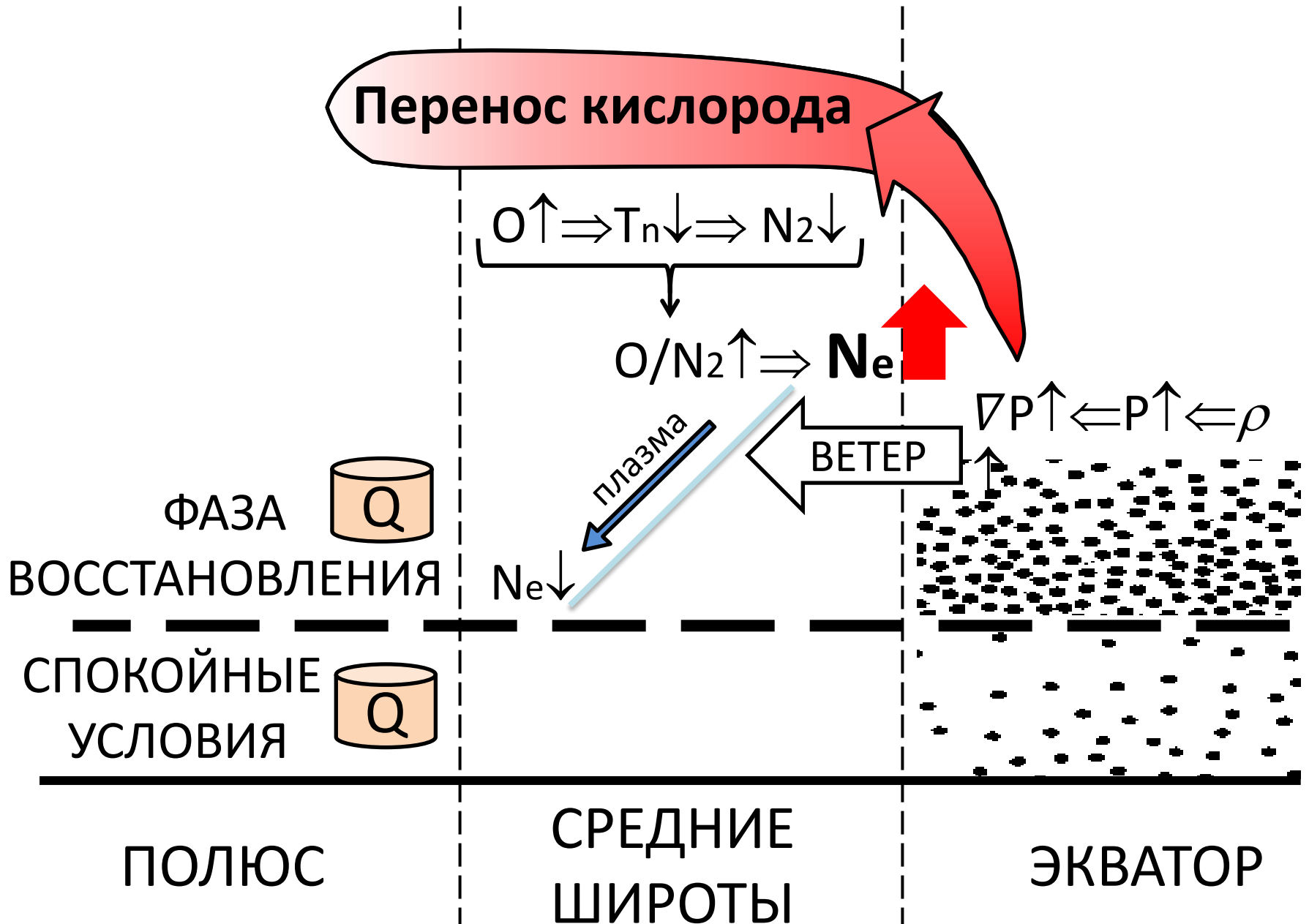
IRTAM foF2 Disturbances (MHz) $\lambda = 30^\circ$



А) Главная фаза геомагнитной бури



Б) Эффекты последствия бури



Последствие стратосферных потеплений

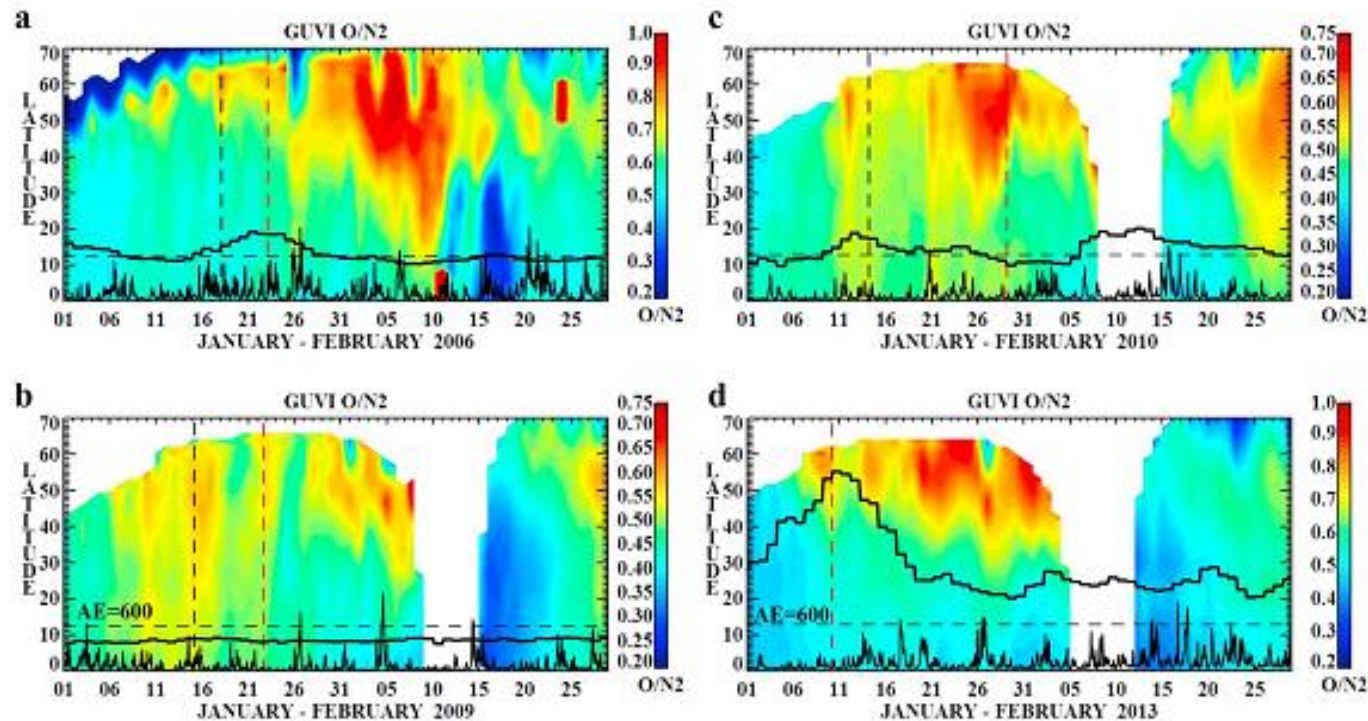


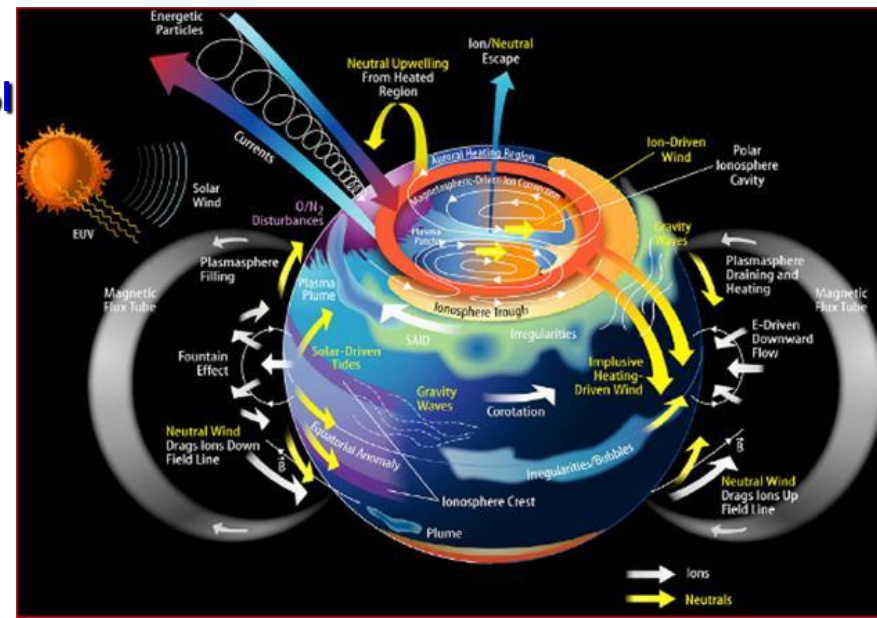
Figure 5. Latitude versus day distributions of daytime GUVI O/N₂ ratio at 88°E longitude during major warmings. Vertical dashed lines denote onsets (black) and peaks (red) of the warmings. Variations in AE and F_{10.7} indexes are presented in the same way as for Figure 4.

Yasyukevich, A. S. (2018). Variations in ionospheric peak electron density during sudden stratospheric warmings in the Arctic region. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 123. <https://doi.org/10.1002/2017JA024739>

Единая модель атмосферы как инструмент исследования

- Стратосферное потепление
- Влияние геомагнитных возмущений на озоновый слой
- Роль атмосферных приливов в электродинамике ионосферы
- Метеоконтроль ионосферы
- Глобальная электрическая цепь
- Акустико-гравитационные волны
- Мезосферная динамика

- Процессы в верхней атмосфере



Результаты модельных расчетов (ВСП 2009)

Whole Atmospheric Model (WAM) (0 – 600 km)

+ CTIP model

Fuller-Rowell et al., 2011, 2010

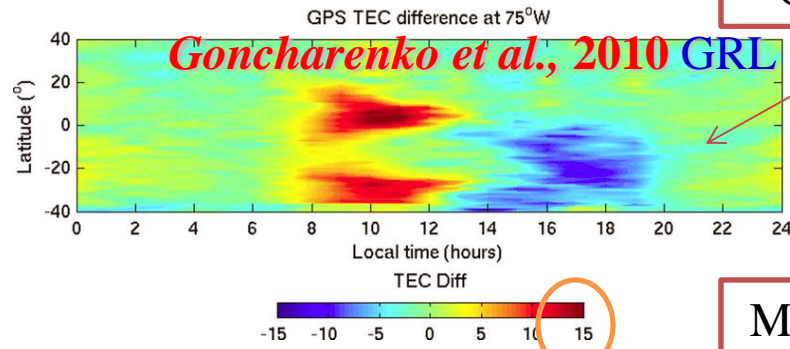
Thermosphere Ionosphere Mesosphere Electrodynamics General Circulation Model (TIMEGCM) (30 – 600 km)

Liu et al., 2002, 2005, 2010; Yamashita et al., 2010

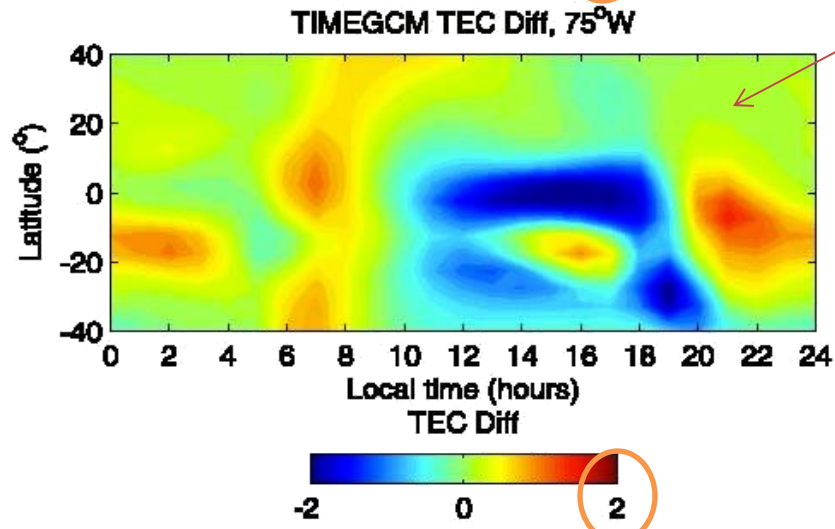
Global Atmosphere, Ionosphere, Aeronomy Model (GAIA)

(0 – 3000 km)
Jin et al., 2012; Liu et al., 2012

Observed data

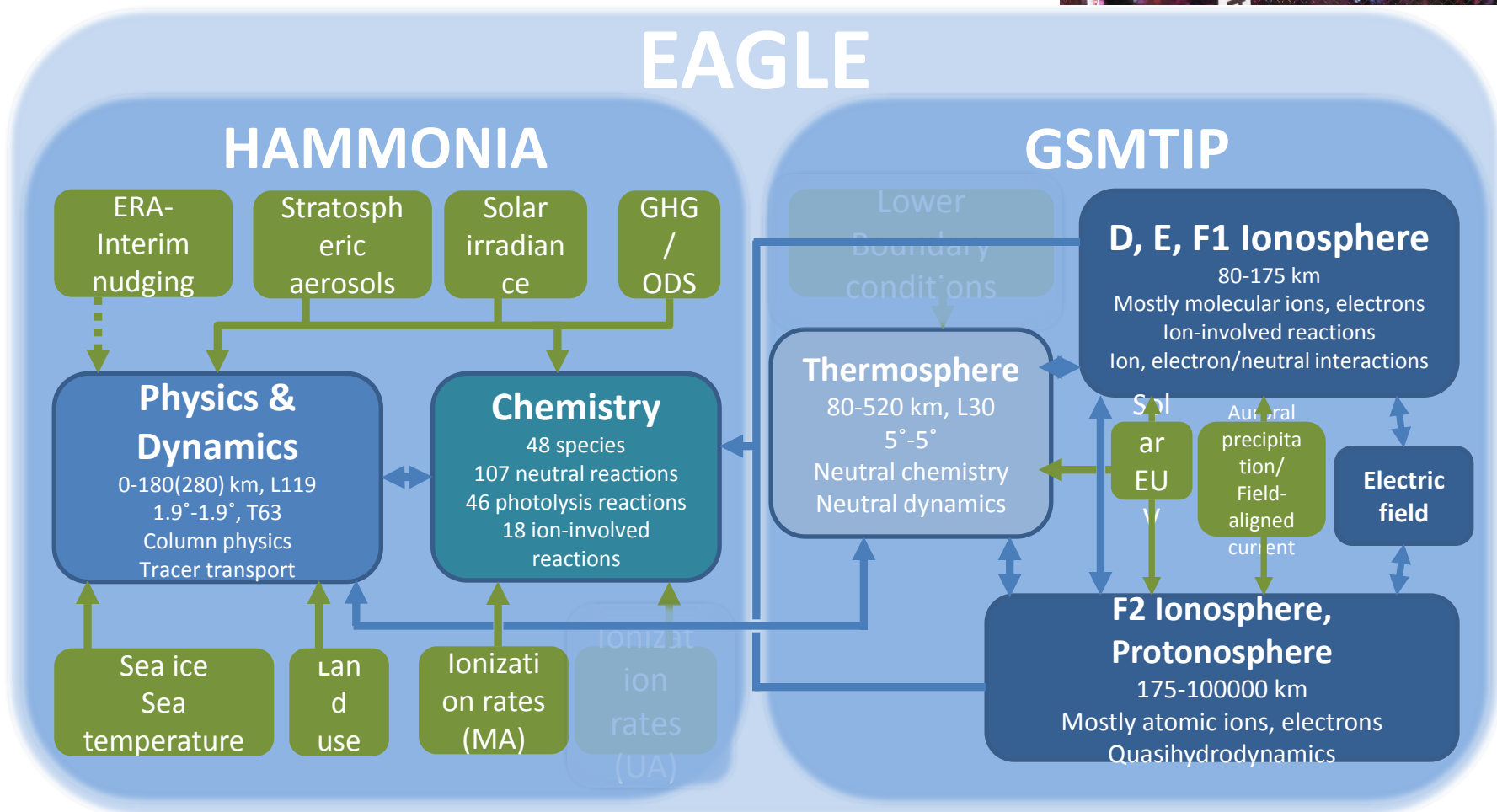


Model simulations



Chau et al., 2010 JGR

Новая модель всей атмосферы



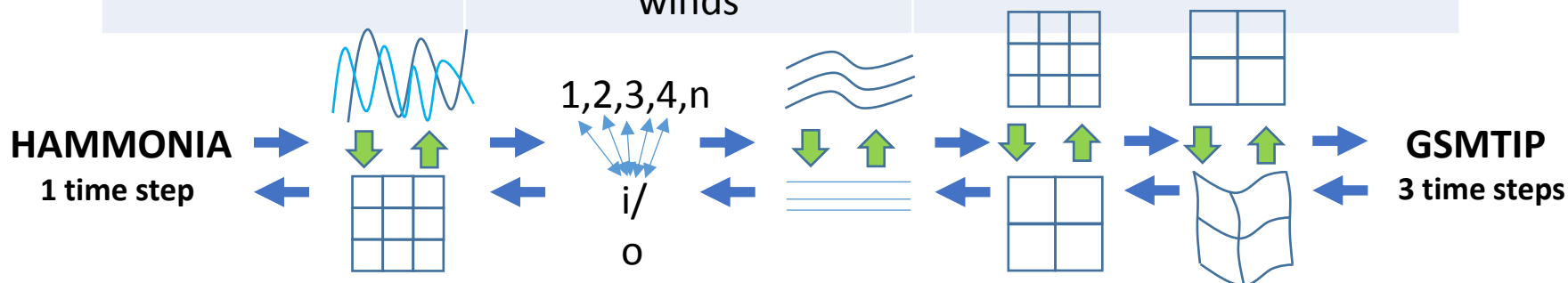
Клименко и др., 2017, 2018; Васильев и др., 2019

HAMMONIA + GSMTIP = EAGLE (Entire Atmosphere Global Model)

Parameter	CCM HAMMONIA	GSM TIP
Vertical coordinates	σ -levels	Heights
Horizontal space	Spectral	Grid point
Horizontal resolution	1.9°-1.9°	5°-5°
Horizontal grid	Geographic	Geomagnetic
Dynamical timestep	3 min	1 min
Parallelized	Yes	No
Vertical domain	0-200 km	80-500 km
Shared data	Temperature, densities, winds	Ion drag, Joule heating, NO?

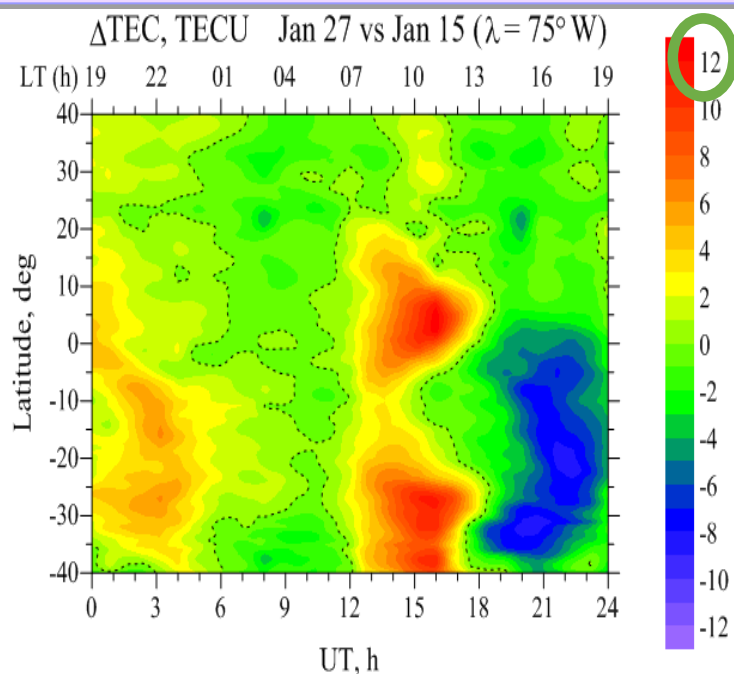
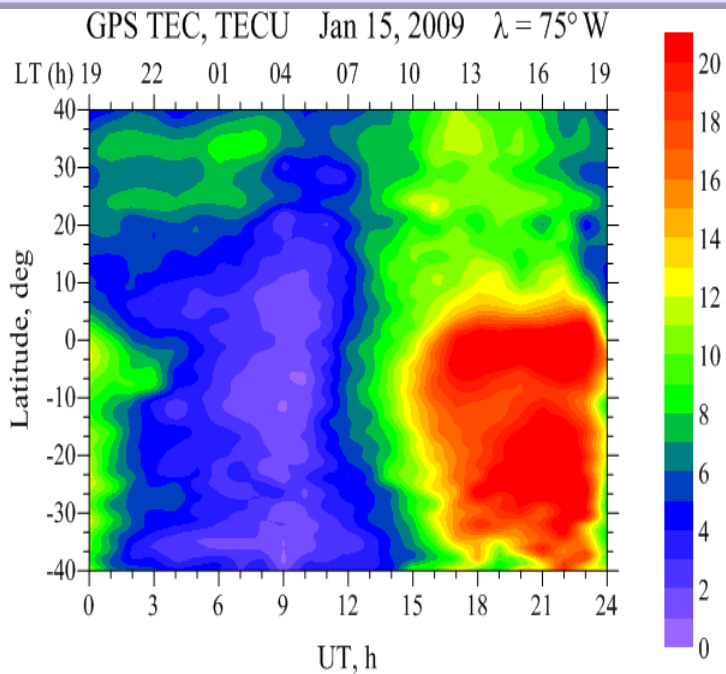
?

??

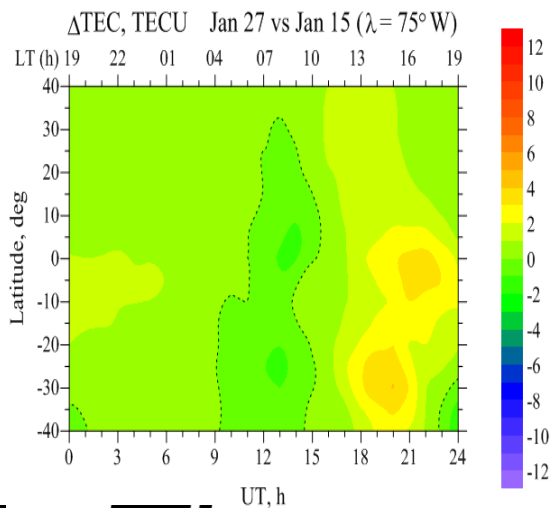


1 модельный месяц = 3-5 дня на 64 процессорах с часовым выводом и 3-х минутной передачей

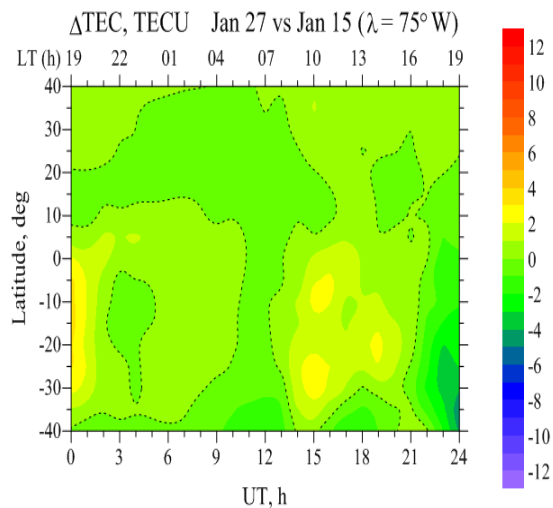
TEC во время ВСП 2009



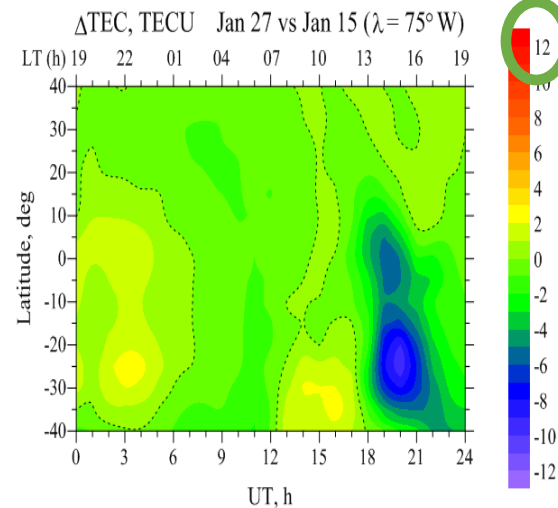
80 km



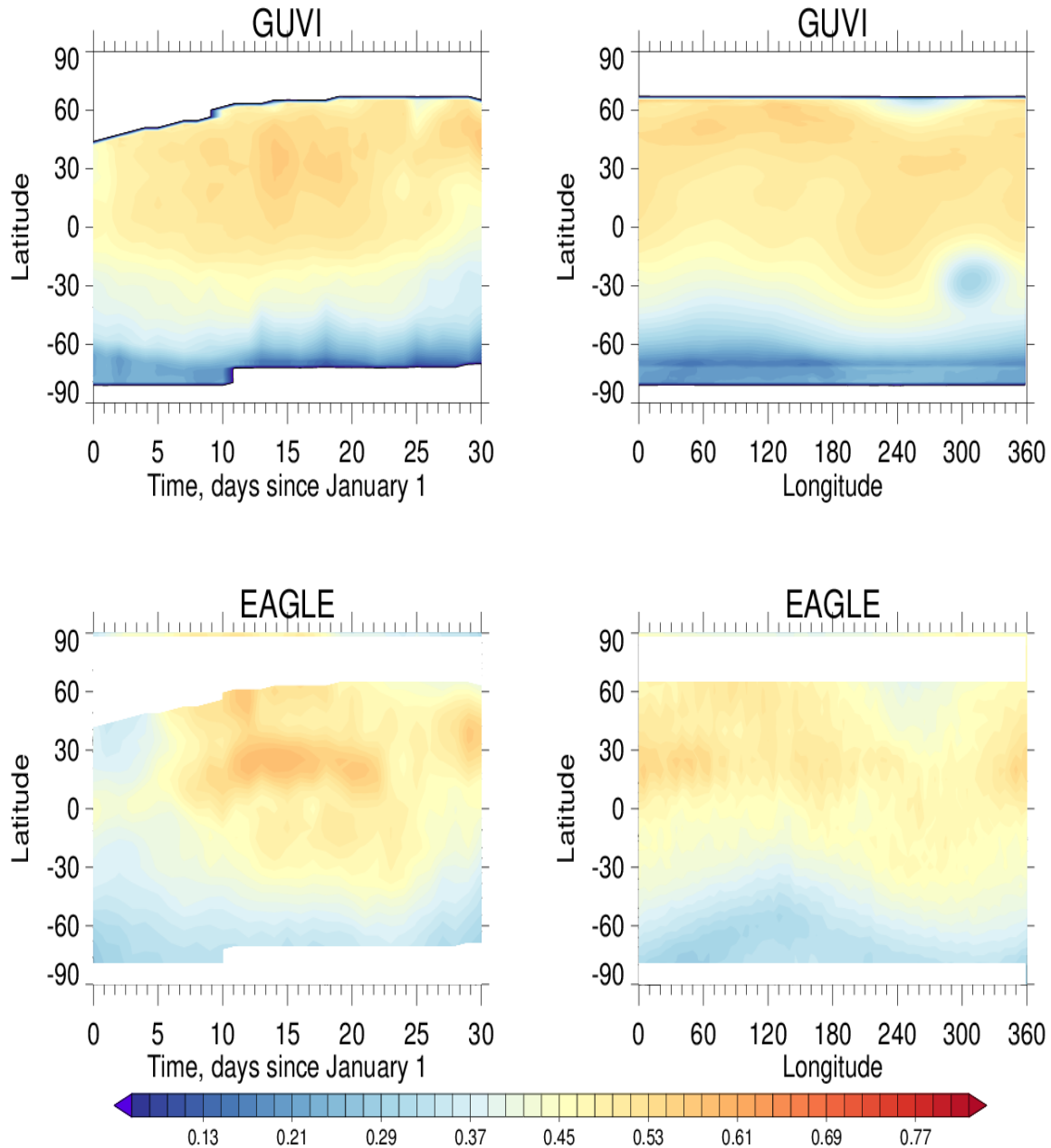
100



120



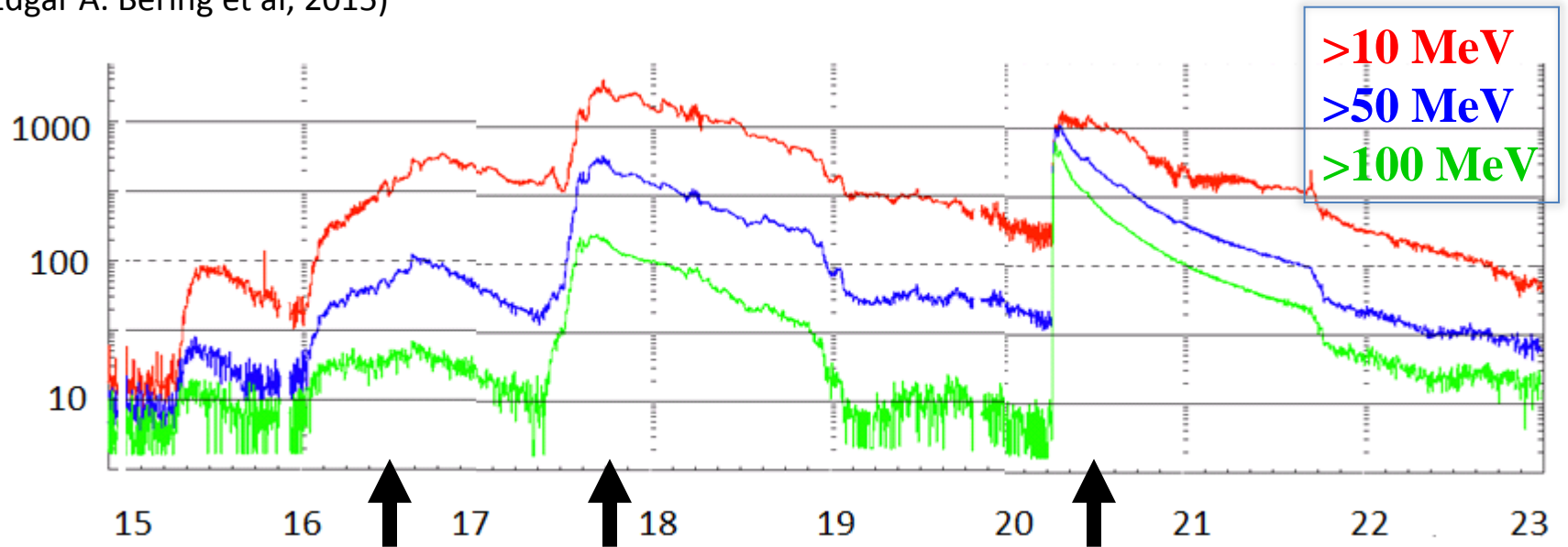
$n(O)/n(N_2)$ в январе 2009 года



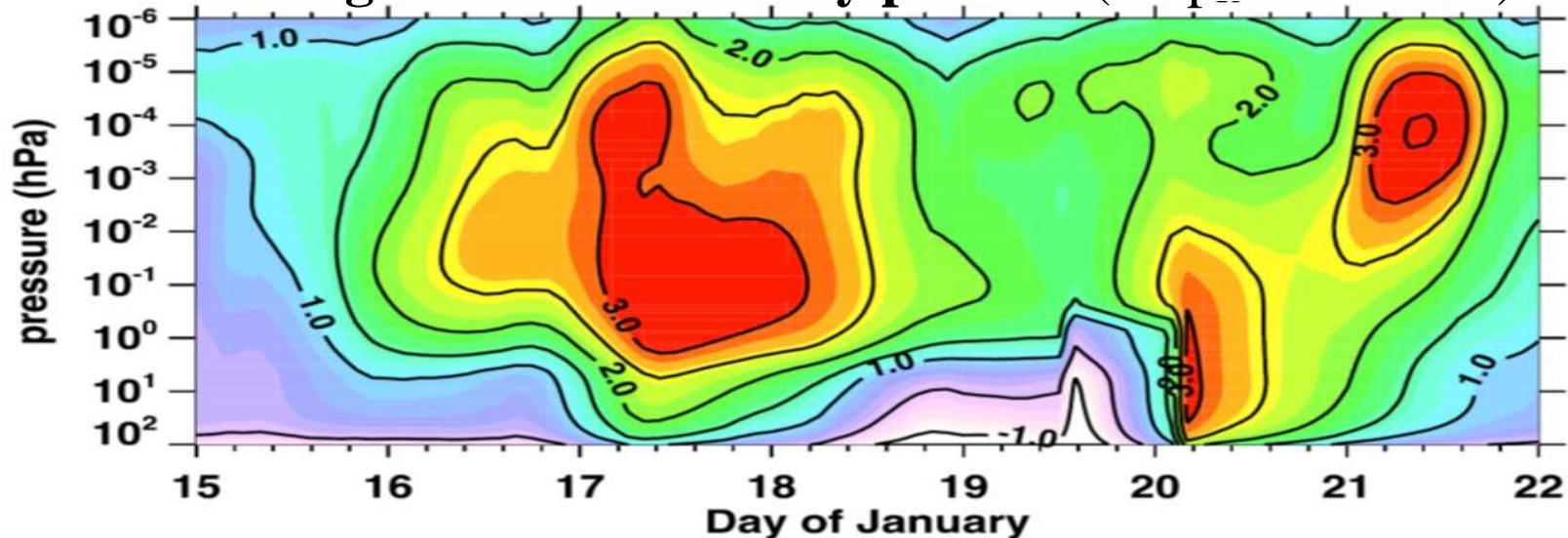
Солнечные протонные события

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

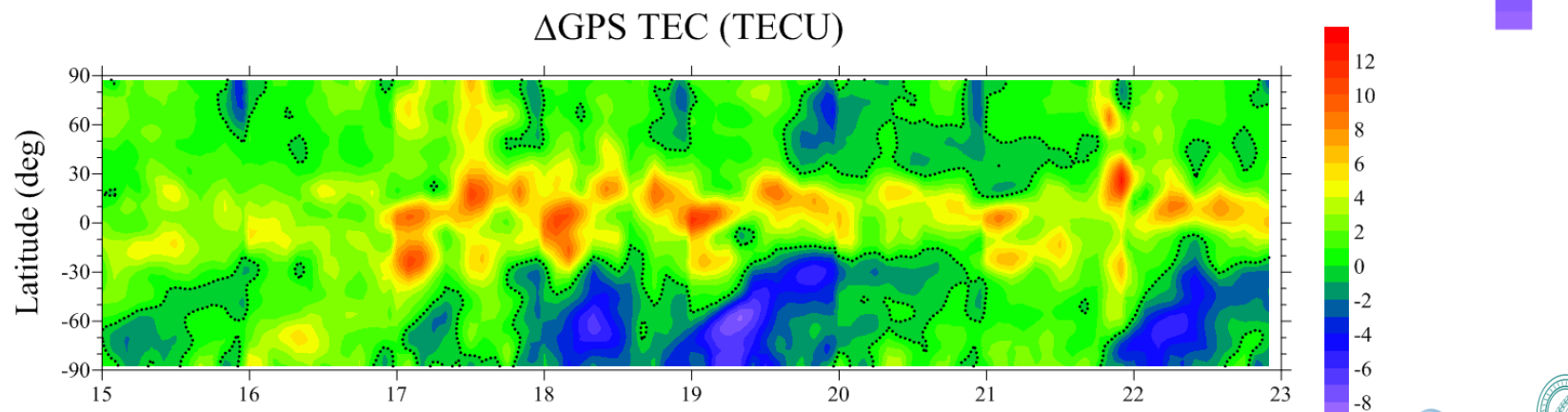
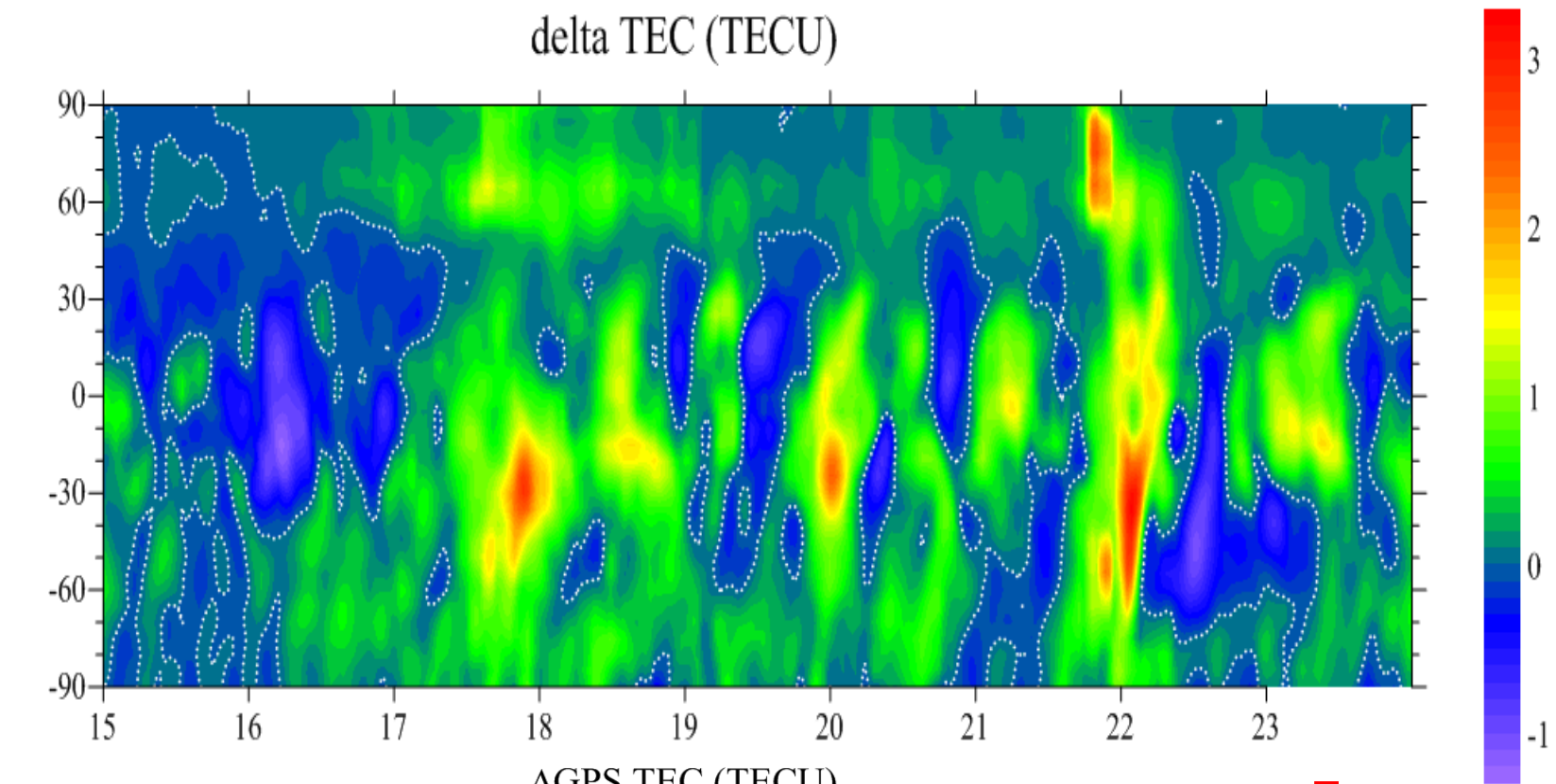
(Edgar A. Bering et al, 2015)



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



Отклик ПЭС на солнечное протонное событие



January 2005

Проблемы численных моделей

- **Упрощенная математическая формулировка**

→ Диффузионное приближение, гидростатика.

- **Неопределенные параметры**

→ Скорости химических реакций, частоты столкновений и т.д.

- **Пространственные & временные разрешения грубые**

- **Учитываются не все физические процессы**

→ Entire Chapman Conference was dedicated to these problems

От диффузионной постановки к системе уравнений гидродинамики в 5-моментном приближении

1. Ion continuity:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i \mathbf{V}_i) = \mathcal{P}_i - \mathcal{L}_i n_i \quad (1)$$

2. Ion velocity:

$$\frac{\partial \mathbf{V}_i}{\partial t} + \mathbf{V}_i \cdot \nabla \mathbf{V}_i = -\frac{1}{\rho_i} \nabla \mathbf{P}_i + \frac{e}{m_i} \mathbf{E} + \frac{e}{m_i c} \mathbf{V}_i \times \mathbf{B} + \mathbf{g} - \nu_{in} (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_n) - \sum_j \nu_{ij} (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j) - \nu_a (V_{i\parallel}) V_{i\parallel} = 0 \quad (2)$$

3. Ion temperature:

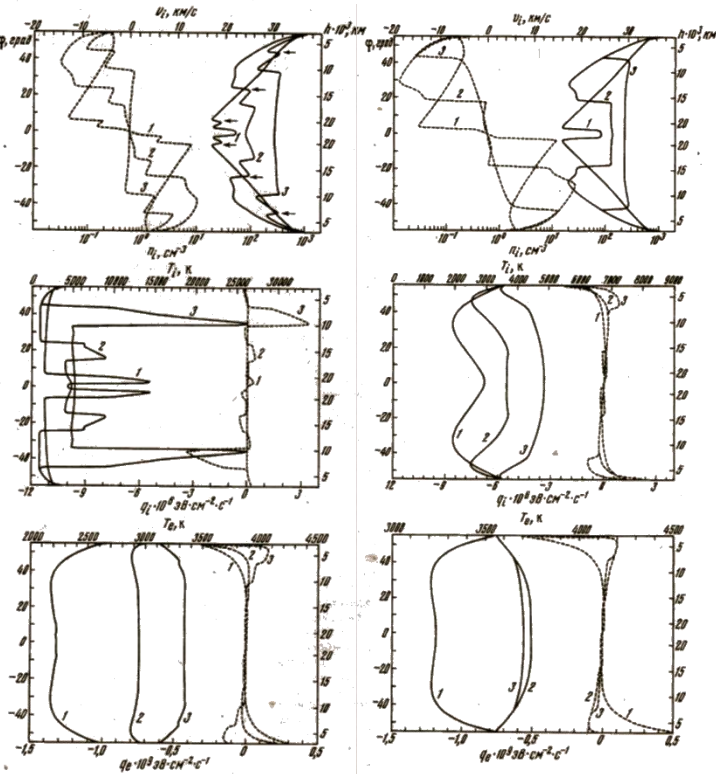
$$\frac{\partial T_i}{\partial t} + \mathbf{V}_i \cdot \nabla T_i + \frac{2}{3} T_i \nabla \cdot \mathbf{V}_i + \frac{2}{3} \frac{1}{n_i k} \nabla \cdot \mathbf{Q}_i = Q_{in} + Q_{ij} + Q_{ie} \quad (3)$$

Уравнения SAMI3 – первой глобальной гидродинамической модели ионосферы

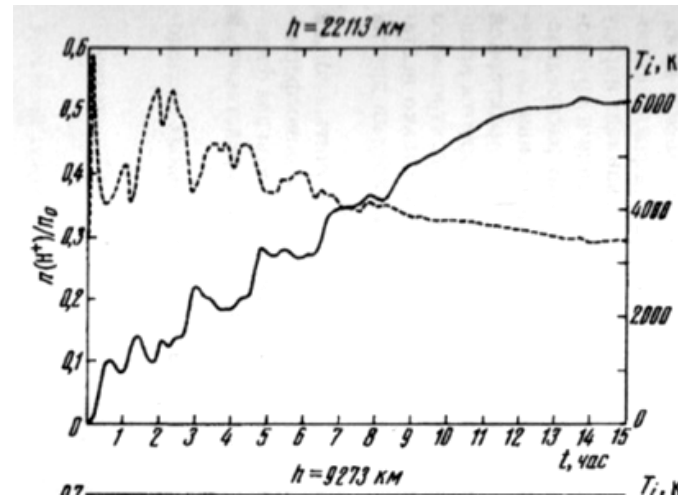
Huba et al., 2000 JGR

История гидродинамических моделей ионосферы

Клименко В. В. Влияние сезонной имметрии на полнение плаенной трубки. Геомагнетизм и аэрномия, 1983, 23(3), 490-493 (система уравнений в 5-моментном приближении)



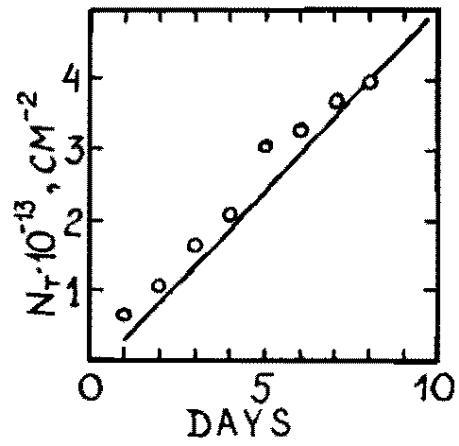
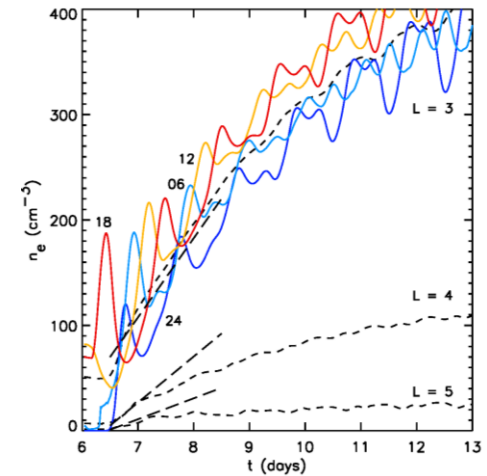
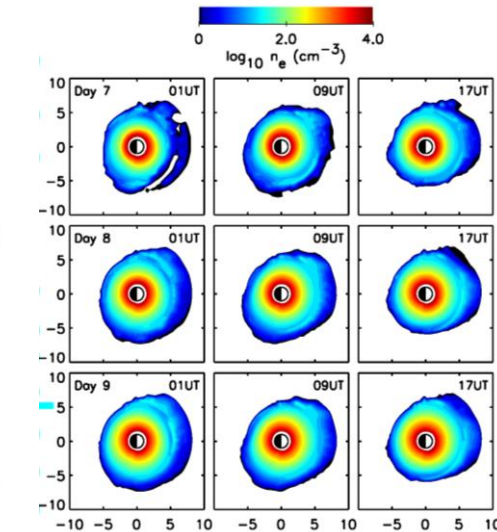
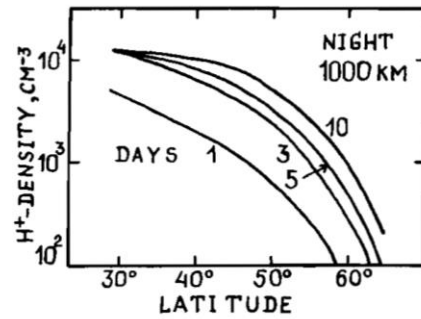
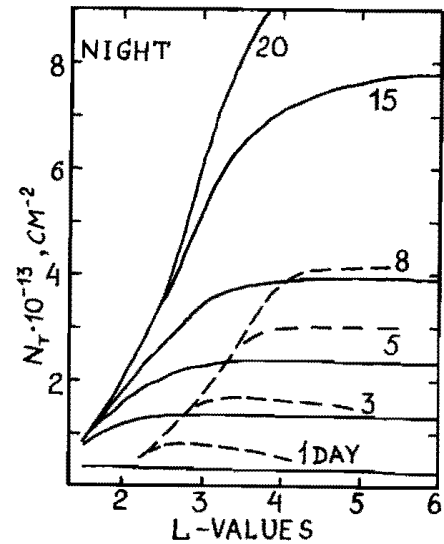
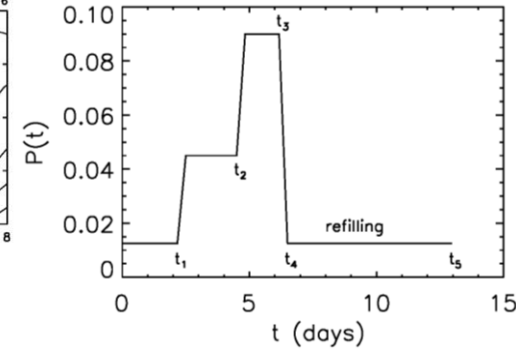
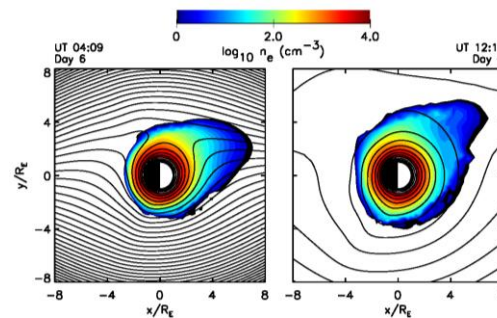
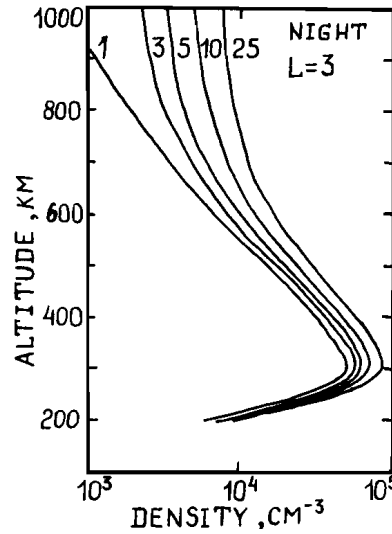
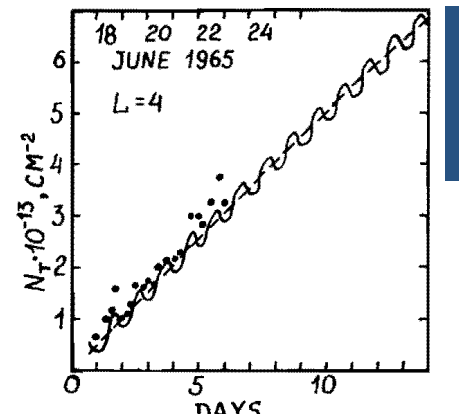
Клименко В. В., Нацвалян Н.С. Исследование влияния потоков тепла на наполнение плазменной трубки. Геомагнетизм и аэрномия, 1996, 36(5), 15-25 (слева показаны результаты, полученные в 8-моментном приближении, справа – в 5-моментном)



Рассчитанное поведение $n(H^+)$ и T_i в процессе заполнения плазменной трубки с $L=4$ на высоте 20000 км (8-моментное приближение).

- Быстрый сверхзвуковой отток ионов H^+ из сопряженных ионосфер на ранних стадиях наполнения.
- Противоток ионов H^+ , также наблюдающийся в эти ранние часы.
- Состояние диффузионного равновесия, которое достигается, когда два потока ионов термализуются, и наблюдается уменьшение сверхзвуковых скоростей, достигнутых на ранних стадиях.

Заполнение плазменных трубок после геомагнитного возмущения



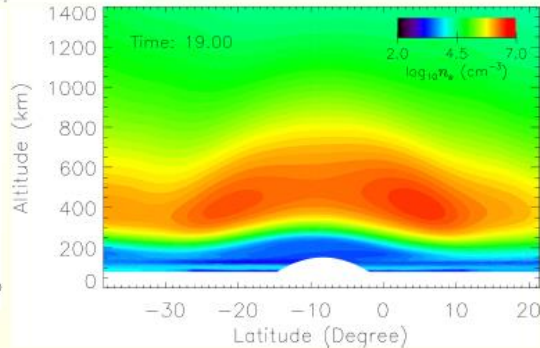
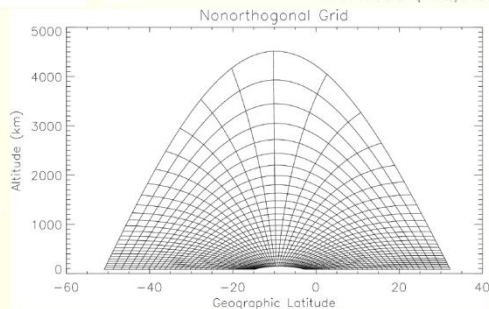
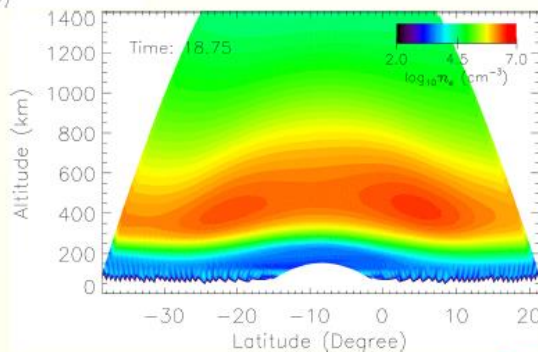
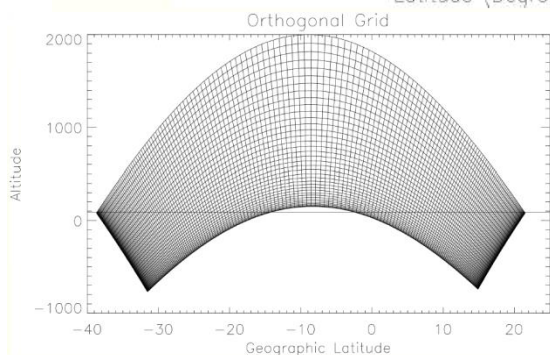
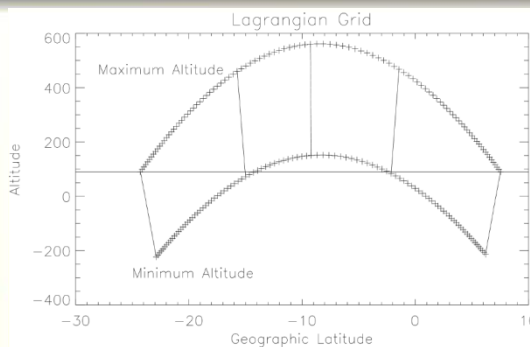
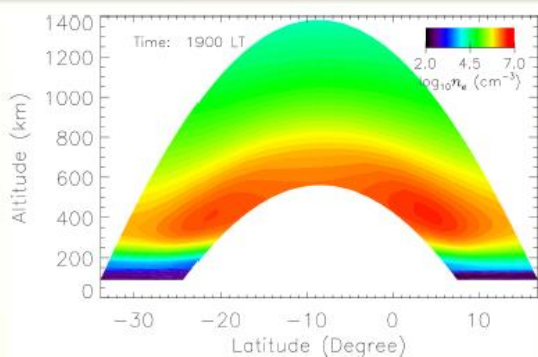
Krinberg I.A., Tashchilin A.V.
Refilling of geomagnetic force tubes with a thermal plasma after magnetic disturbance. Ann. Geophys. 1982, 38(1), 25-32.

Krall J., and J.D. Huba, SAMI3 simulation of plasmasphere refilling, Geophys. Res. Lett., 40, 2484-2488, 2013.

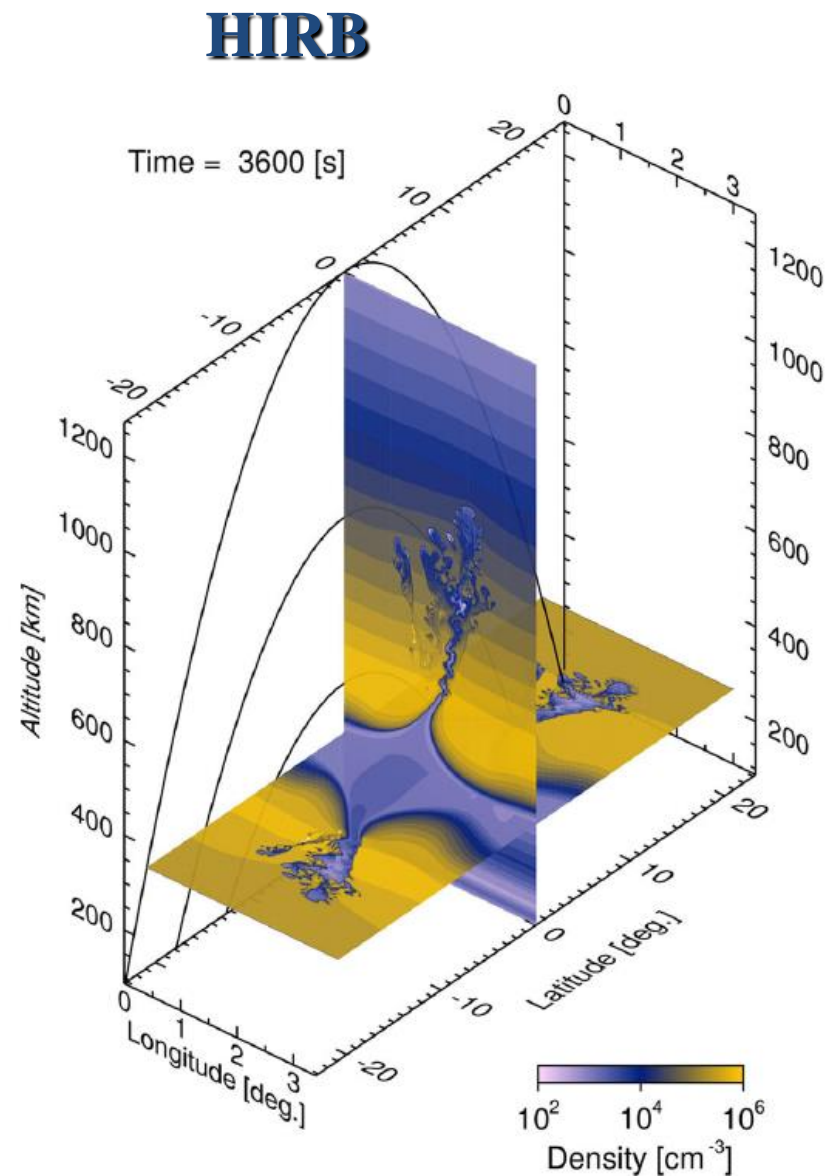
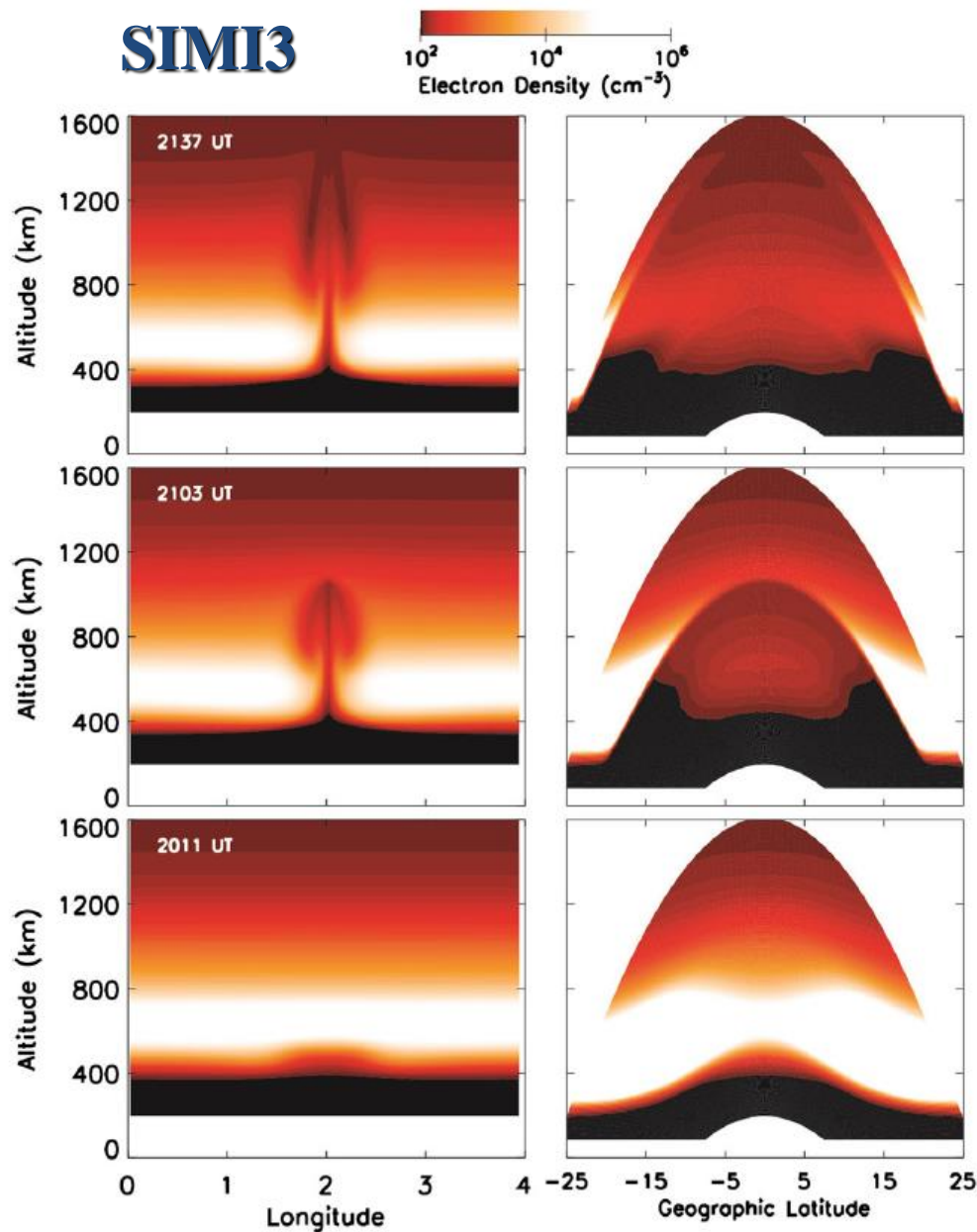
Единственная глобальная гидродинамическая модель ионосферы

GRID COMPARISON

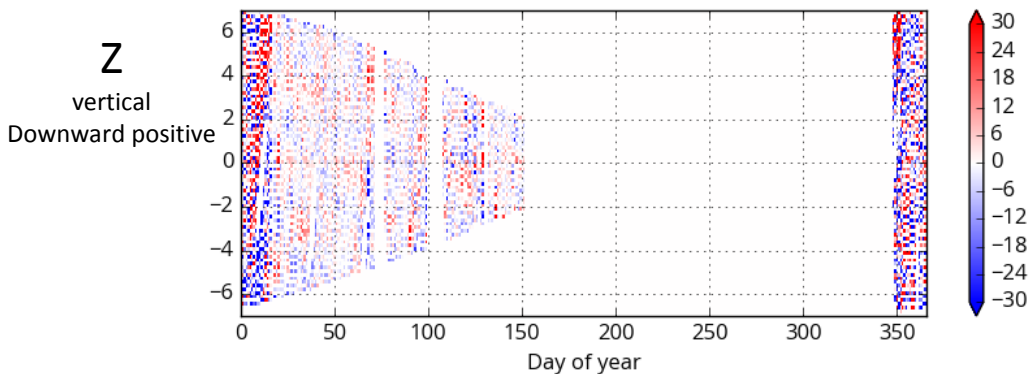
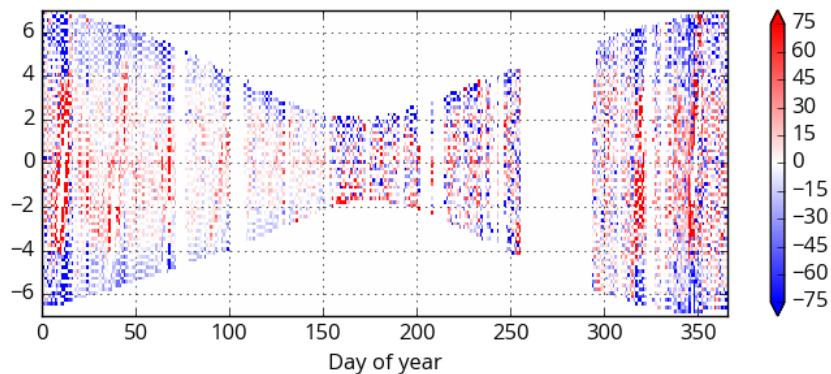
lagrangian, orthogonal eulerian, nonorthogonal eulerian



Первые результаты воспроизведения 3-D структуры плазменных пузырей

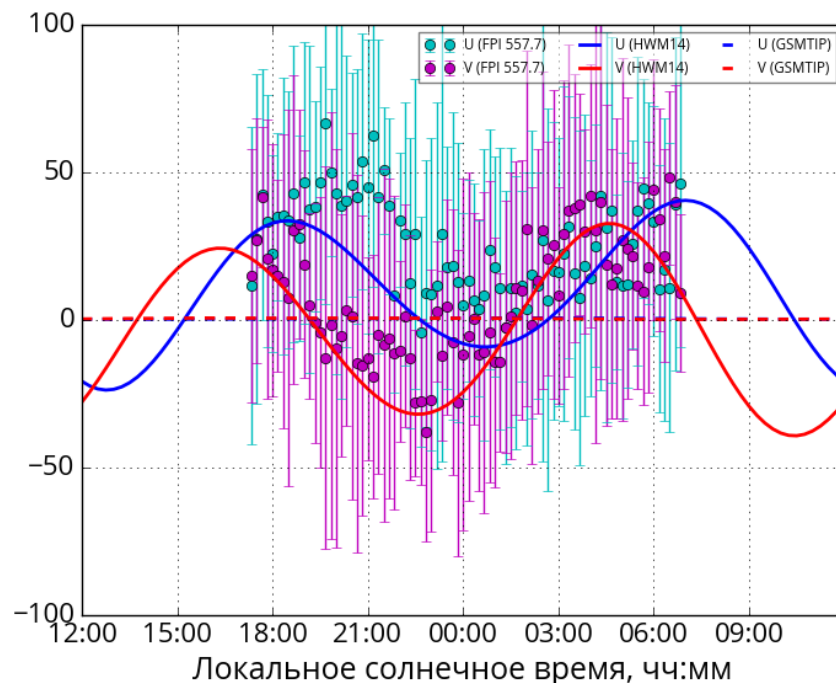
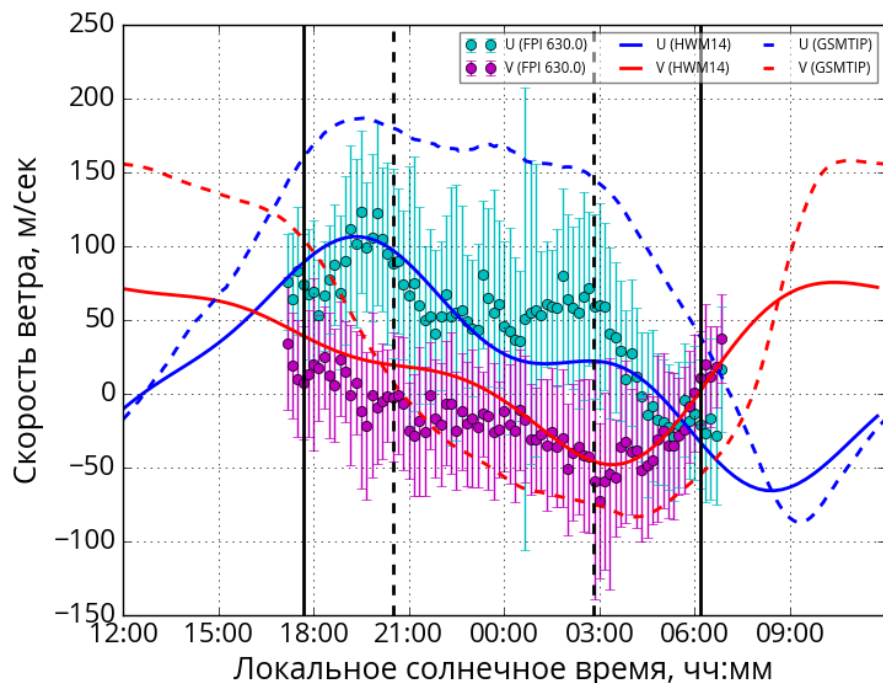


Измерения вертикального ветра интерферометром Фабри-Перро в Торах в 2016-2017 годах

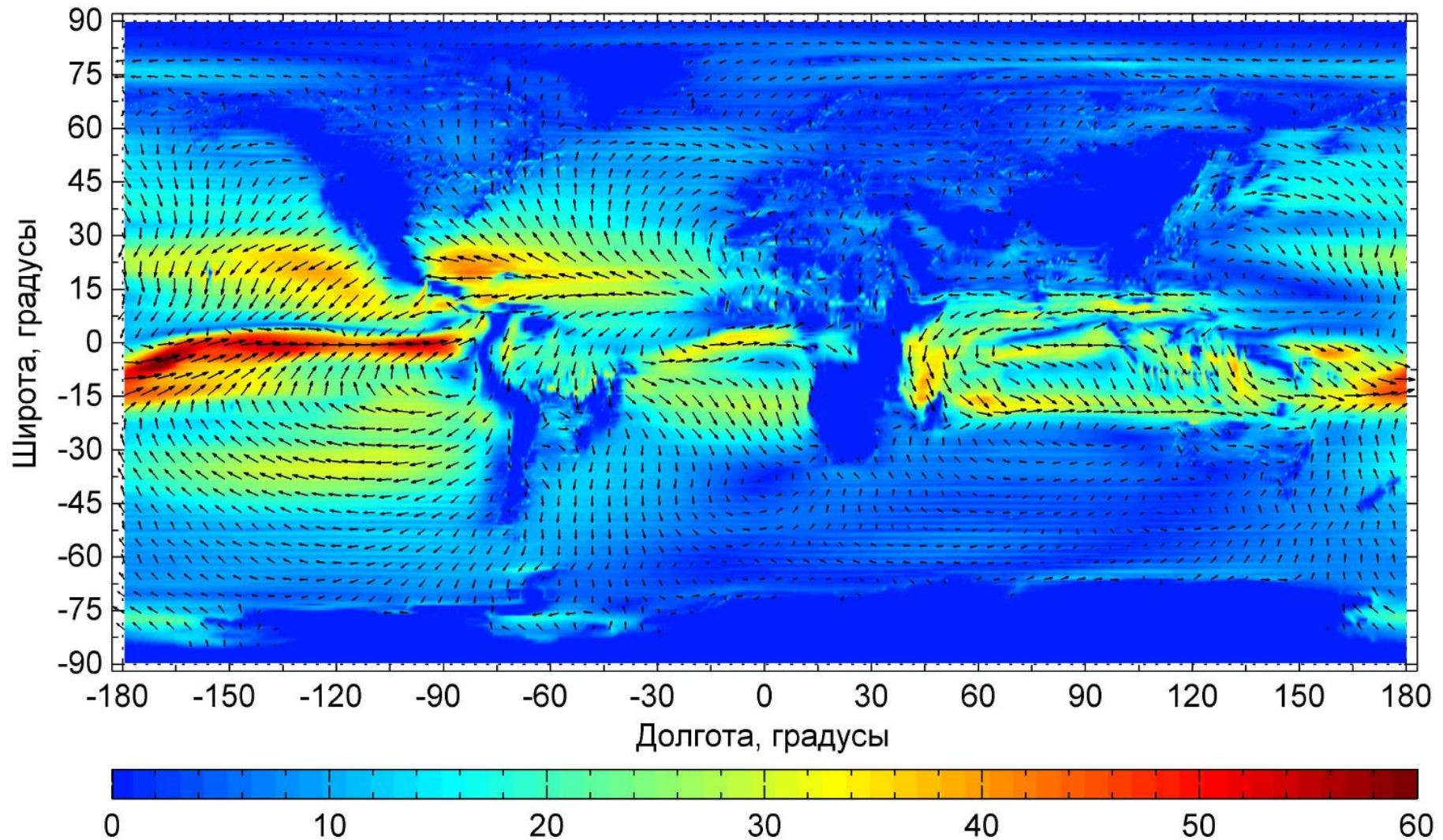


630.0 nm

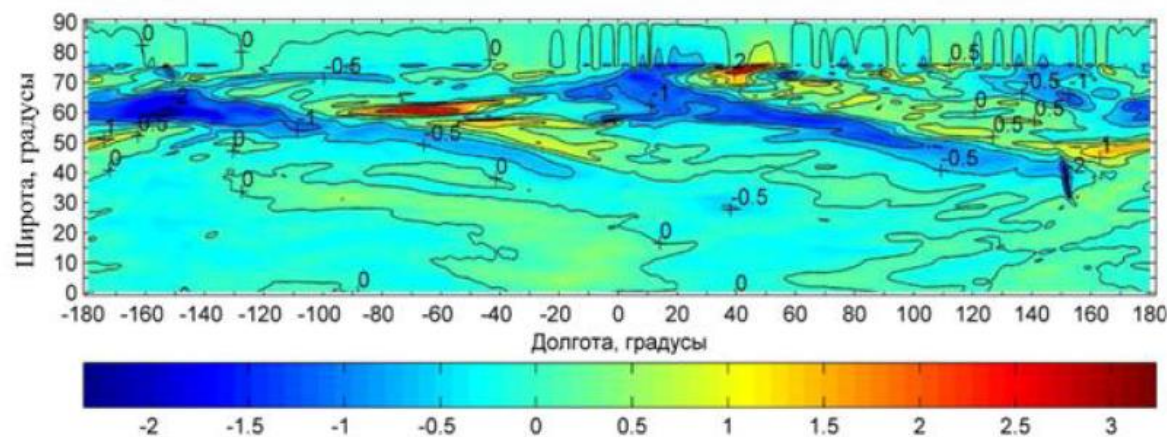
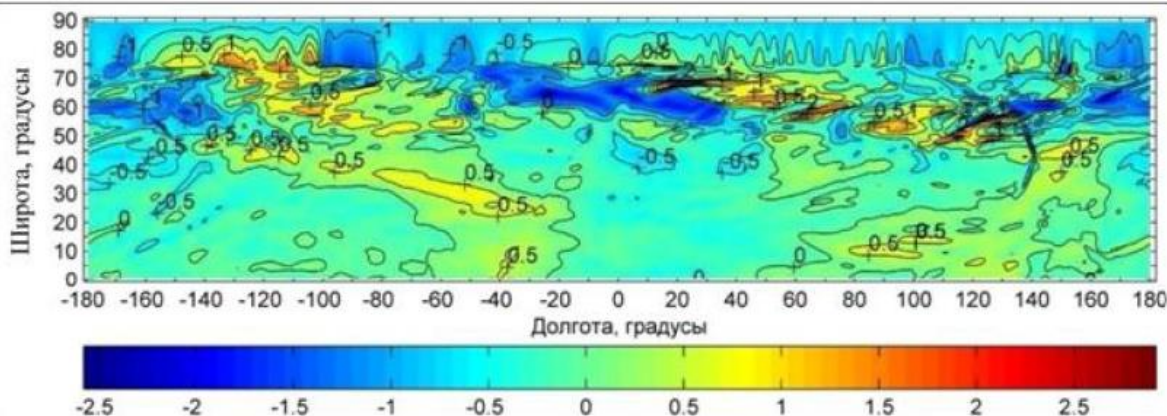
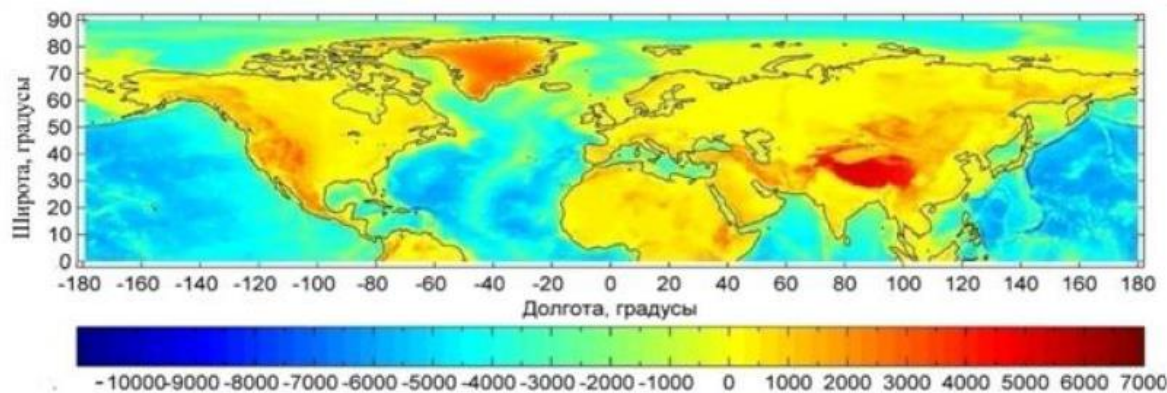
557.7 nm



Динамическая модель нижней и средней атмосферы, разработанная в ПГИ



Влияние орографии на вертикальный ветер



Используемый в модели рельеф Земли (вверху), а также рассчитанные вертикальные составляющие скорости нейтрального ветра на высоте 60 км, полученные с учетом рельефа (посередине) и в приближении гладкой земной поверхности (внизу).

Цвет указывает величину скорости в м/с, причем положительной считается направленная вверх скорость.

Гидродинамическая модель системы Т/И

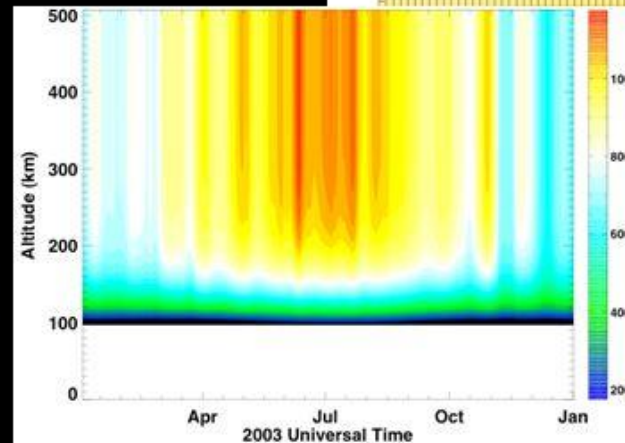
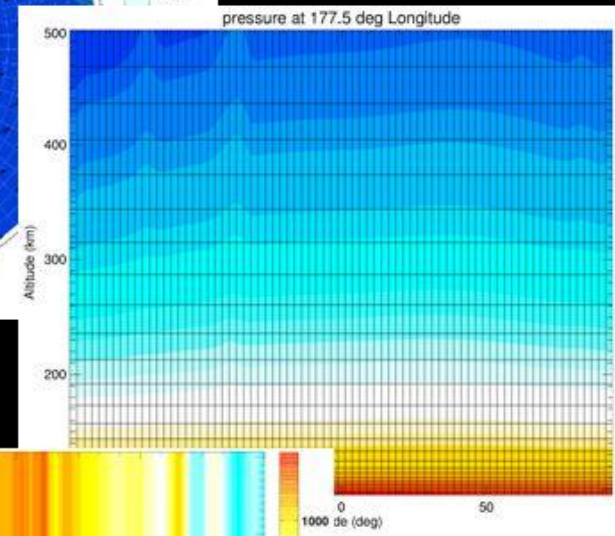
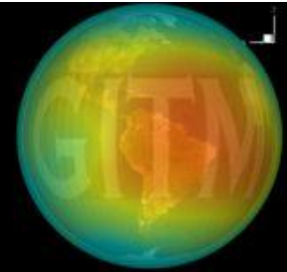
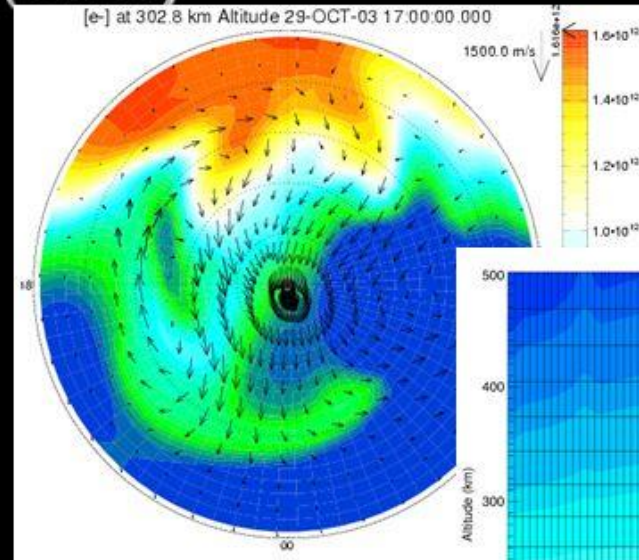
The Global Ionosphere-Thermosphere Model (GITM)

GITM solves for:

- 6 Neutral & 5 Ion Species
- Neutral winds
- Ion and Electron Velocities
- Neutral, Ion and Electron Temperatures

GITM Features:

- Flexible grid resolution
- Solves in Altitude coordinates
- Can have non-hydrostatic solution
 - Coriolis
 - Vertical Ion Drag
 - Non-constant Gravity
 - Massive heating in auroral zone
- Runs in 1D and 3D
- Vertical winds for each major species with friction coefficients
- Non-steady state explicit chemistry
- Variety of high-latitude and Solar EUV drivers
- Fly satellites through model

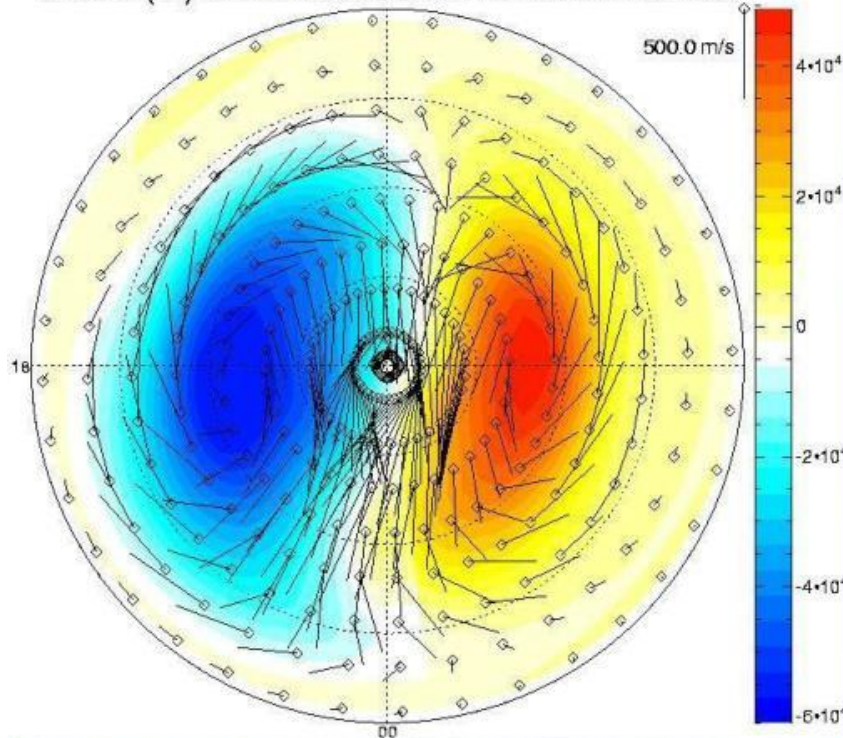


Скорость ионов и нейтралов в области языка



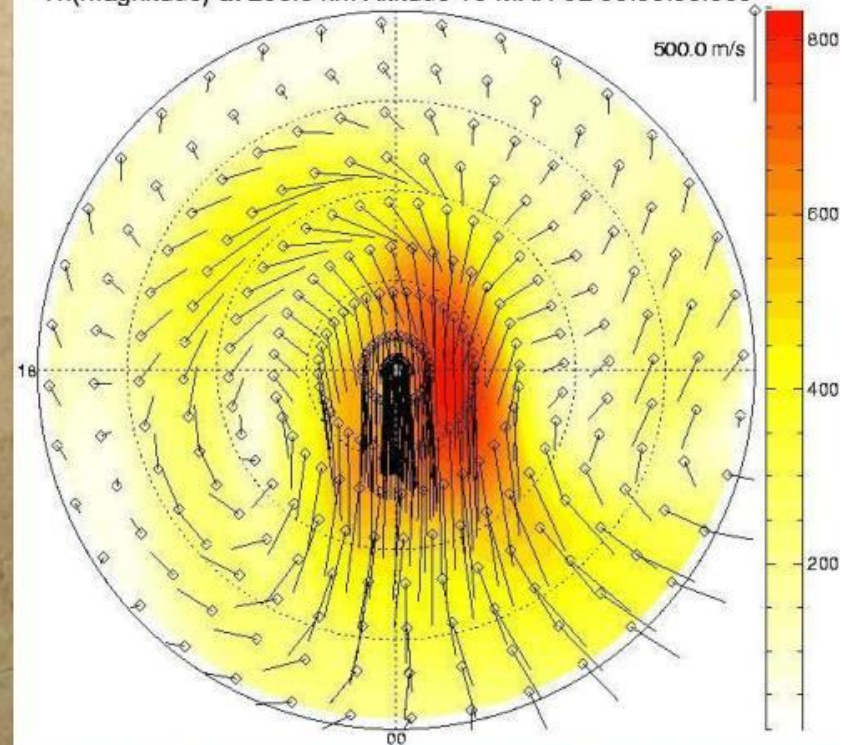
V_I AND V_N WITH $B_Z = -10$ nT

Potential(kV) at 298.6 km Altitude 19-MAR-02 00:00:00.000



Ion flows driven primarily by potential

V_n (magnitude) at 298.6 km Altitude 19-MAR-02 00:00:00.000



Neutral winds driven by (a) Gradient in pressure; (b) Coriolis; (c) ion drag.

Note dawn/dusk differences

Суперкомпьютерная модель атмосферных процессов

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} + \frac{\partial \rho uw}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_i} \xi(z) \frac{\partial u}{\partial x_i} + 2\rho \omega_z v,$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho vw}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x_i} \xi(z) \frac{\partial u}{\partial x_i} + 2\rho \omega_z u,$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho uw}{\partial x} + \frac{\partial \rho vw}{\partial y} + \frac{\partial \rho w^2}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x_i} \xi(z) \frac{\partial w}{\partial x_i},$$

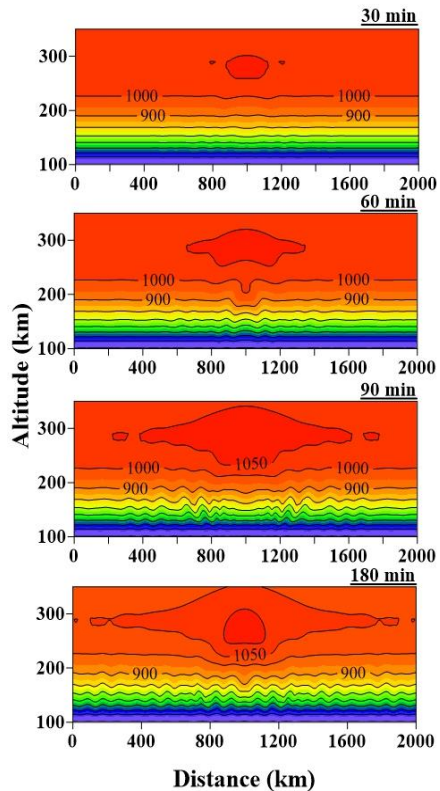
$$\frac{1}{\gamma - 1} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial Pu}{\partial x} + \frac{\partial Pv}{\partial y} + \frac{\partial Pw}{\partial z} \right) = -P(\nabla \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i} \kappa(z) \frac{\partial T}{\partial x_i} + \xi(z) \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \frac{\partial v_k}{\partial x_i} + Q(z),$$

$$Q(z) = -\frac{\partial}{\partial z} \kappa(z) \frac{\partial}{\partial z} T_0(z)$$

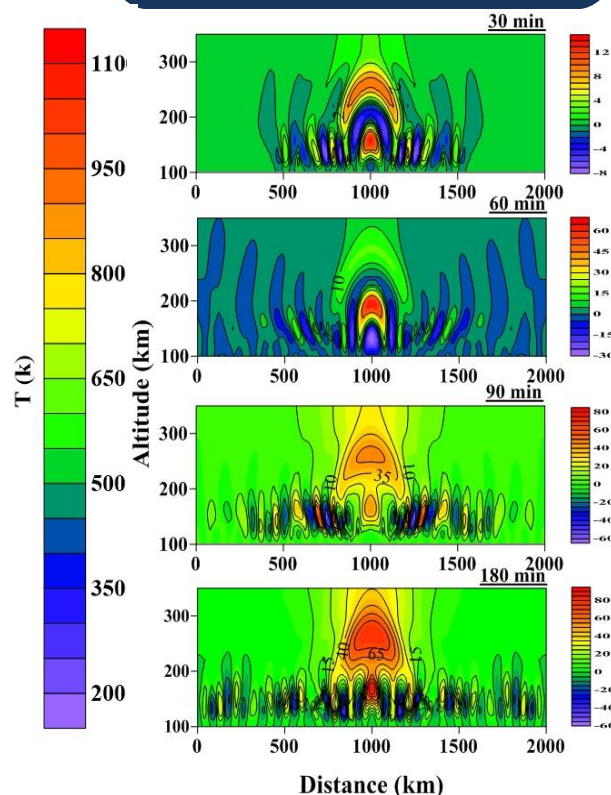
1. Kshevetskii S.P. Analytical and numerical investigation of nonlinear internal gravity waves. Nonlinear processes in geophysics. 2001. 8. 37-51.
2. Kshevetskii S.P. Numerical simulation of nonlinear internal gravity waves. Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2001. v.41. N12. pp. 1777-1791.
3. Kshevetskii S.P. Modeling of propagation of internal gravity waves in gases. Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2001. v.41. N2. pp. 273-288.

Возмущения верхней атмосферы вследствие распространения и диссипации АГВ от источника на поверхности Земли

Temperature change. Modeling

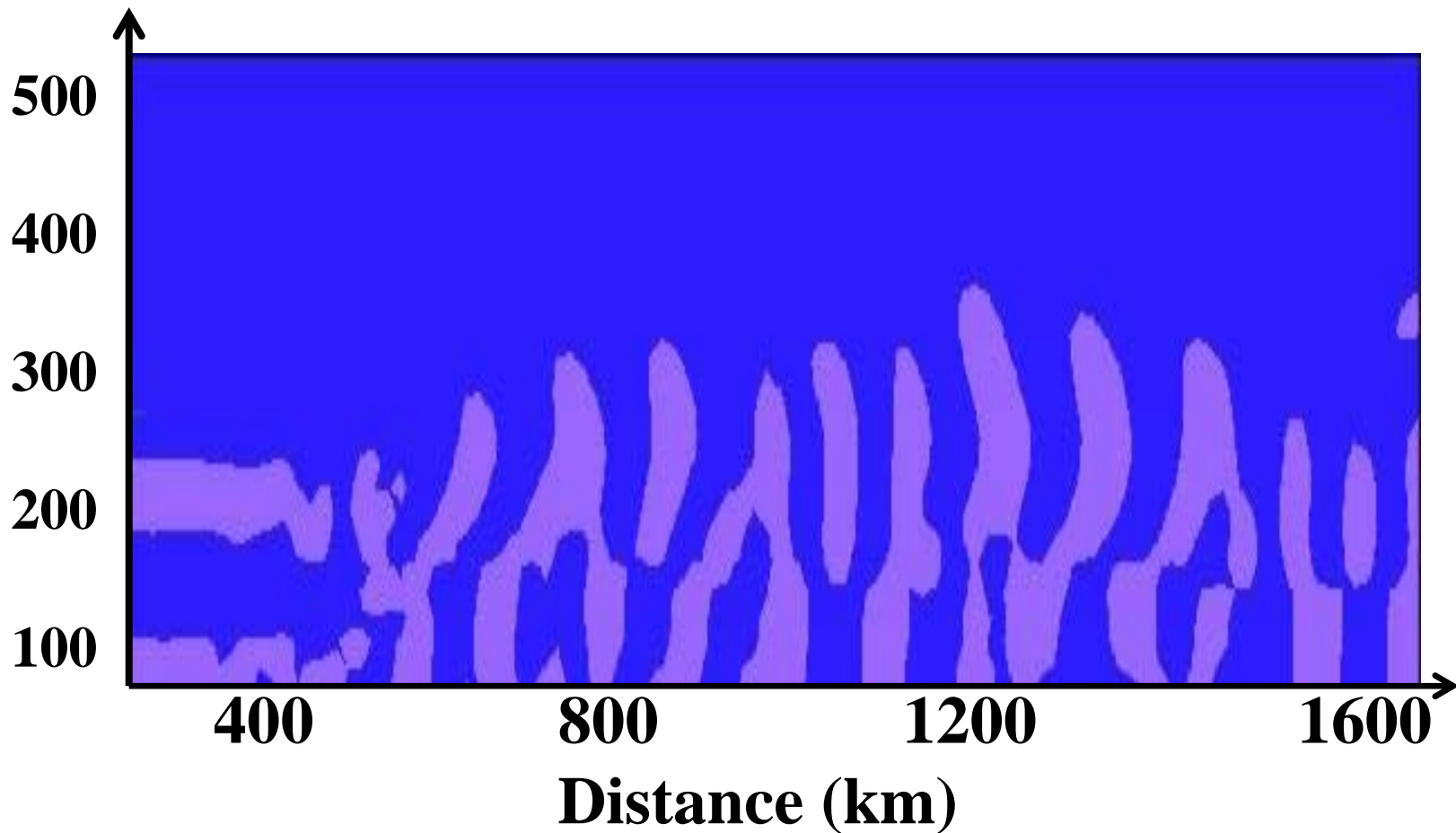


Wave perturbation of temperature. Modeling

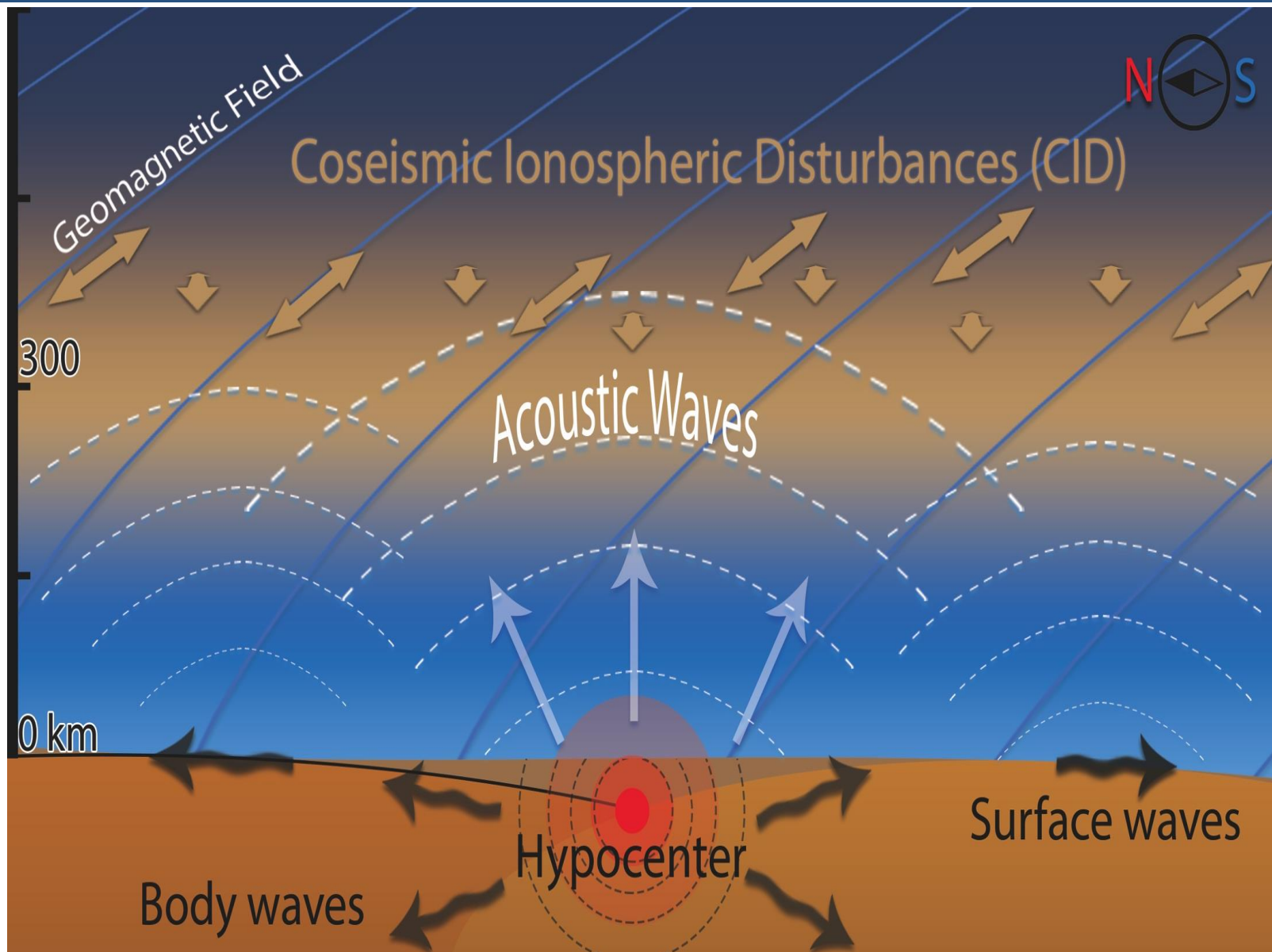


[Karpov et. al., 2016] explores methods of mathematical modeling the spread of AGW in the upper atmosphere from the surface source. According to theoretical studies, that above the source at an altitude of ~ 200 km due to the dissipation of the AGW heating a region of the atmosphere with a horizontal scale of about 1000 km with a duration of operation of the power ~ 1 hour. The emergence of the heated region changes the propagation conditions of AGW and leads to the waveguide propagation of waves with periods shorter than the Brunt-Vaisala period. The upper boundary of the waveguide is formed heated region of the upper atmosphere. In the figure shows mean temperature in the upper atmosphere and wave temperature perturbations in the upper atmosphere produced by a ground-based AGW source. 2 hours after the power switching can be noted a significant change in wave propagation mode is manifested in the character of the waveguide propagation of atmospheric waves in the region below ~ 200 km, and the absence of wave disturbances above 250-300 km.

Возмущения верхней атмосферы вследствие распространения и диссипации АГВ от движущегося источника



Моделирование сейсмо-ионосферных эффектов



Schematic representation of coupling processes

- Ionospheric seismology

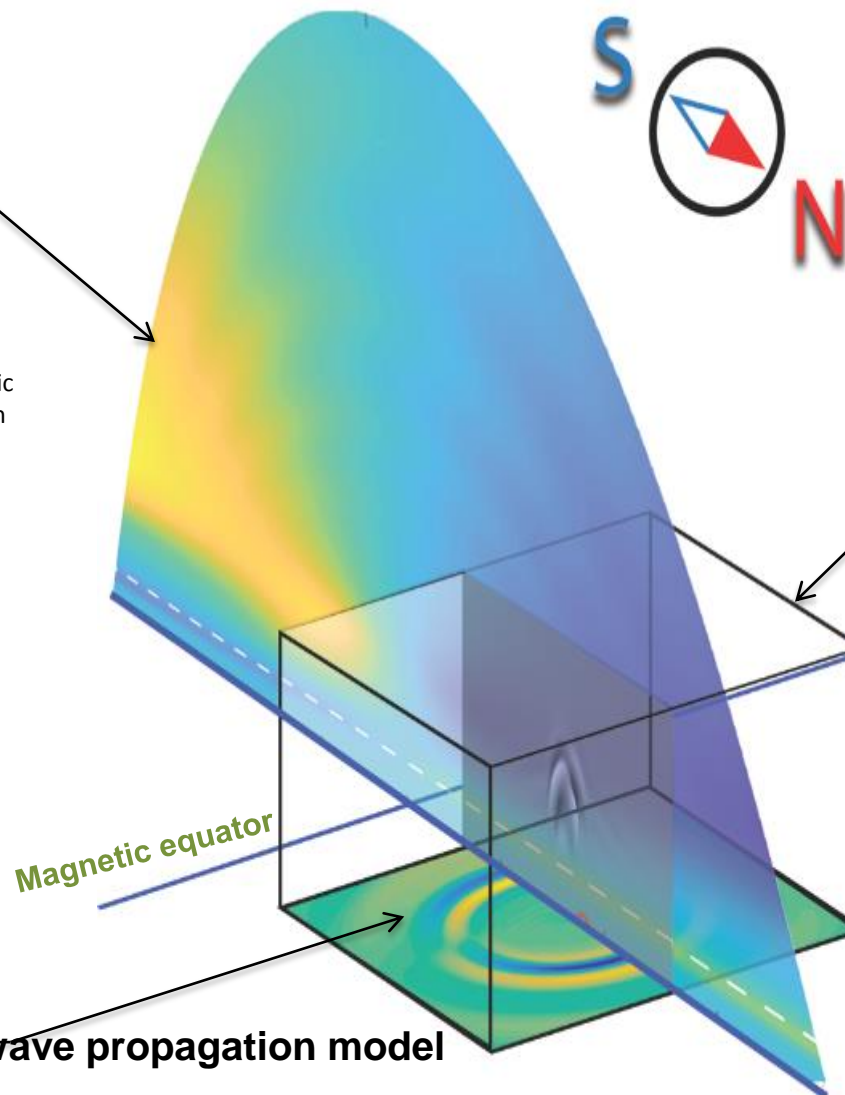
Симбиоз трех моделей (сейсмических волн, атмосферы, ионосферы)

- Modeling approach

GEMINI **ionosphere model**

[Zettergren and Semeter, JGR, 2012]

nonlinear multifluid electrodynamic conservation equations simulation



Previous results:
[Zettergren and Snively, JGR, 2015, 2019;
Zettergren et al., JGR, 2017]

MAGIC 3D **neutral atmosphere model**

[Snively, GRL, 2013]

Direct numerical nonlinear compressible Navier-Stokes equations simulation

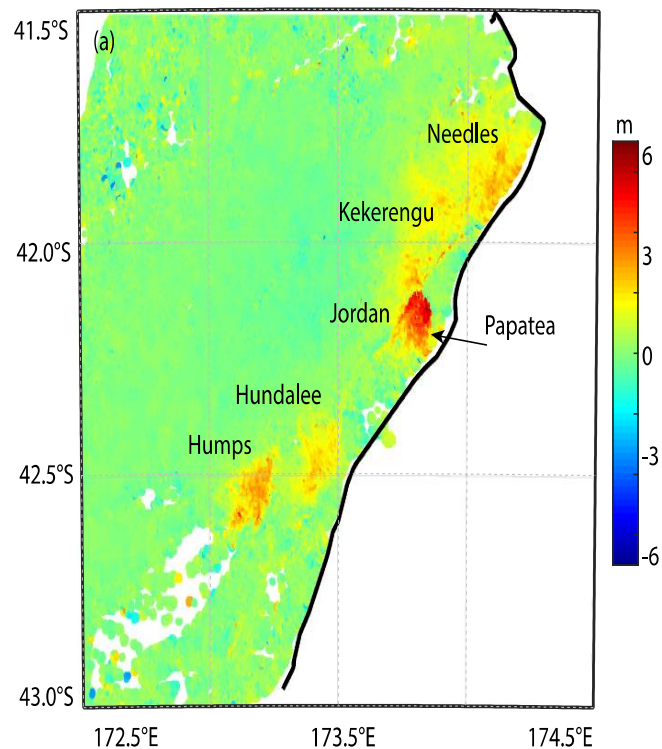
SPECFEM3D **Forward seismic wave propagation model**

[Komatitsch and Tromp, GJI, 2002]

Землетрясение в Новой Зеландии 2016 года

2016 New Zealand M7.8 earthquake

Vertical displacements. SAR azimuth and range offsets data



Credits: Kate Pedley, University of Canterbury

Origin time: 2016-11-14 00:02:56 LT (NZDT)

Location: $\sim 42.737^{\circ}\text{S } 173.054^{\circ}\text{E}$

Depth: ~ 15.1 km

SAR azimuth and range offsets data: Ian Hamling

Результаты моделирования

2016 New Zealand M7.8 earthquake. Modeling

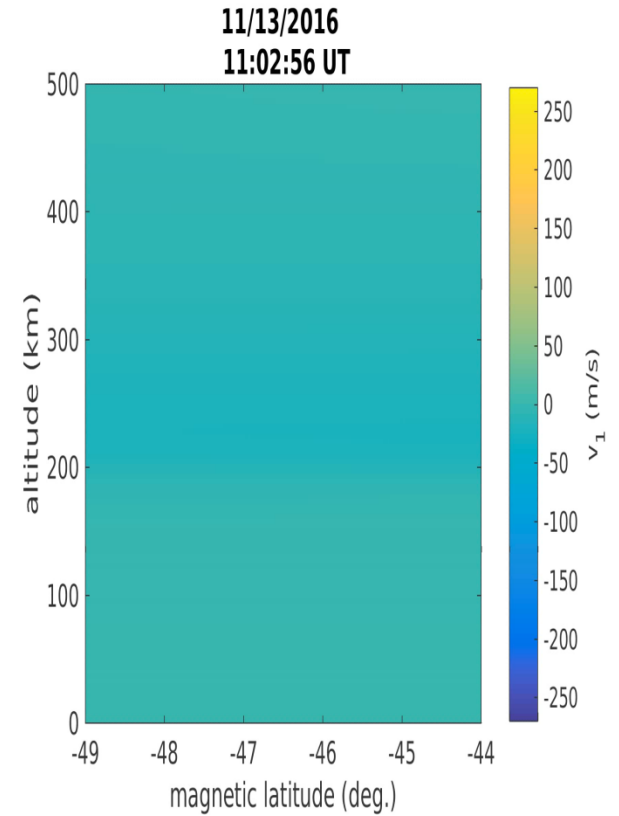
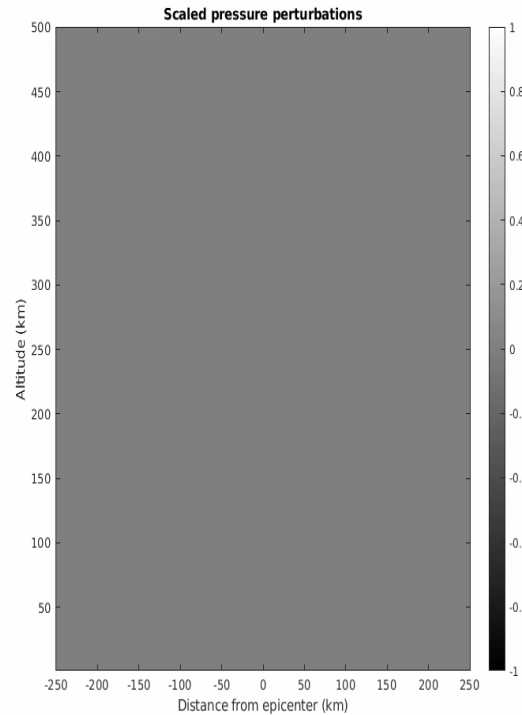
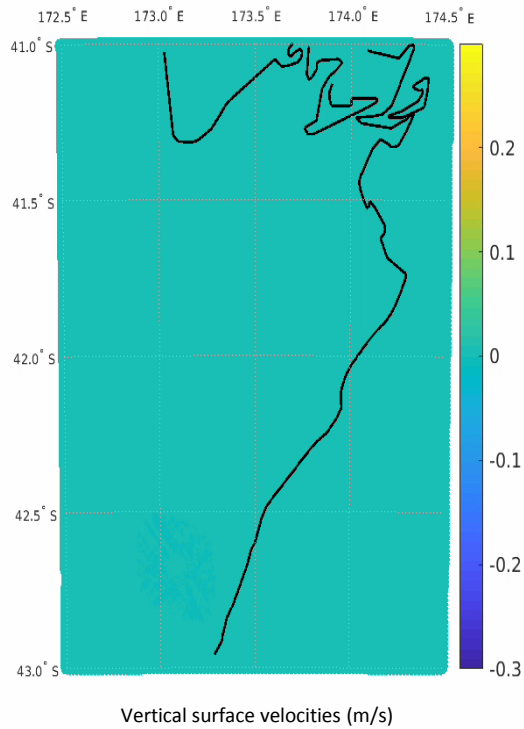
SPECFEM 3D

>>>>>

MAGIC 3D

>>>>>

GEMINI 2D



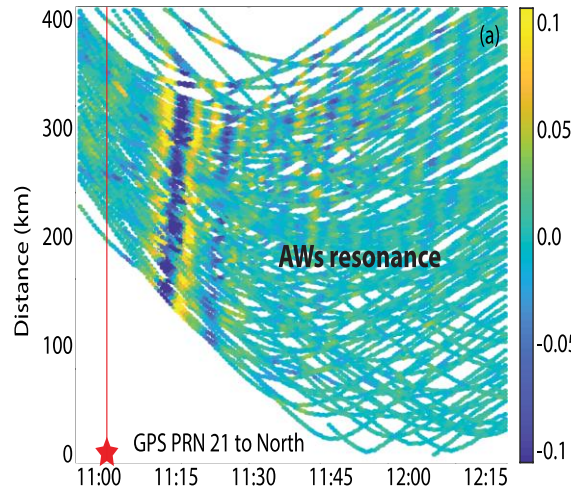
Kinematic slip model: [Holden et al., 2017]
modified with [Xu et al., 2018]

Meridional slice along 174°E

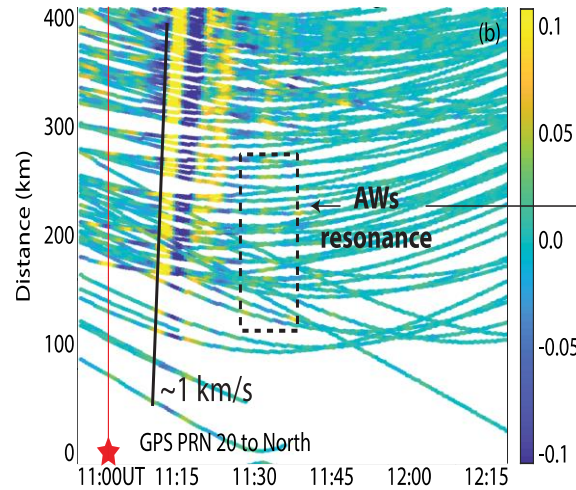
Сравнение с данными ПЭС

2016 New Zealand M7.8 earthquake. Total electron content perturbations

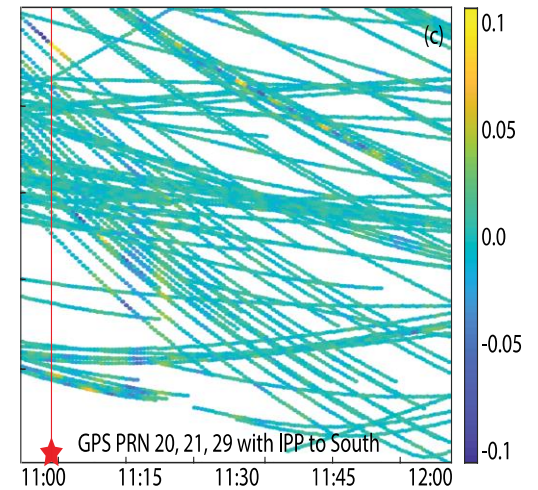
GPS PRN-21, North from epicenter



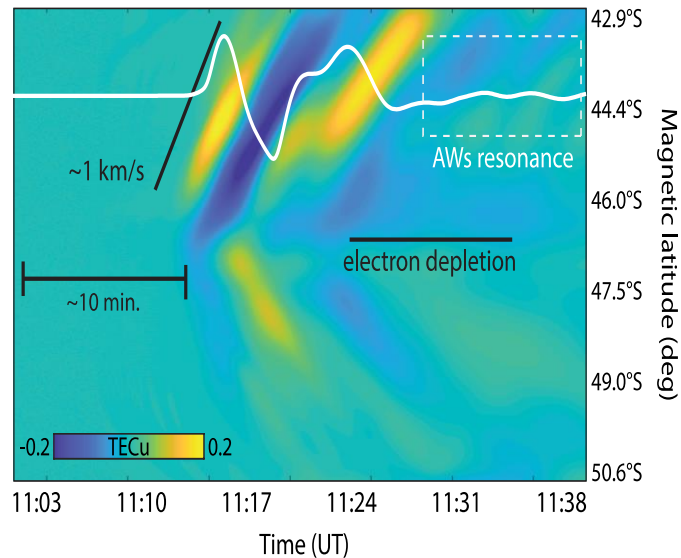
GPS PRN-20, North from epicenter



All PRNs, South from epicenter



Simulated vTEC perturbations along 174°E



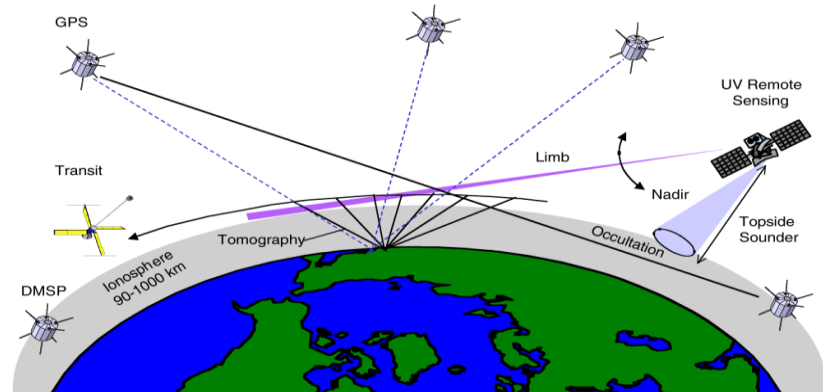
Независимые исследования ССМС выявили:

- **Определение согласия между ионосферными моделями и наблюдениями является сложным.**
- **Чаще модели одной ионосферы лучше согласуются с наблюдениями, чем модели системы термосфера-ионосфера.**

Ассимиляционные модели согласуются с наблюдениями и могут помочь в понимании ионосферных моделей!

Data Assimilation Models

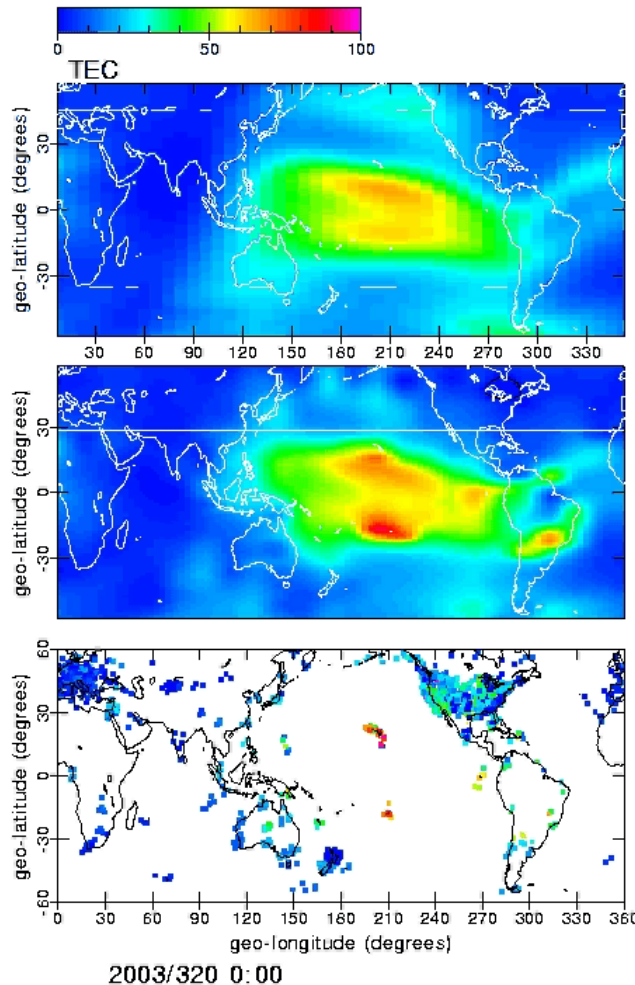
- Models combine measurements from observing system with the information obtained from theoretical model through the data assimilation technique.
- The outputs of 3-D ionosphere have parameters closer to the observations.
- They estimate physical drivers (neutral wind, neutral composition, electric field, etc.) that are self-consistent with the calculated ionospheric parameters.
- Assimilated data may have different sources.



Data Assimilation Models

Example:

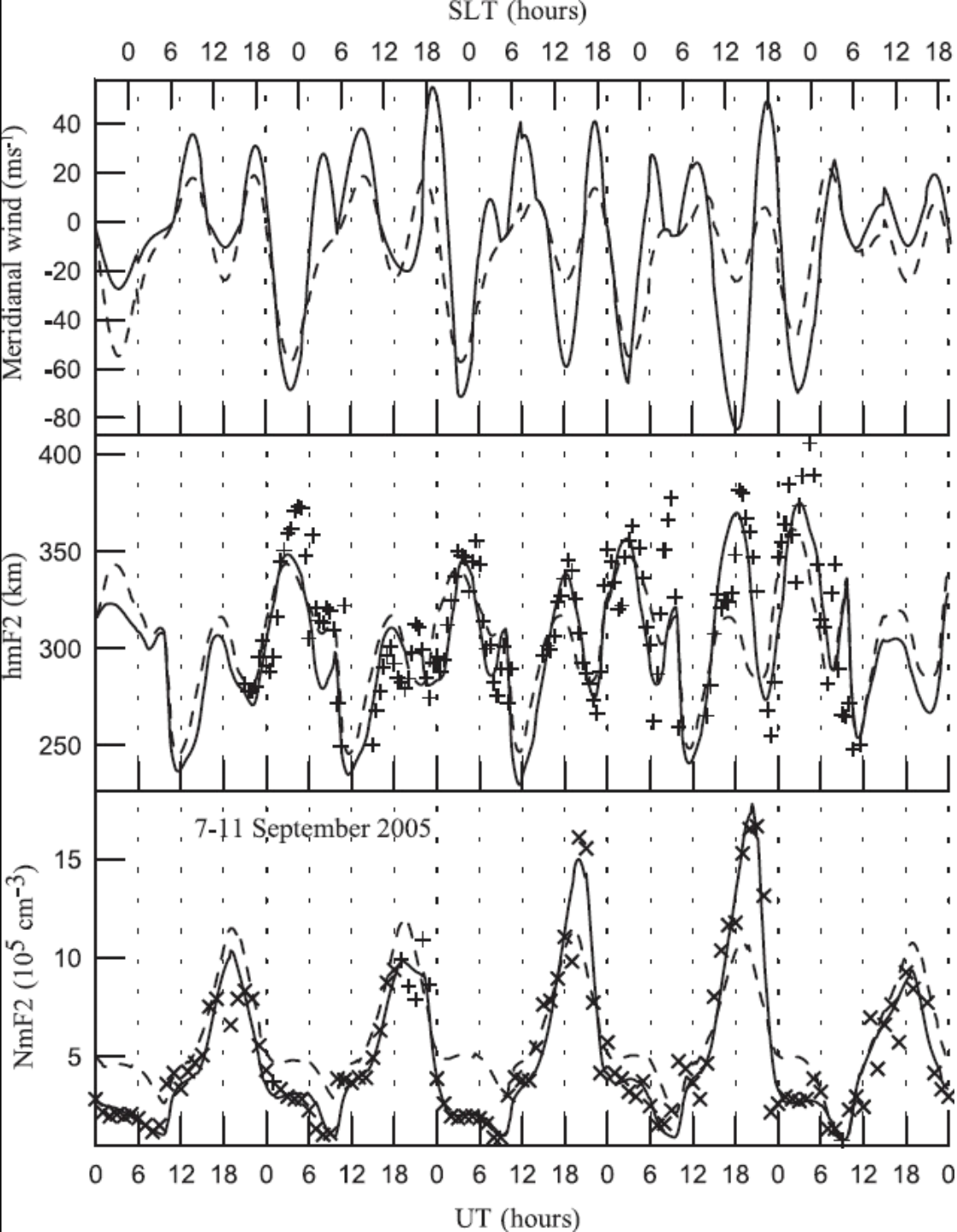
GAIM-FP Global Assimilation of Ionospheric Measurements-Full Physics (90-20,000 km)



Physics-Based

Data assimilation

Global TEC data

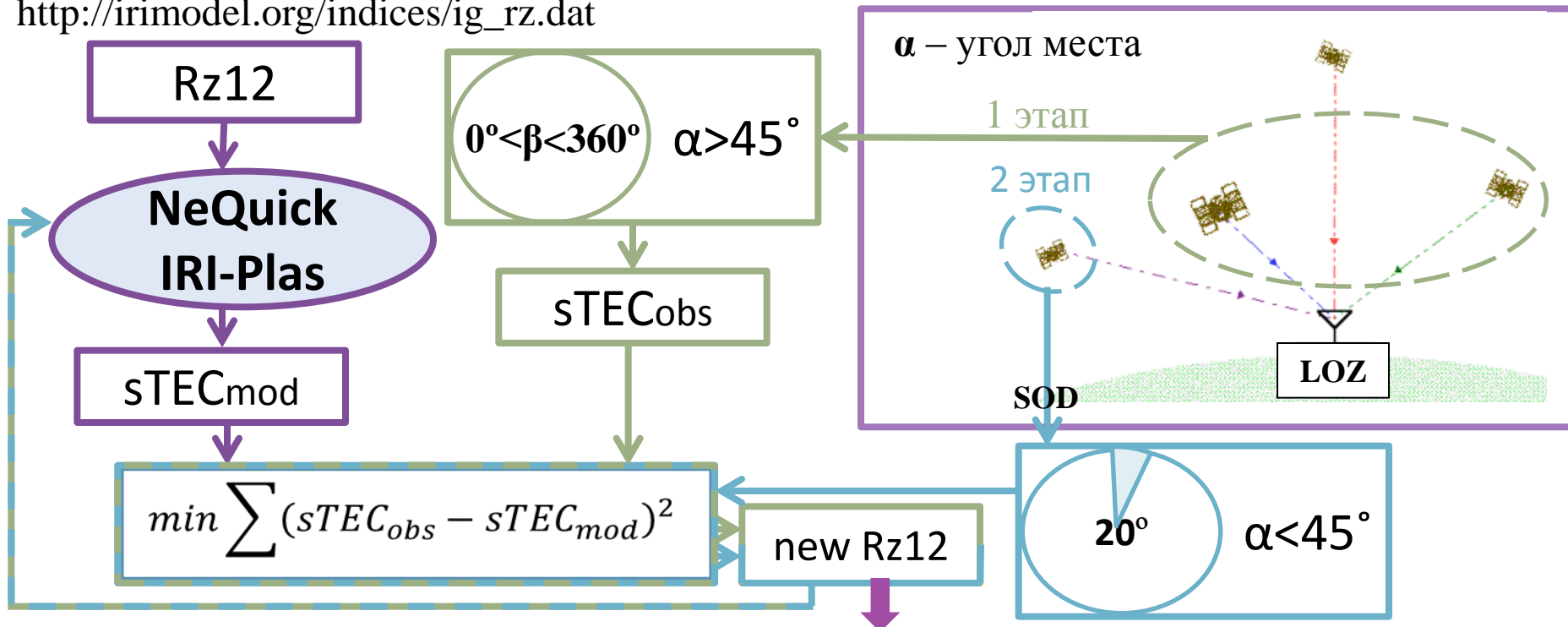


Pavlov and Pavlova, 2011

**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!**

Метод коррекции модели ионосферы

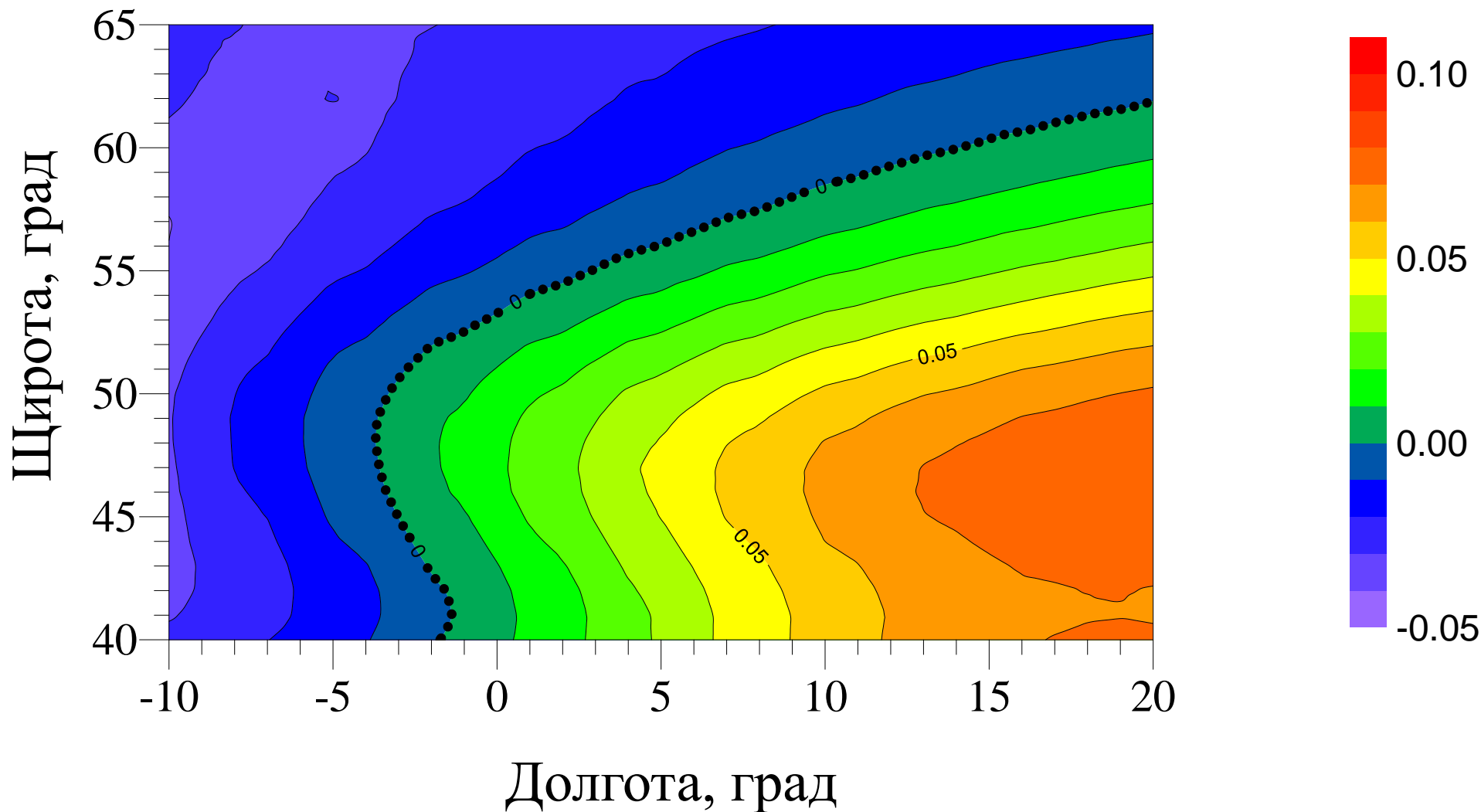
http://irimodel.org/indices/ig_rz.dat



Без коррекции						1 шаг коррекции			2 шаг коррекции			
Azim	Elev	TECobs	Rz12	TECmod	dTEC	Rz12	TECmod	dTEC	Rz12	Azim	Elev	dTEC
266.5	56.0	43.08	114	29.72	13.36		39.85	3.23	106	54.67	28.25	-0.09
166.3	53.8	45.12		34.10	11.02	150	46.05	-0.93	134	79.24	29.84	0.01
199.3	55.4	43.66		32.94	10.71		44.82	-1.16	128	87.94	19.50	-0.53
127.9	62.2	10.34		13.61	-3.27	72	10.33	0.01	104	127.8	15.37	-0.09

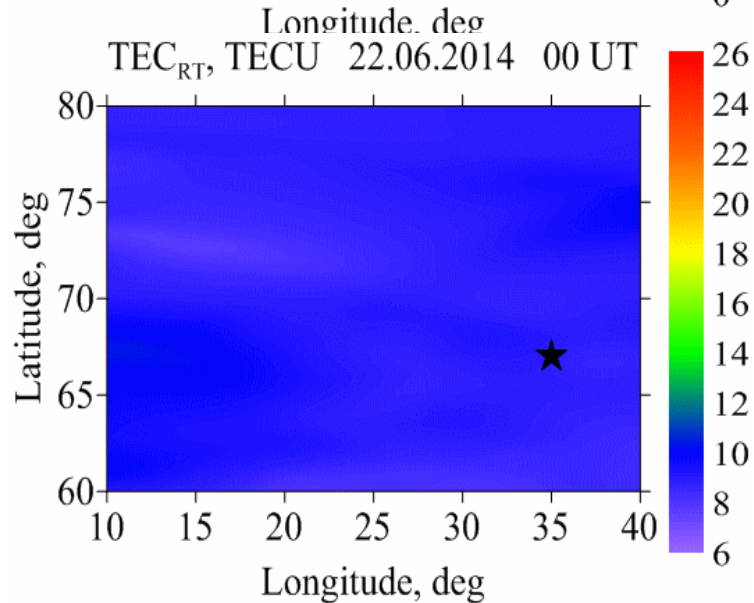
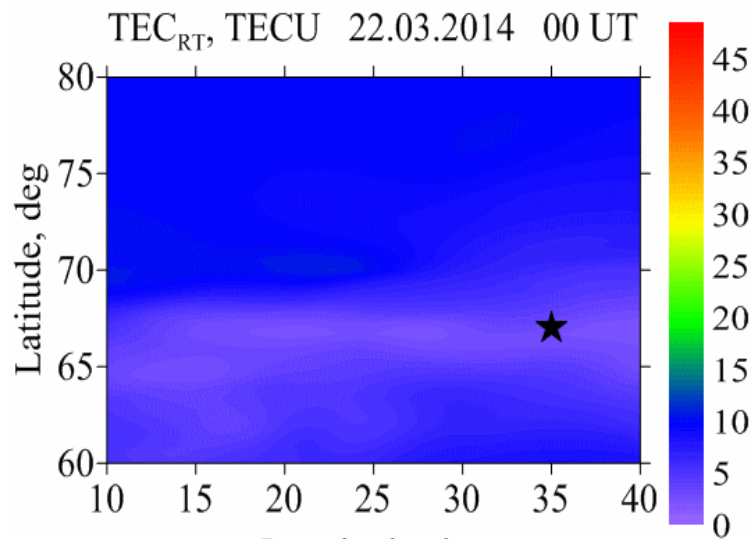
Пространственное распределение эффективности метода коррекции

RMSE_diff, TECU

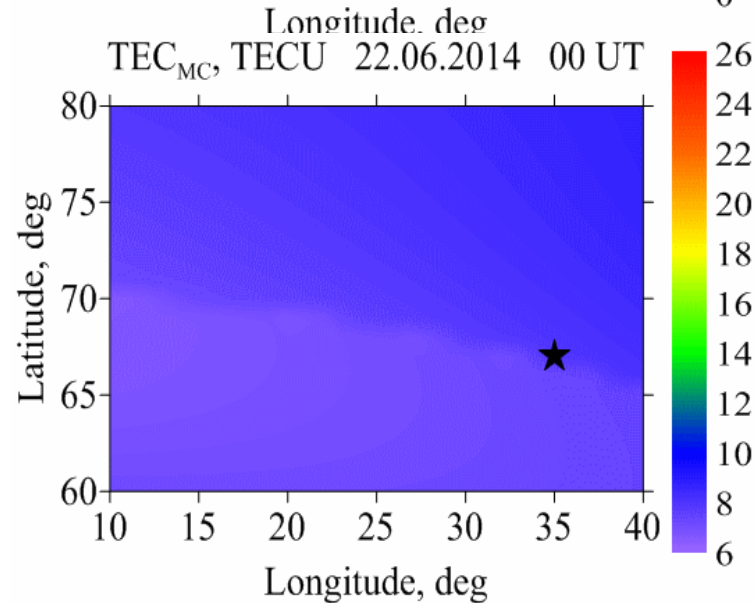
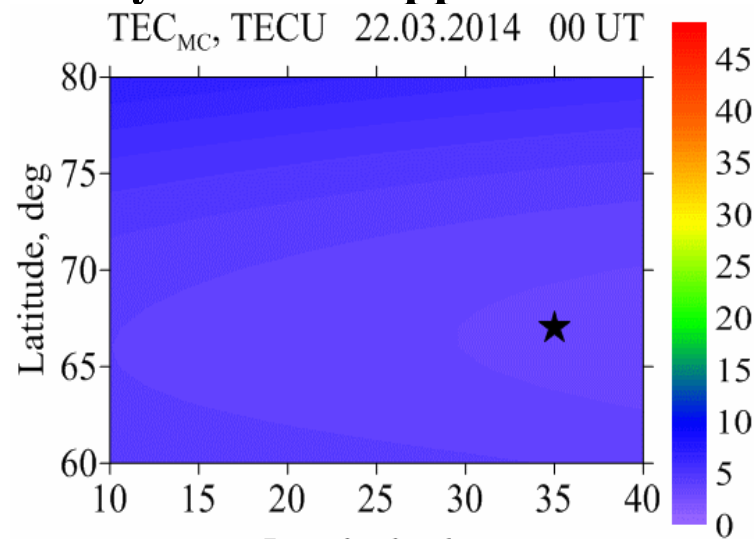


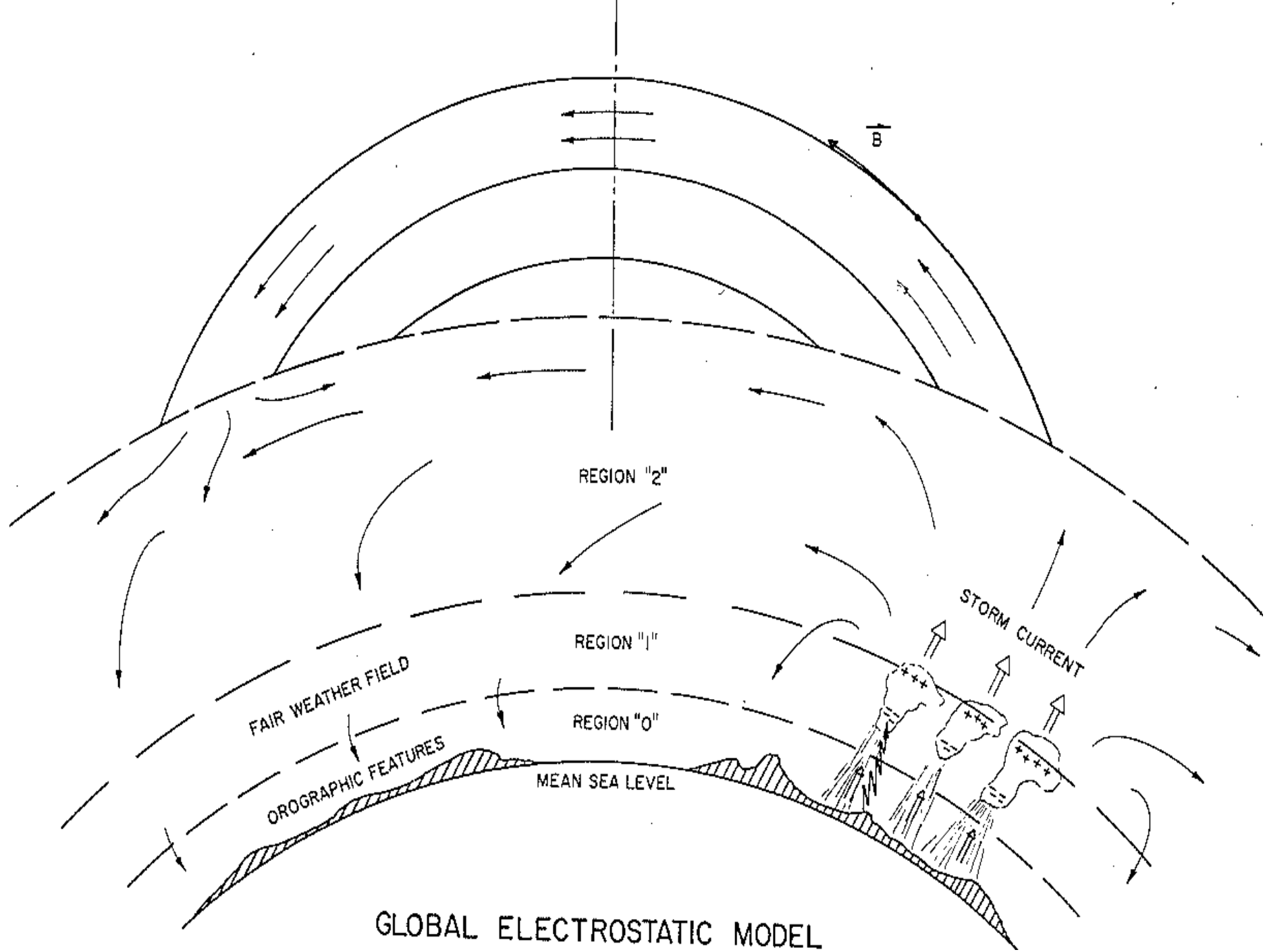
Исследование вопроса работы метода коррекции эмпирических моделей по данным приемников ГНСС сигналов

Высокоорбитальная радиотомография

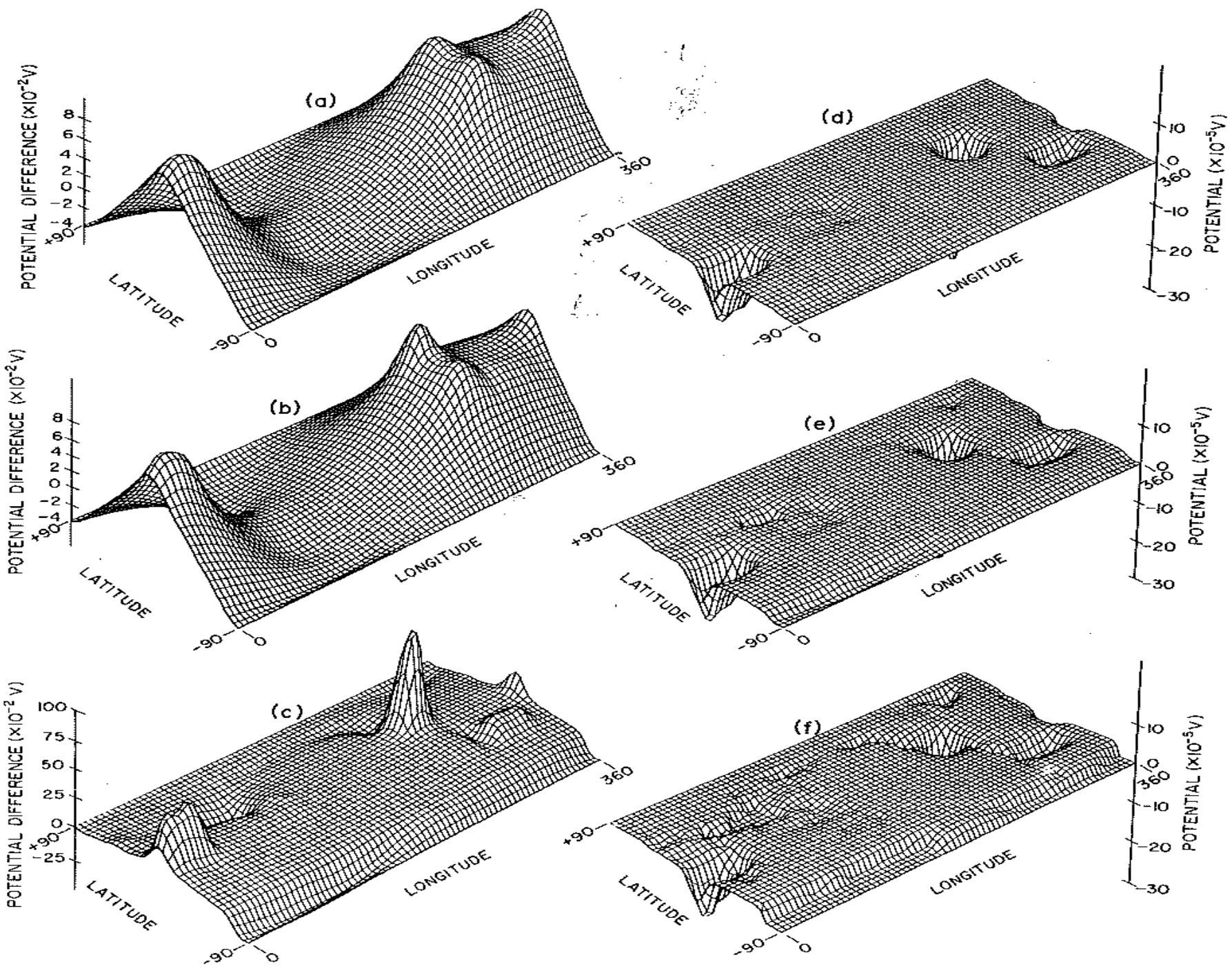


Результаты коррекции

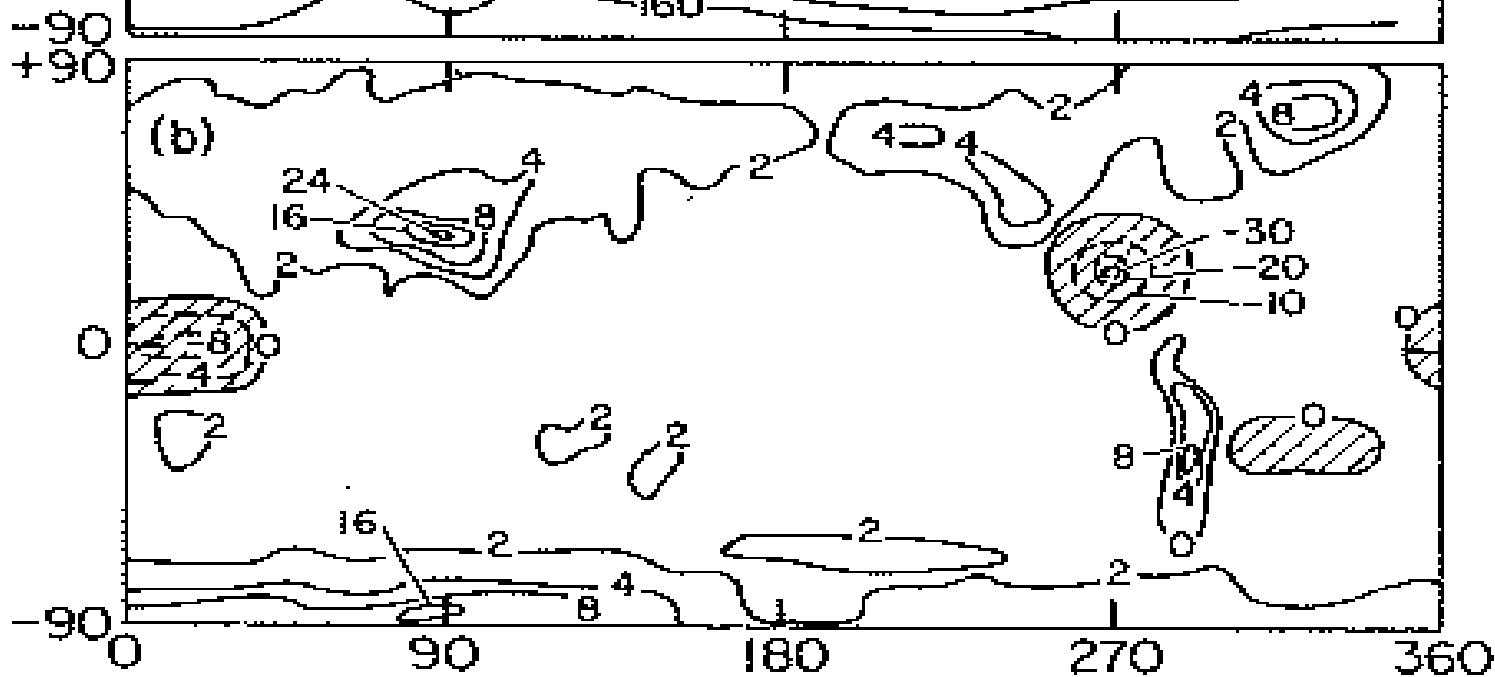
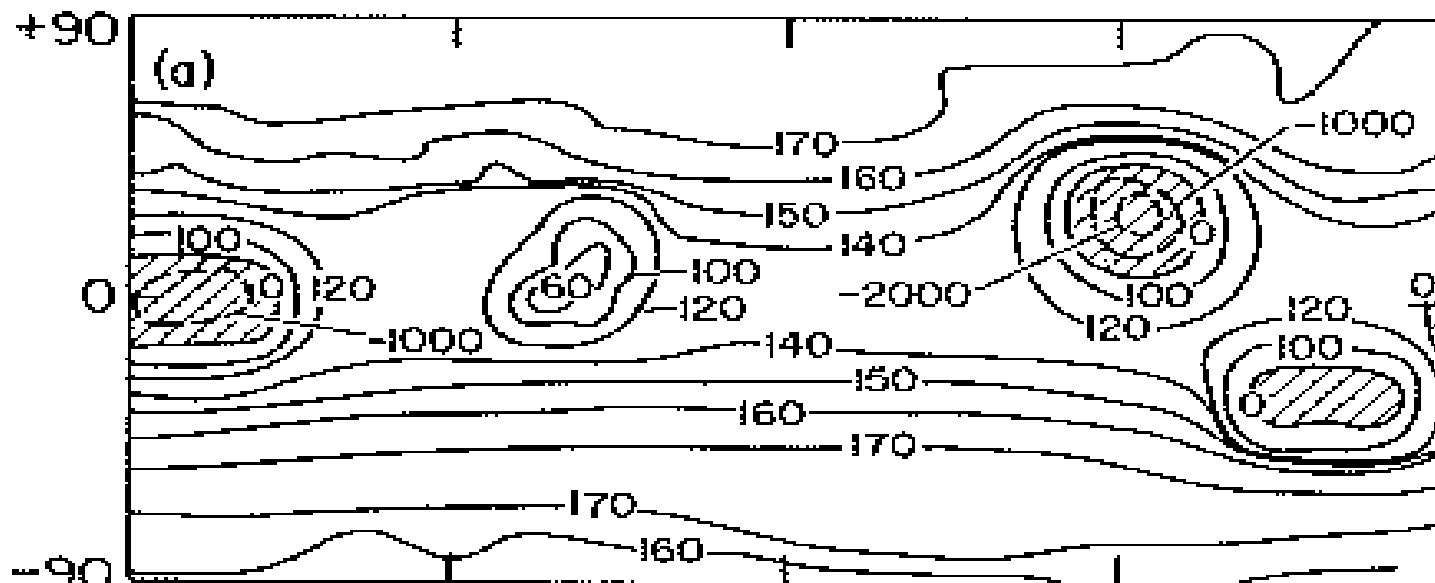




GLOBAL ELECTROSTATIC MODEL

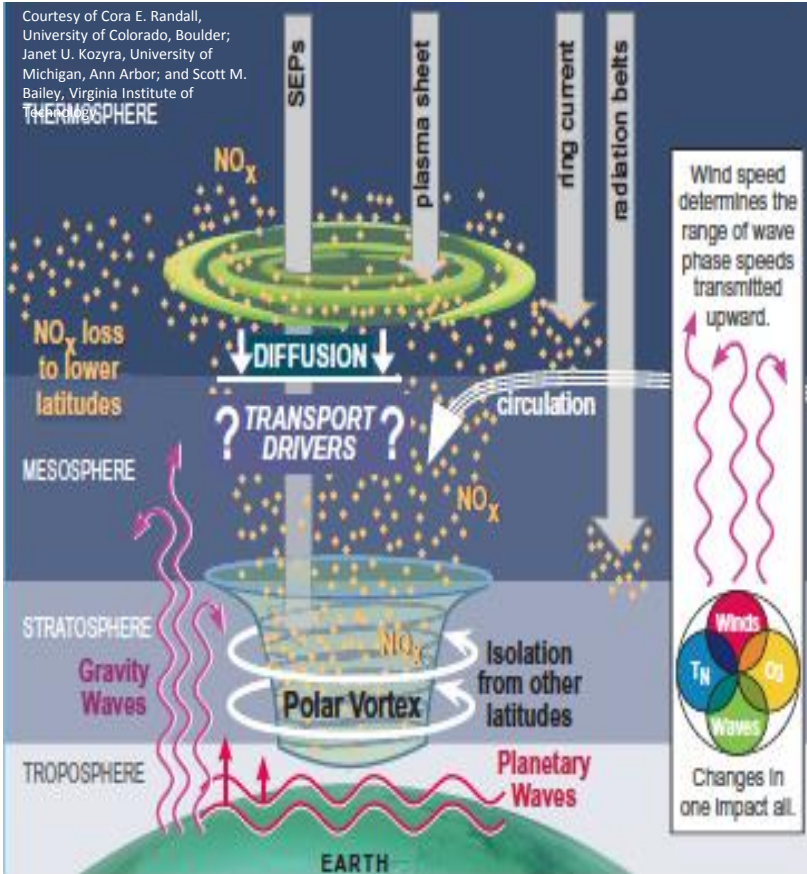


LATITUDE



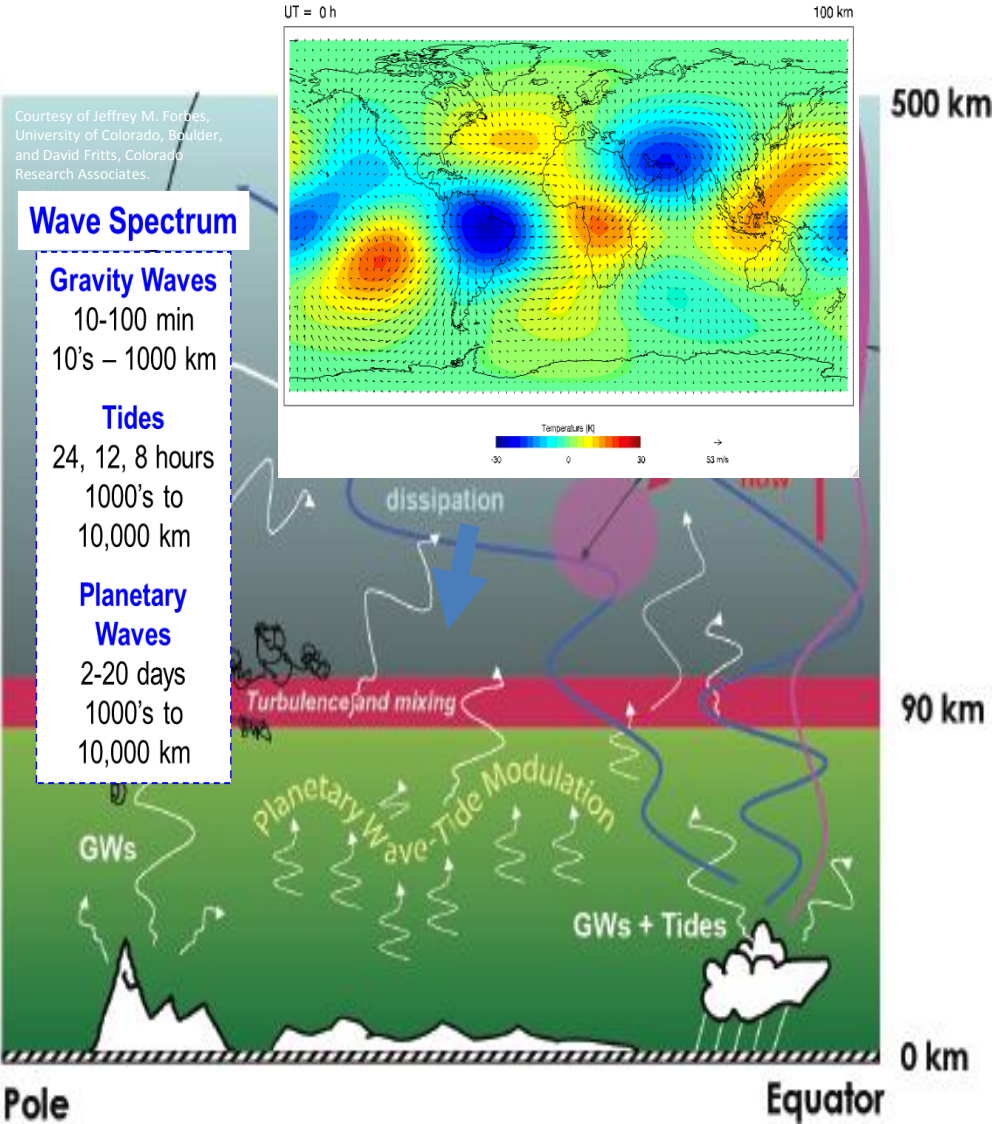
LONGITUDE

Interaction between the “lower/middle atmosphere” and the “upper atmosphere”



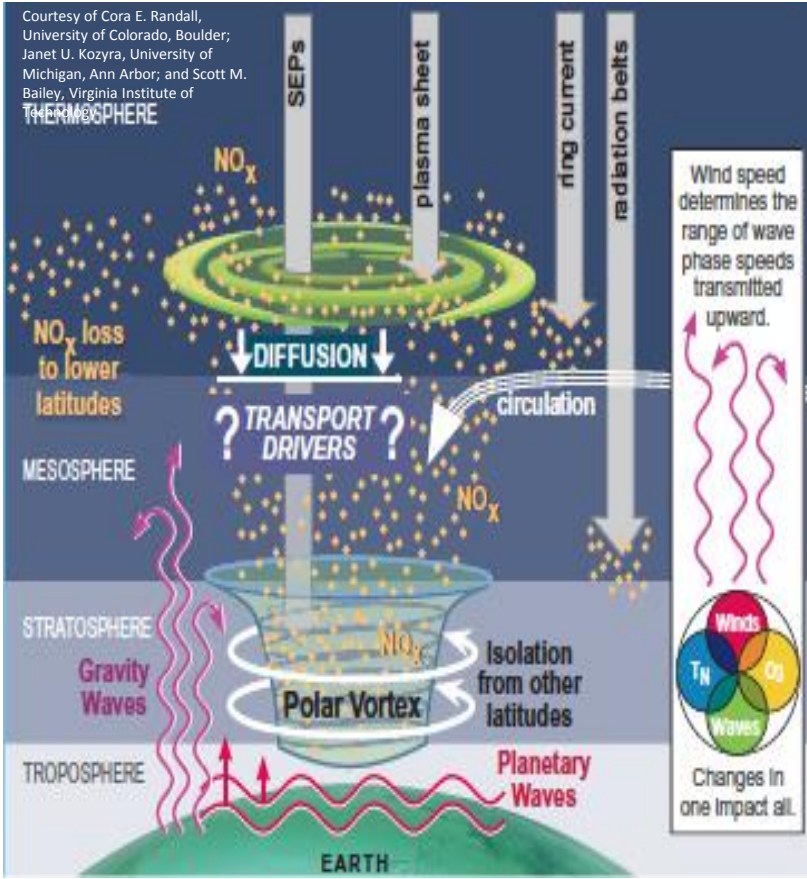
Ozone destruction by NO_x

Lower Atmosphere Thermosphere-Ionosphere

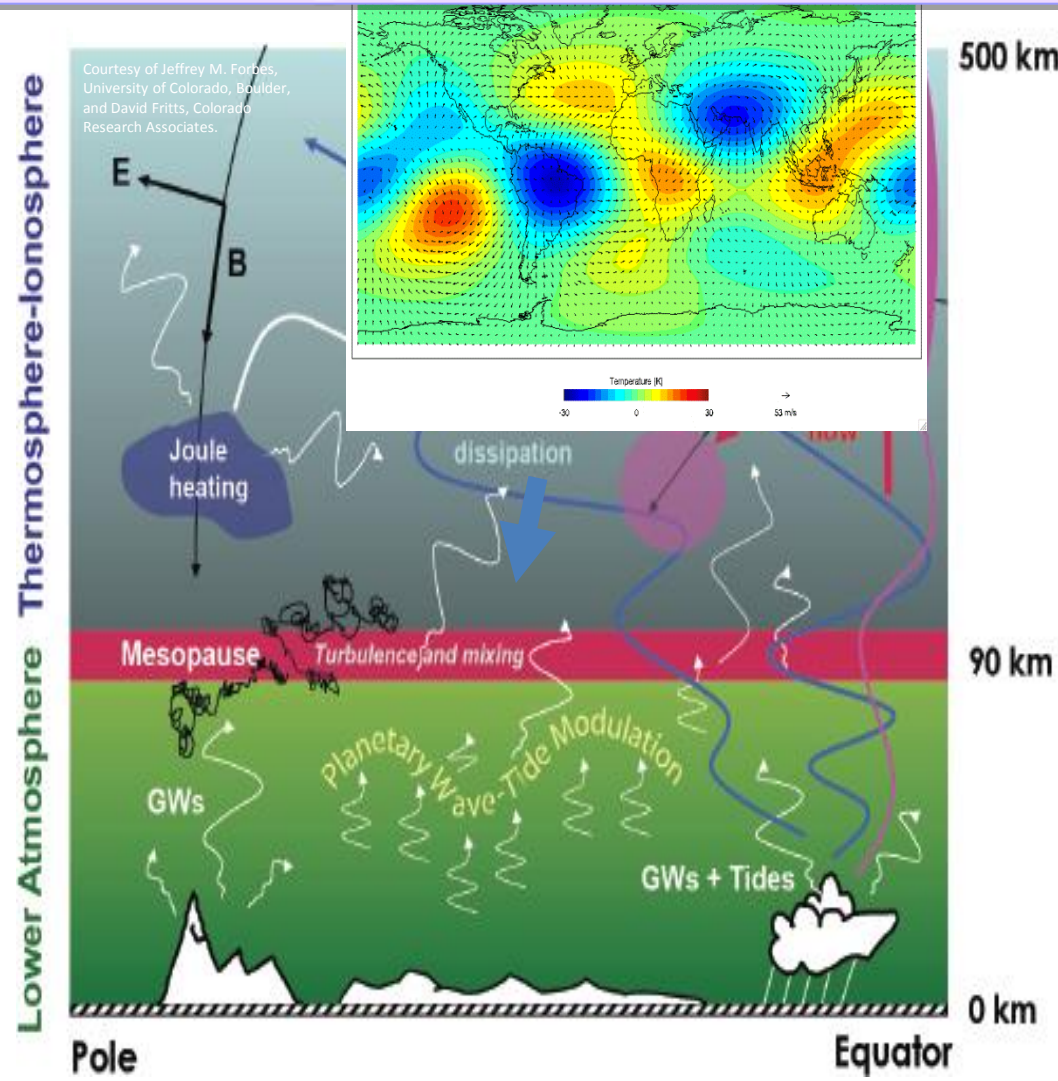


Propagation and dissipation of atmospheric waves

Взаимосвязь процессов в нижней/средней и верхней атмосфере



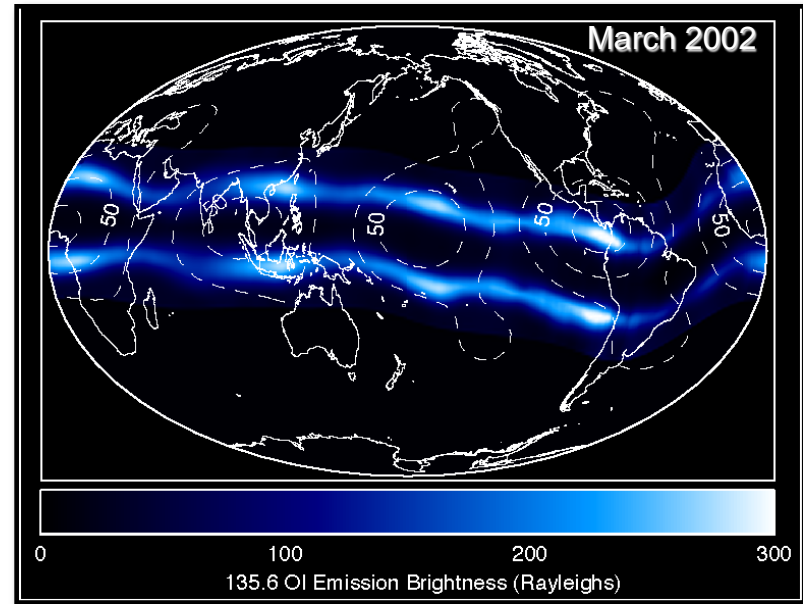
Изменения озона за счет NO_x



Диссипация атмосферных волн

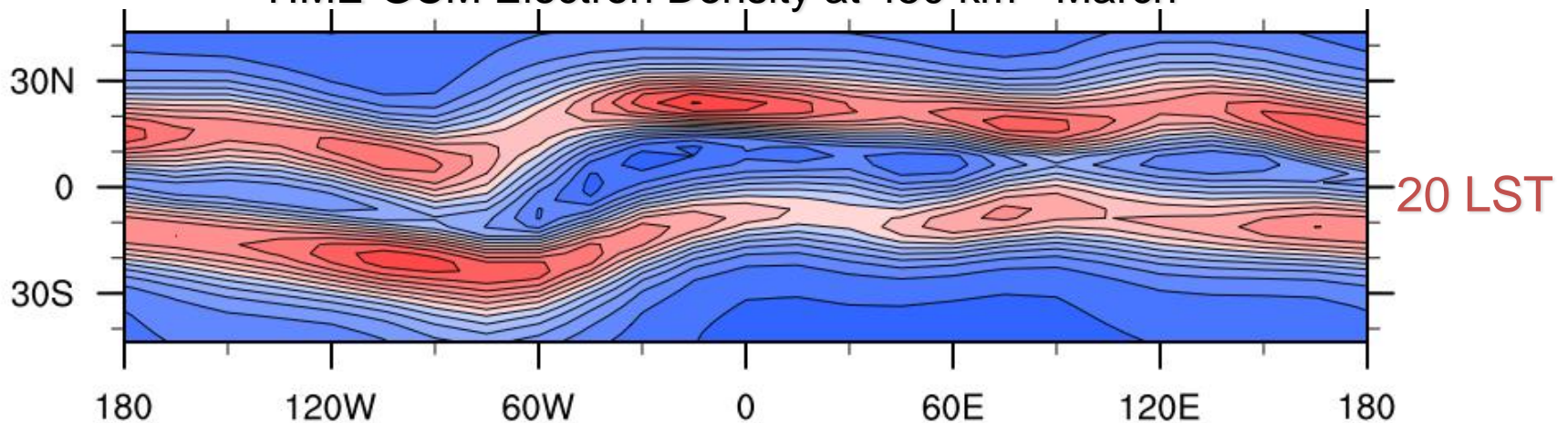
Tropospheric Tidal Effects in the Earth's Ionosphere

IMAGE FUV Ionospheric Emission



after *Immel et al. (2006)*

TIME-GCM Electron Density at 450 km - March



after *Hagan et al. [2007]*

STORM



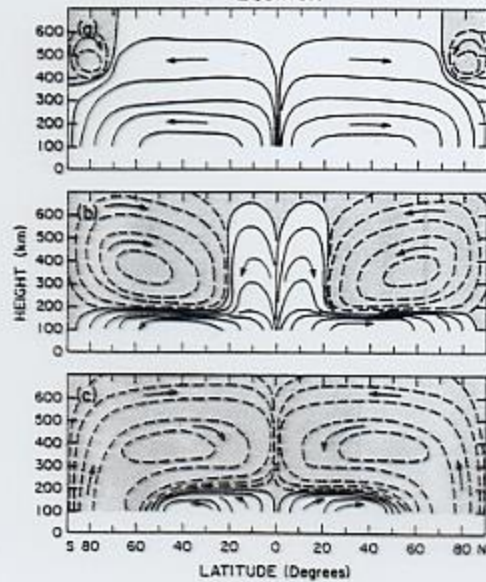
AVERAGE



QUIET

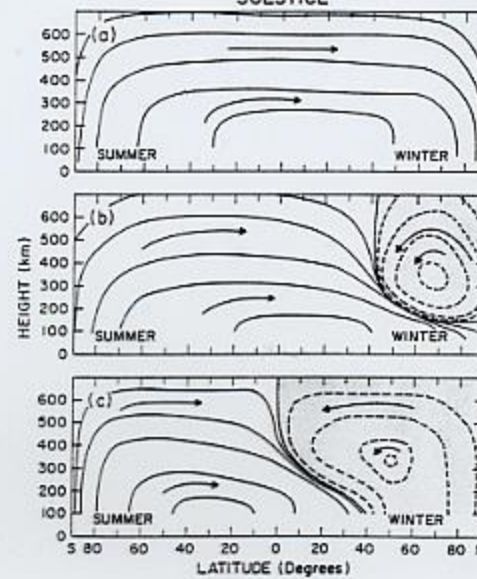


EQUINOX



SOLSTICE

QUIET



AVERAGE

STORM

Время жизни и время переноса частиц

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = q_e - l_e - \nabla \cdot n_e \vec{V}_e$$

Основной закон: скорость изменения концентрации плазмы = ионизация минус рекомбинация минус (плюс) дрейф

Проанализируем потери плазмы – два последних члена в правой части.

Введём время переноса (диффузии) t_D :

$$t_D \sim \frac{L^2}{(2\pi)^2 D(z)}.$$

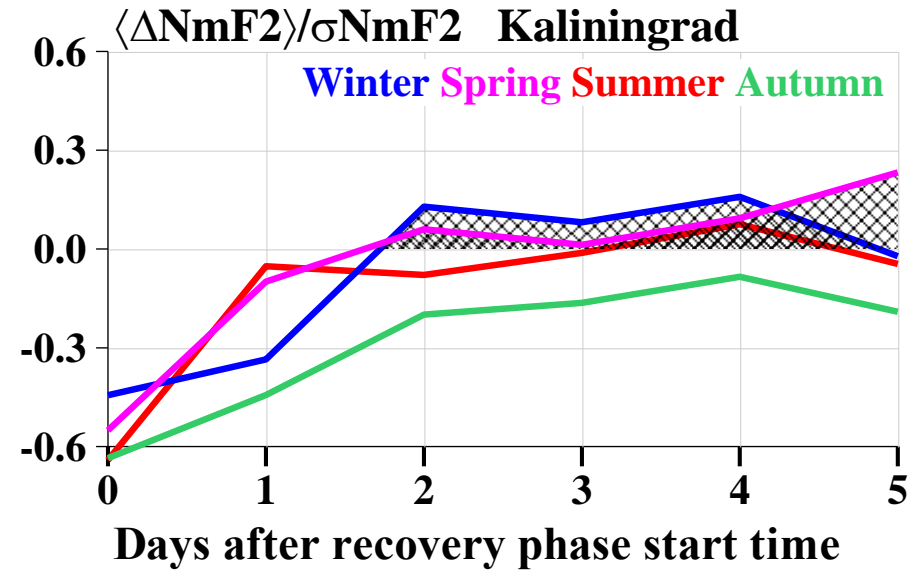
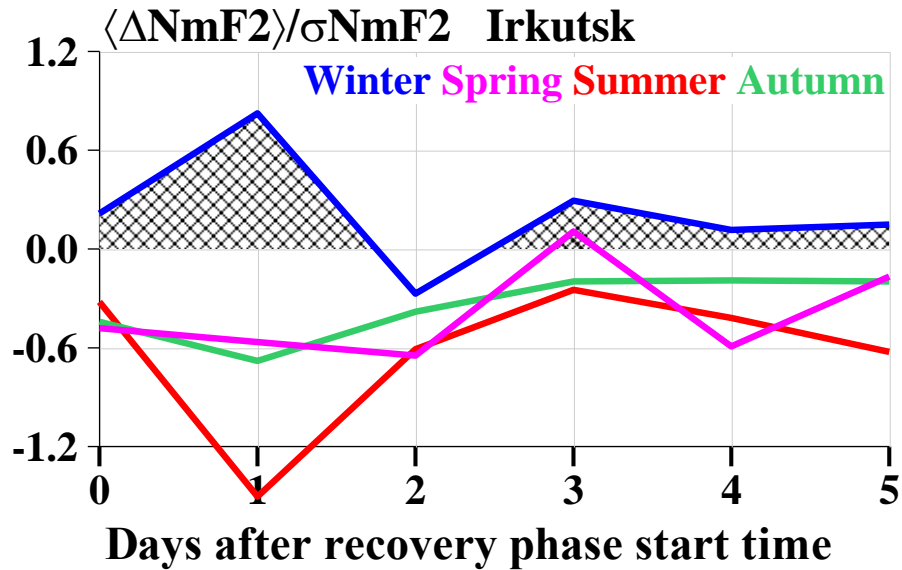
Здесь $L \sim 100$ км – вертикальный масштаб ионосферы.

Время жизни t_l : $\left| \frac{\partial n_e}{\partial t} \right| \equiv \frac{n_e}{t_l} = l$, где l – темп рекомбинации (вычисляется далее)

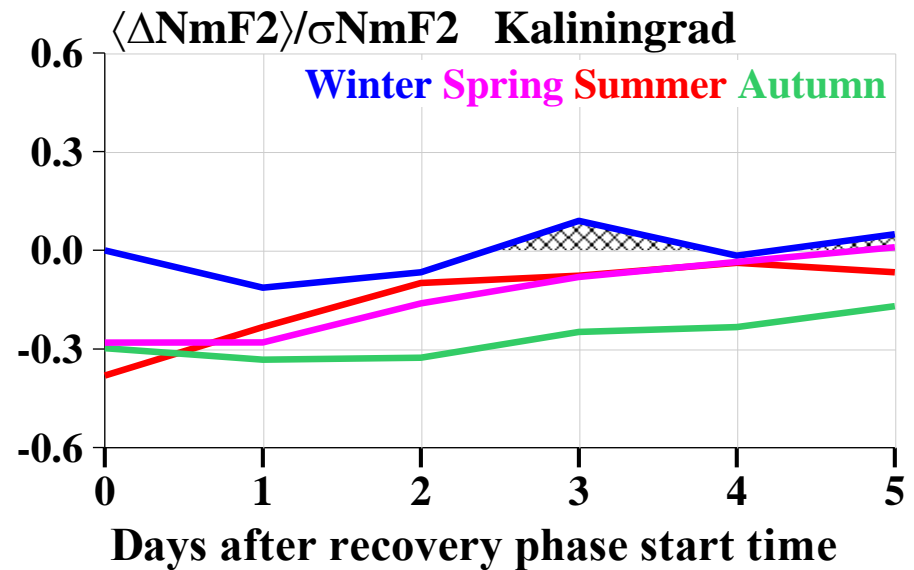
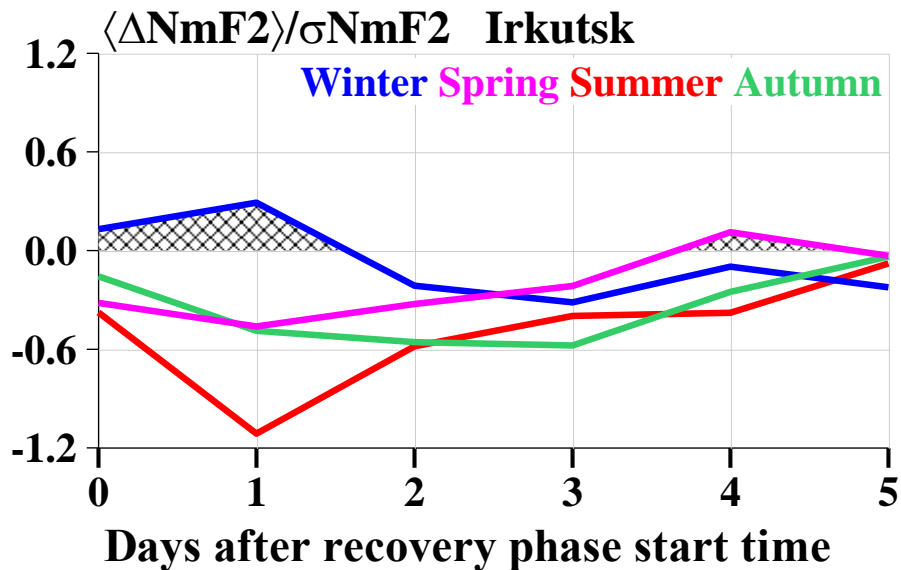
Высота	Время жизни t_l (по Брюнелли-Намгаладзе)	Время переноса t_D (по Леонтьеву)
100 км	1 мин (день) – 1 час (ночь)	20 месяцев
200 км	10 мин	4 час
300 км	1-10 час	15 мин
400 км	10 час	2 мин

Сильные и слабые бури

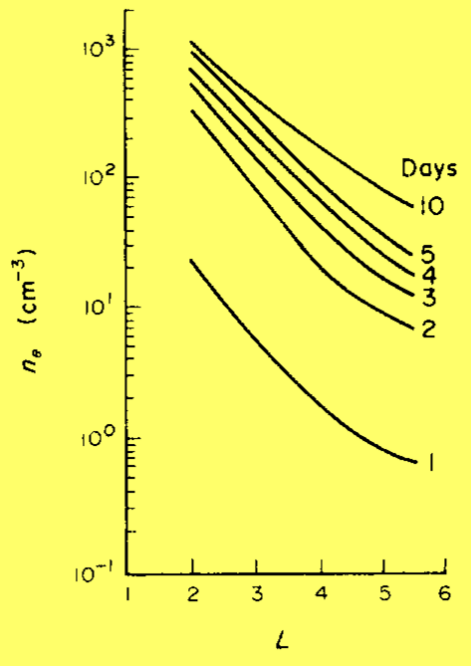
Strong storms Dst < -100 nT



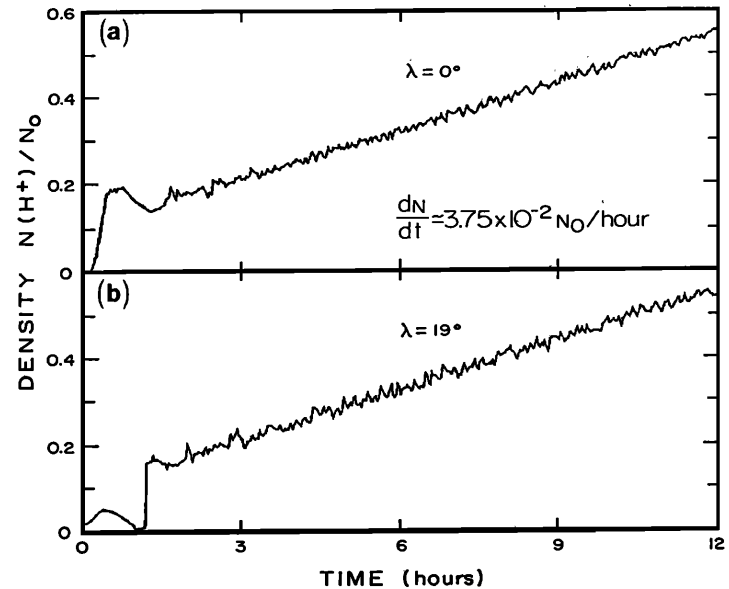
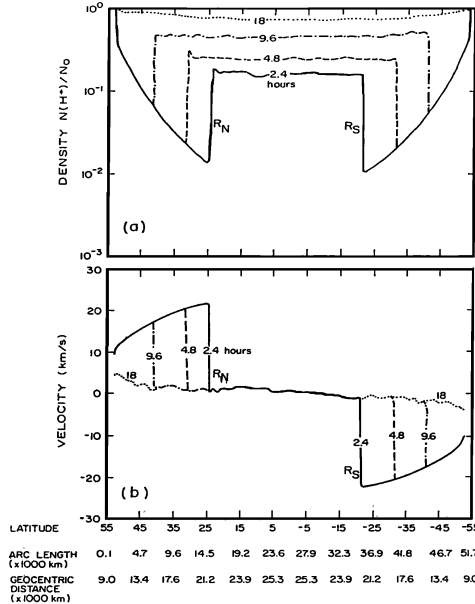
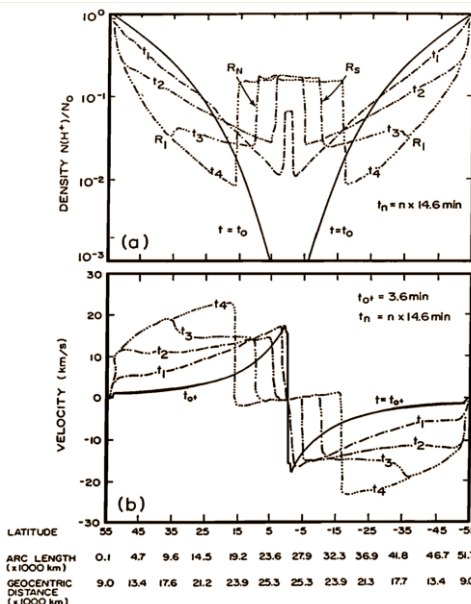
Weak storms Dst > -100 nT



История гидродинамических моделей ионосферы



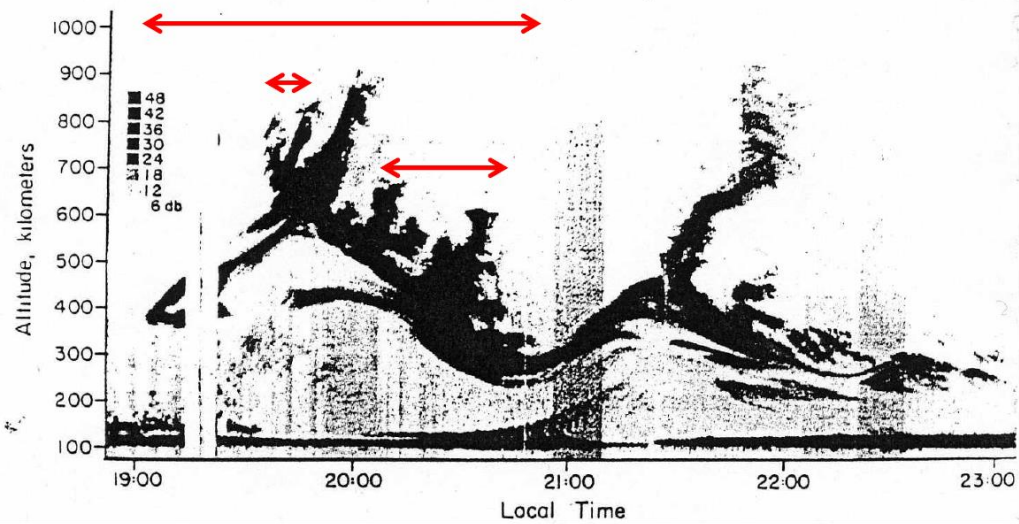
Khazanov G.V., M.A. Koen, Yu. V., Konikov, and I.M. Sidorov, Simulation of ionosphere-plasmasphere coupling taking into account ion inertia and temperature anisotropy, Planet. Space. Sci., 32, 585-598, 1984.



Singh, N., R.W. Schunk and H. Thiemann, Temporal features of the refilling of a plasmaspheric flux tube, J. Geophys. Res., 91, 13433-13454, 1986.

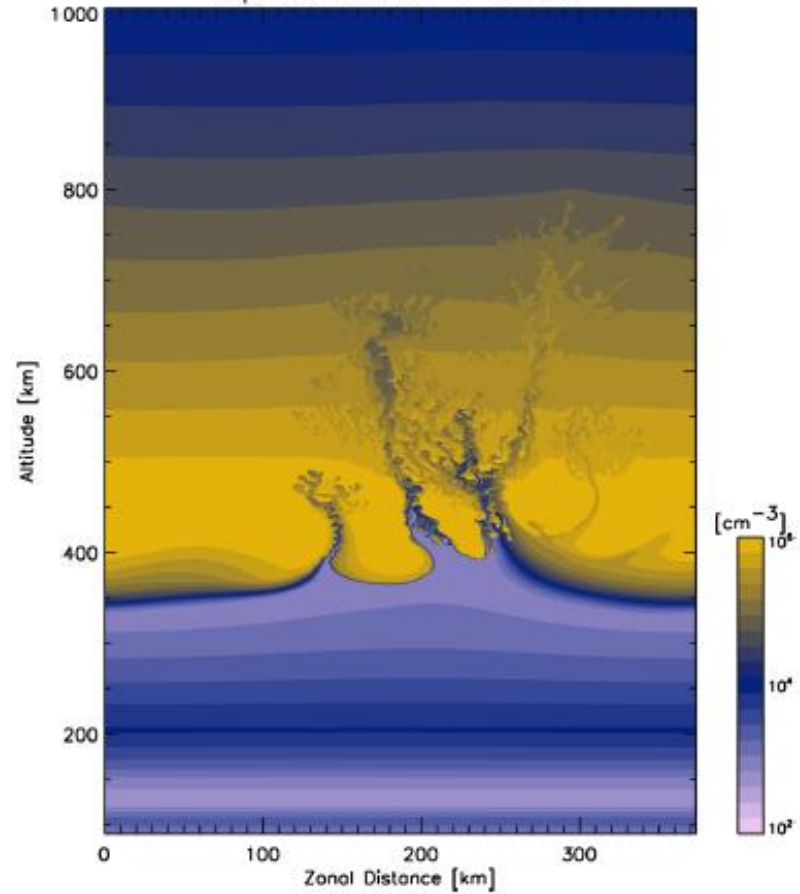
Jicamarca 50MHz Radar Observation

Jicamarca Vertical Backscatter at 3 meters
March 21, 1979



Kelley et al. (1981)

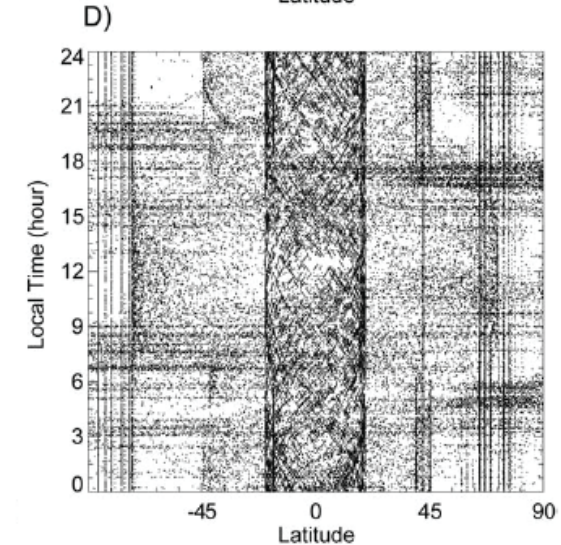
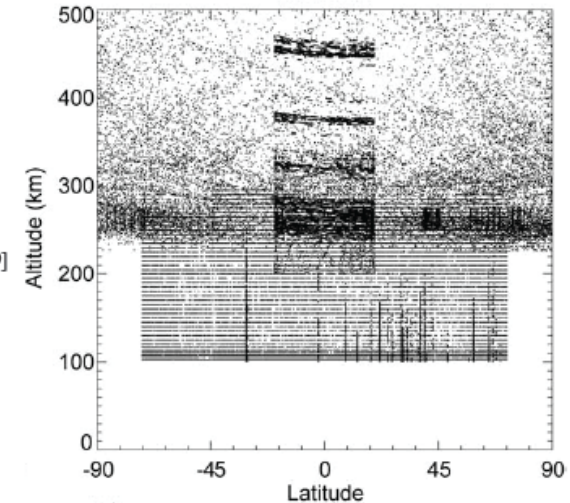
Equatorial Plane: T = 3600 s



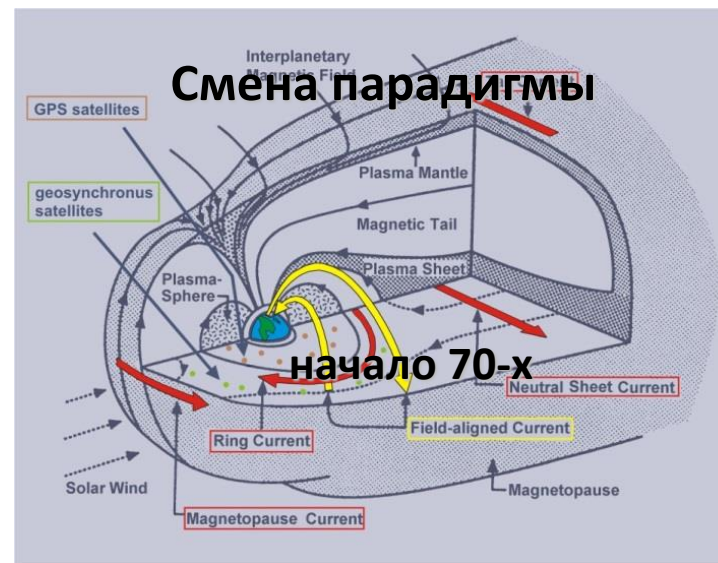
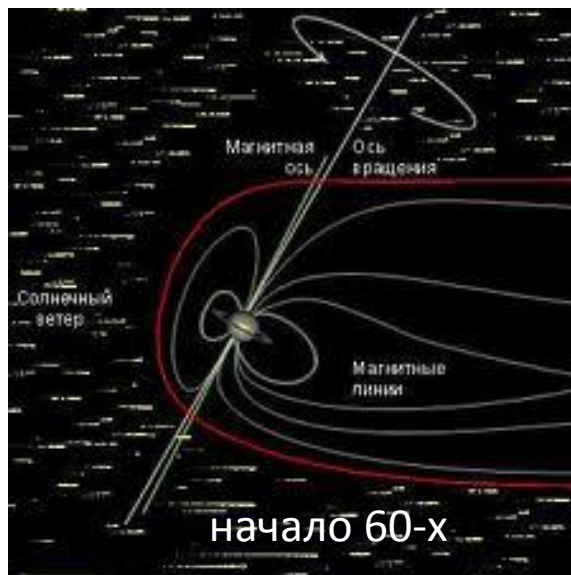
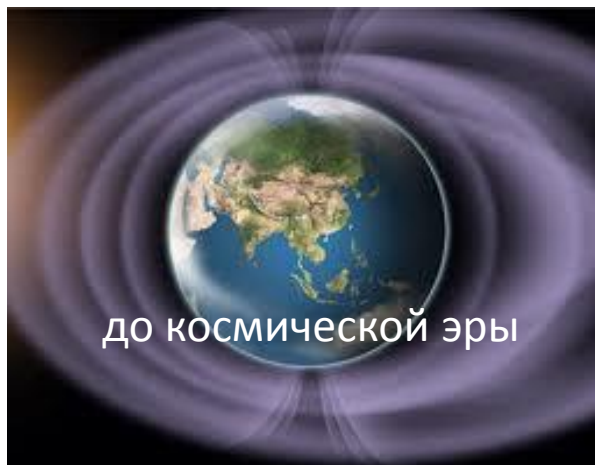
Данные для построения модели HWM

Instrument	Location	Height (km)	Years	Local Time	Days	Data Points	Reference
<i>Satellite</i>							
AE-E NATE ^a	±18.0°N	220–400	1975–1979	both	799	200,500	<i>Spencer et al. [1973]</i>
DE 2 WATS ^b	±89.0°N	200–600	1981–1983	both	536	391,500	<i>Spencer et al. [1981]</i>
DE 2 FPI ^c	±89.0°N	250	1981–1983	both	308	47,600	<i>Hays et al. [1981]</i>
UARS HRDI	±72.0°N	50–115	1993–1994	day	834	30,100,000	<i>Hays et al. [1993]</i>
UARS WINDII 5577 Å	±72.0°N	90–300	1991–1996	day	949	24,672,000	<i>Shepherd et al. [1993]</i>
UARS WINDII 6300 Å	±42.0°N	200–300	1991–1996	night	243	2,237,942	<i>Shepherd et al. [1993]</i>
<i>Sounding Rocket</i>							
Falling Sphere	8°S–60°N	8–98	1969–1991	both	1,186	96,205	<i>Schmidlin et al. [1985]</i>
Rocketsonde	38°S–77°N	2–90	1969–1991	both	5,082	843,000	<i>Schmidlin et al. [1986]</i>
TMA	31°S–70°N	59–277	1956–1998	both	276	92,792	<i>Larsen [2002]</i>
<i>Fabry-Perot Interferometer</i>							
Arecibo	18.4°N, 66.8°W	250	1980–1999	night	473	14,198	<i>Burnside and Tepley [1989]</i>
Arequipa	16.2°S, 71.4°W	250	1983–2001	night	1048	32,238	<i>Meriwether et al. [1986]</i>
Arrival Heights	77.8°S, 116.7°E	250	2002–2005	night	535	54,214	<i>Hernandez et al. [1991]</i>
Halley Bay	75.5°S, 26.6°W	250	1988–1998	night	799	82,614	<i>Crickmore et al. [1991]</i>
Millstone Hill	42.6°N, 71.5°W	250	1989–2002	night	1,770	68,333	<i>Sipler et al. [1982]</i>
Mount John	44.0°S, 170.4°E	89, 96, 250	1991–1996	night	560	2,660	<i>Hernandez et al. [1991]</i>
Søndrestrom	67.0°N, 51.0°W	250	1984–2004	night	1,223	69,734	<i>Killeen et al. [1995]</i>
South Pole ^d	90.0°S	86, 250	1989–1999	night	1,091	163,044	<i>Hernandez et al. [1991]</i>
Svalbard ^e	78.2°N, 15.6°E	250	1980–1983	night	44	7,472	<i>Smith and Sweeny [1980]</i>
Thule	76.5°N, 68.4°W	250	1987–1989	night	172	21,500	<i>Killeen et al. [1995]</i>
Resolute Bay	74.7°N, 94.9°E	250	2003–2005	night	166	5,299	<i>Wu et al. [2004]</i>
Watson Lake	60.1°N, 128.6°W	250	1991–1992	night	135	28,000	<i>Niciejewski et al. [1996]</i>
<i>Incoherent Scatter Radar^g</i>							
Arecibo	18.3°N, 66.8°W	100–170	1974–1987	day	149	30,600	<i>Harper [1977]</i>
Chatanika	65.1°N, 147.4°W	90–130	1976–1982	day	97	38,721	<i>Johnson et al. [1987]</i>
European Incoherent Scatter	69.6°N, 19.2°E	100–120	1985–1987	day	29	2,900	<i>Williams and Virdi [1989]</i>
Millstone Hill	42.6°N, 71.5°W	120–400	1983–1987	both	142	23,536	<i>Salah and Holt [1974]</i>
Søndrestrom	67.0°N, 50.9°W	150–400	1983–1987	both	146	19,600	<i>Wickwar et al. [1984]</i>
St. Santin ^f	44.6°N, 2.2°E	90–165	1973–1985	day	256	18,382	<i>Amayenc [1974]</i>
<i>Medium-Frequency Radar^g</i>							
Adelaide	34.5°S, 138.5°E	60–98	2001–2004	both	834	481,634	<i>Vincent and Lesicar, 1991</i>
Bribe Island	28.0°S, 153.0°W	60–98	1995	both	280	184,176	<i>Reid [1987]</i>
Davis	68.6°S, 78.0°E	50–100	2001–2004	both	730	526,160	<i>Vincent and Lesicar [1991]</i>
Poker Flat	65.1°N, 147.5°W	44–108	1979–1985	both	1857	2,746,684	<i>Murayama et al. [2000]</i>
Wakkanai	45.4°N, 141.8°E	50–108	1998–2003	both	1538	1,874,672	<i>Murayama et al. [2000]</i>
Yamagawa	31.2°N, 130.6°E	60–98	1998–2003	both	1593	1,040,042	<i>Murayama et al. [2000]</i>
<i>Wind and Temperature Lidar</i>							
Fort Collins	40.6°N, 105.1°W	75–115	2002–2002	both	244	93,288	<i>She et al. [2004]</i>
<i>Numerical Weather Prediction Analysis^h</i>							
NOAA GFS Analysis	Global	0–35	2002–2007	both	1520	–	<i>Kalnay et al. [1990]</i>
NASA GEOS4 Analysis	Global	0–55	2002–2007	both	1520	–	<i>Bloom et al. [2005]</i>

Table 1. HWM07 Observational Database Summary



Результат освоения космического пространства



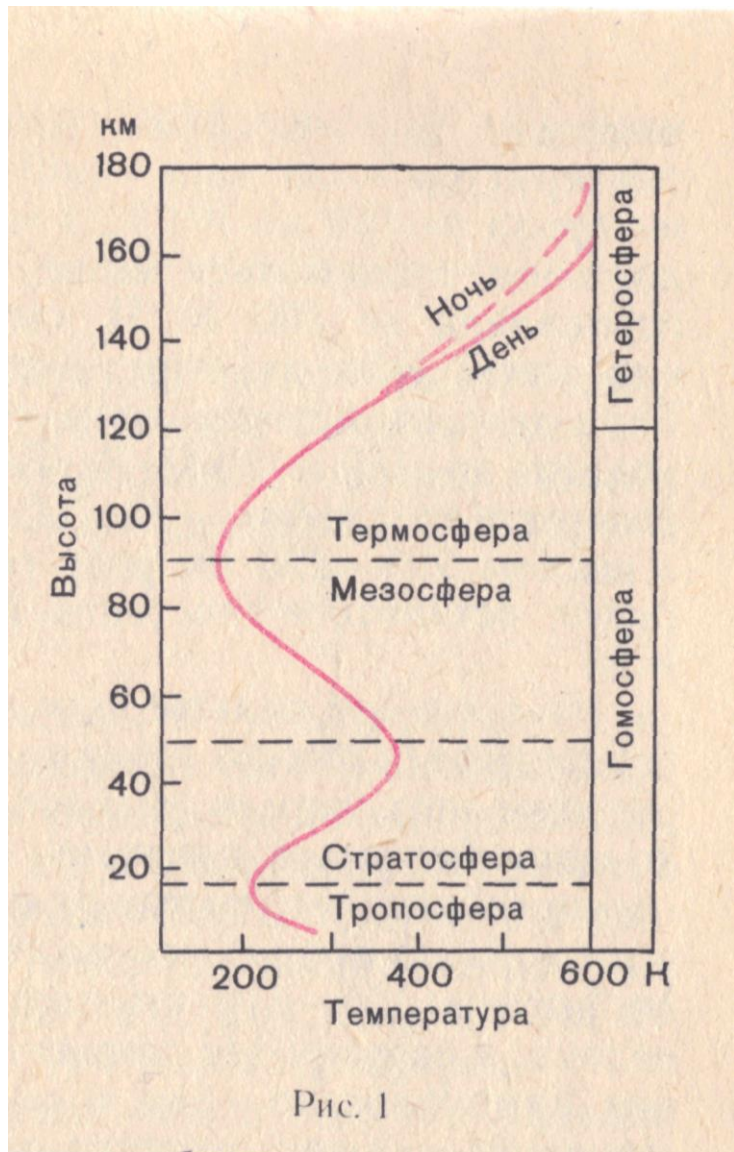
ось времени

Долгое время считали, что сверху ионосфера бесструктурно сливается с межпланетной средой.

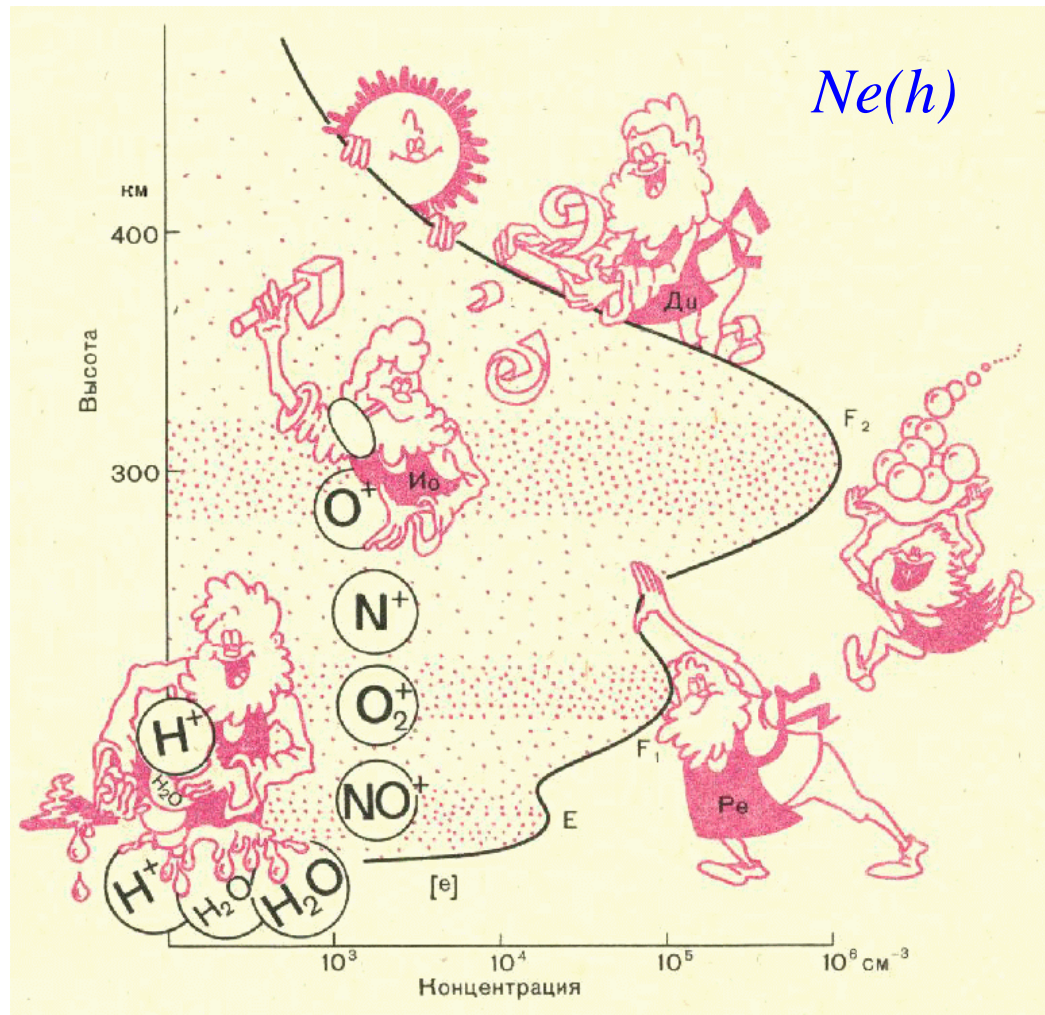
Всё изменилось в космическую эру, когда прямые спутниковые измерения выявили отчётливо различные «космические среды»: ионосферу, магнитосферу и солнечный ветер.

Аналитическое представление среды

Сферы атмосферы



Слой ионосферы и создающие их механизмы

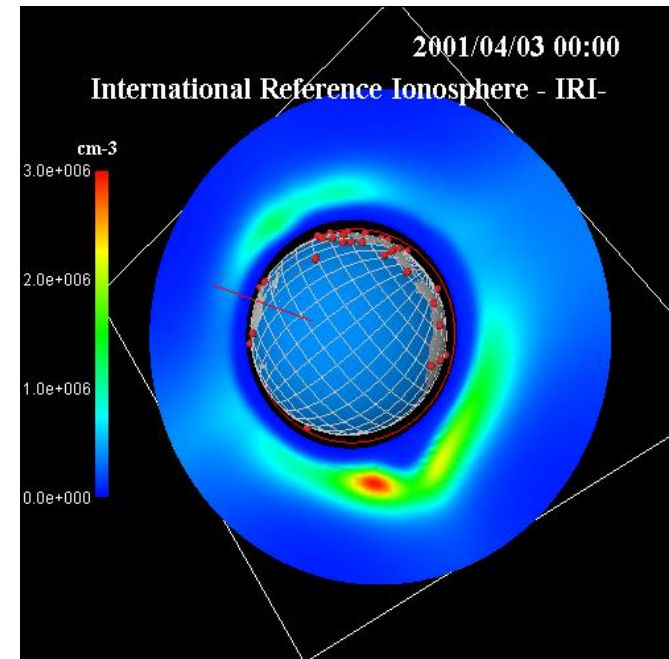


Данилов А.Д. Популярная аэрономия. Ленинград, Гидрометеиздат, с.229, 1980.

International Reference Ionosphere

Monthly averages in the altitude range 50-1500 km:

- + Electron density
- + Electron temperature
- + Ion composition (O^+ , O_2^+ , NO^+ , $Cluster^+$, N^+ , He^+ , H^+)
[charge neutrality: $N_e = \sum n_i$]
- + Ion temperature
- + Ion drift (currently only equatorial vertical F-region drift)
- + spread-F occurrence probability (currently limited to South-American sector)



Model Catalog and Archive:

Atmosphere models [\[info\]](#)

Density and Temperature Models

- Exospheric H Model [\[info, ftp\]](#)
- NRLMSISE-00 Model [\[info, RUN ftp, link\]](#)
- MSISE-90 Model [\[info, ftp, RUN \]](#)
- MSIS-86 Model [\[info, ftp\]](#)
- MET Model [\[info, ftp\]](#)
- CIRA: Thermosphere [\[info\]](#)
- CIRA: 0 km to 120 km [\[info, ftp\]](#)
- OLDER MODELS (pre-1985)

Wind Models

- Horizontal Wind Model (HWM) [\[info, ftp\]](#)

Ionosphere Models [\[info\]](#)

General Models

- Incoherent Scatter Radar Models [\[info\]](#)
- IRI [\[info, ftp, RUN 2016 version\]](#)

Electron Density Models

- PIM Model [\[info\]](#)
- FAIM Model [\[info\]](#)
- SLIM Model [\[info\]](#)
- OLDER MODELS (pre-1985)

F2-Peak Models and Applications

- WBMOD Ionospheric Scintillation Model [\[info, link\]](#)
- URSI foF2 Model Maps [\[info\]](#)
- OLDER MODELS (pre-1985)

Electron Temperature Models

- Hinotori Model [\[info\]](#)
- Intercosmos Model [\[info\]](#)
- OLDER MODELS (pre-1985)

Gravitation/Geopotential Models

- Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) [\[info, link\]](#)

Geomagnetic(Main) Field Models [\[info\]](#)

General Models

- IGRF Model [\[ftp, info, link, RUN\]](#)

Miscellaneous Geomagnetic Field Models

- USGS Model Coefficients for Continental U.S. and Hawaii [\[info\]](#)
- GSFC Model Coefficients: All [\[ftp\]](#), (11/87) [\[info\]](#), (12/83) [\[info\]](#), (9/80) [\[info\]](#), (12/66) [\[info\]](#), (9/65) [\[info\]](#)
- Summary Table
- OLDER MODELS

Magnetospheric Field Models [\[info\]](#)

- Toffoletto-Hill Magnetosphere Model [\[link\]](#)
- Xu-Li Neutral Sheet Model [\[info, ftp\]](#)
- Tsyganenko Magnetic Field Models and GEOPACK routines [\[info, link, url\]](#)
- OLDER MODELS (pre-1979)

Solar and Interplanetary Space Models

Solar Reference Spectra

- Solar2000 Model [\[link\]](#)
- OLDER REFERENCE SPECTRA

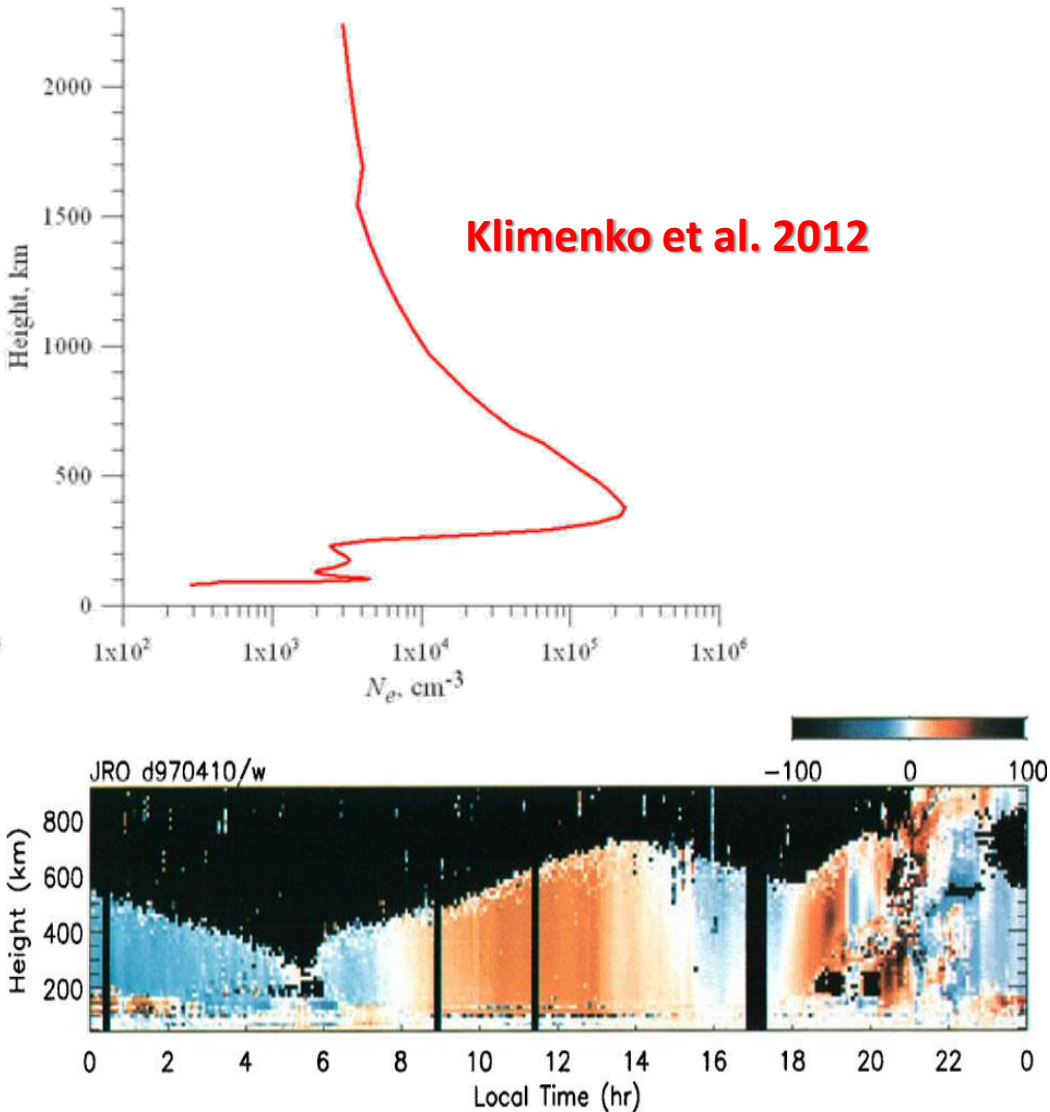
Solar Energetic Particle Models

- Nymmik Solar Energetic Particles Model [\[link\]](#)
- JPL Proton Model [\[info\]](#)
- SOLPRO Model [\[info, ftp\]](#)

Cosmic Rays and Related Software

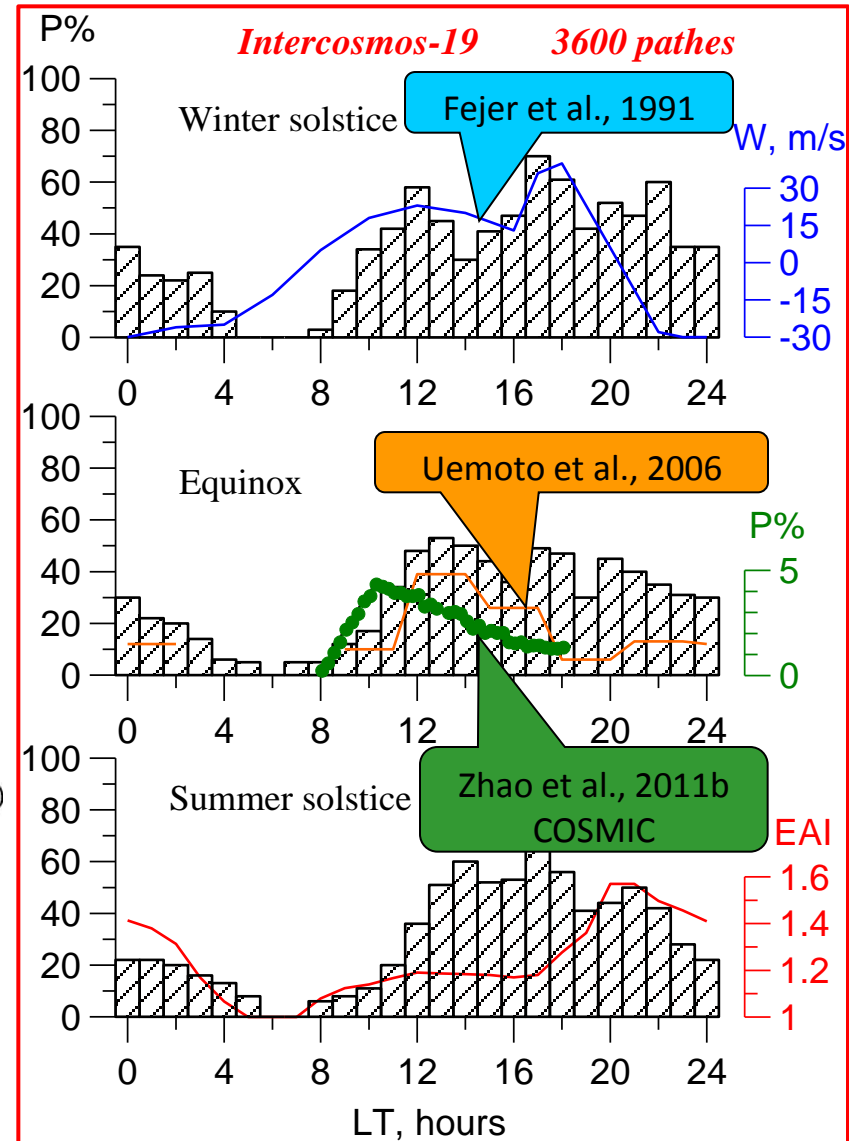
- Geomagnetic Cutoff Rigidity [\[info, ftp\]](#)

F3 слой в послезаходные часы



Klimenko et al. 2012

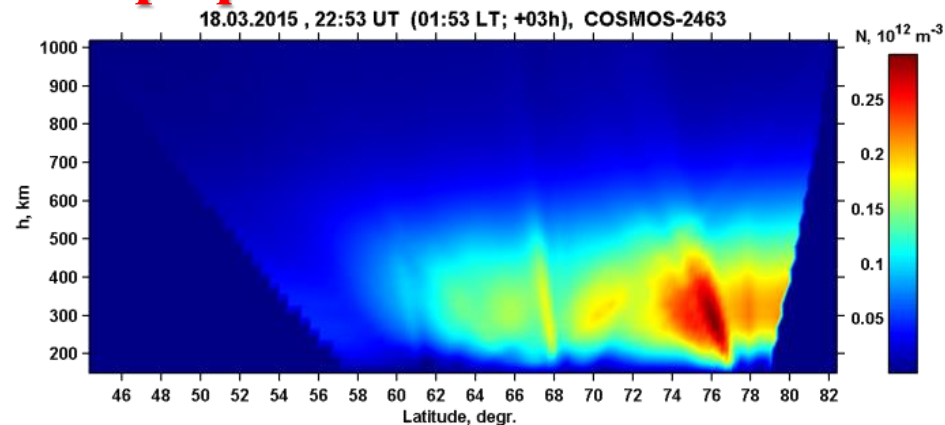
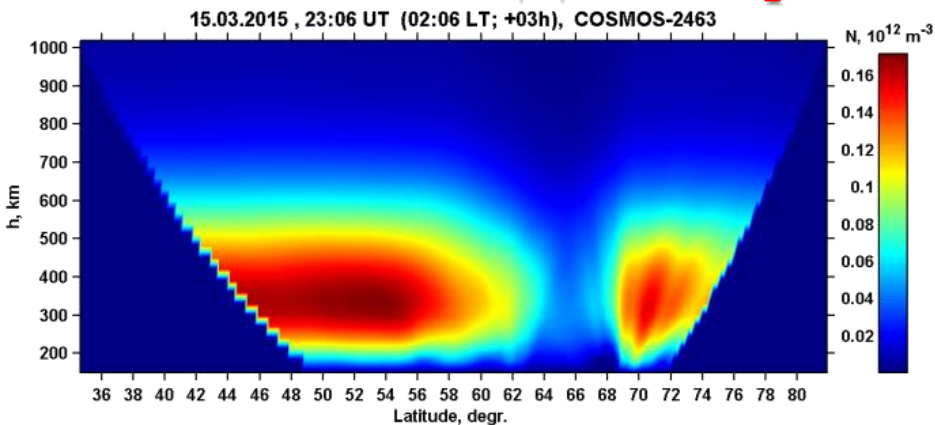
Kudeki et al. 1999



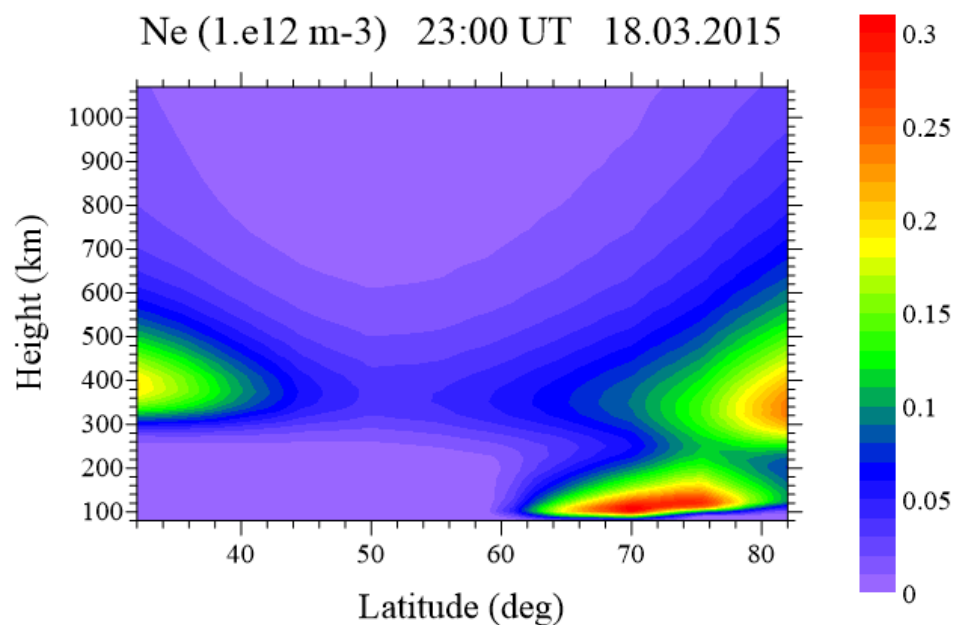
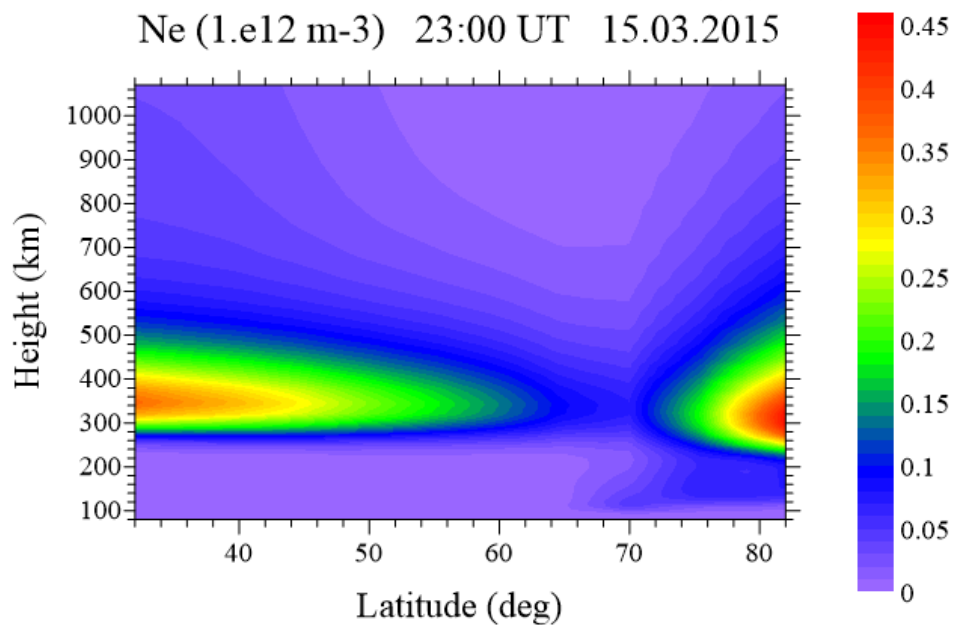
Karpachev et al. 2013

Главный ионосферный провал во время бури

Данные радиотомографии



Модель ГСМ ТИП

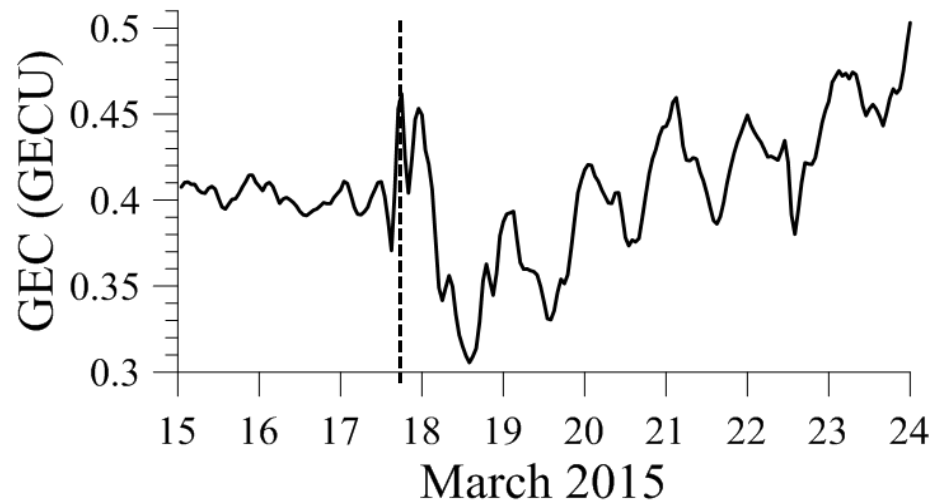
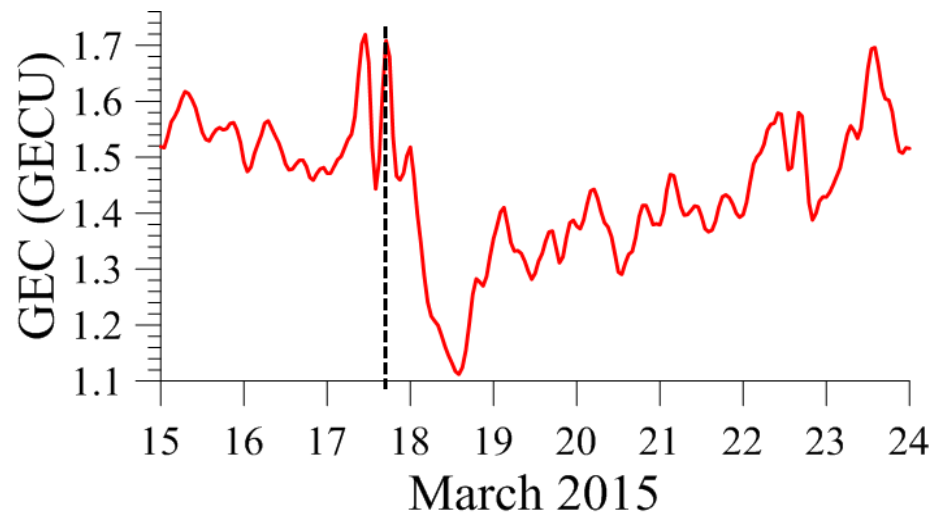


Эффекты бурь в ГЭС: модель/наблюдения

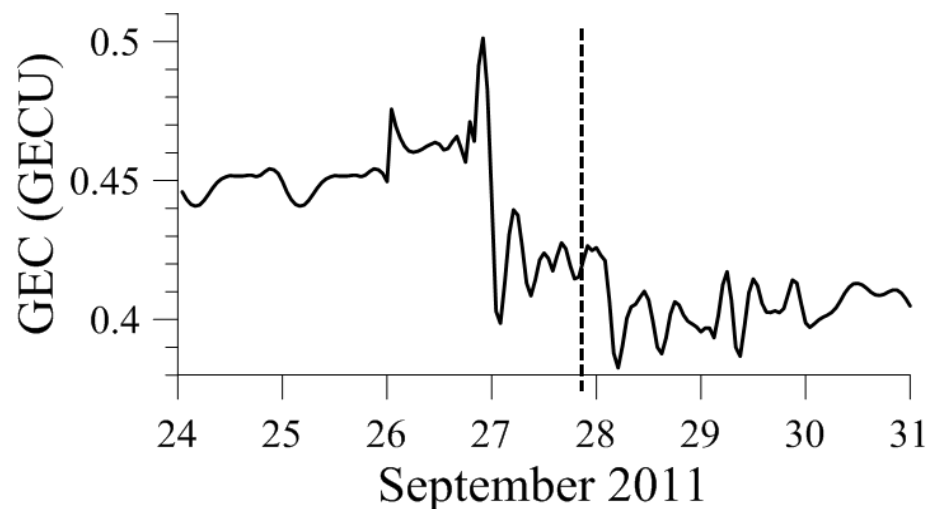
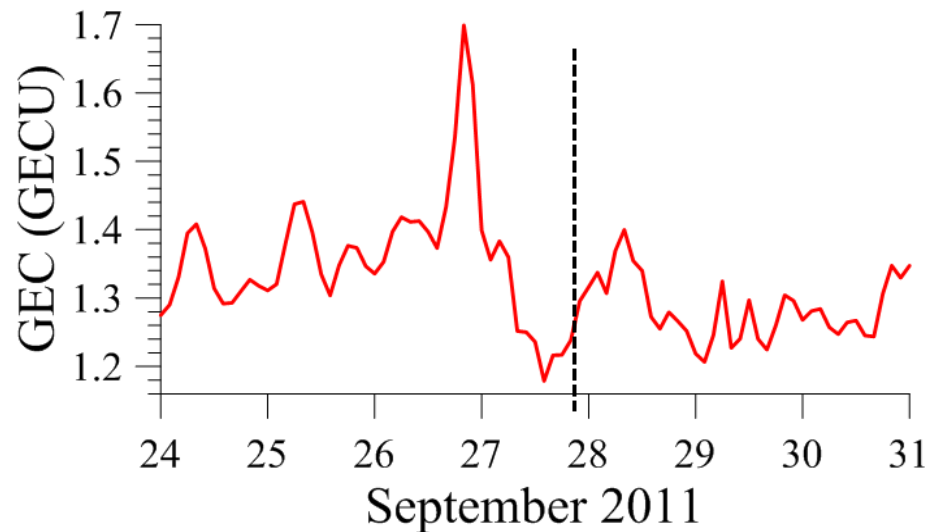
ГНСС ПЭС

St. Patrick 2015

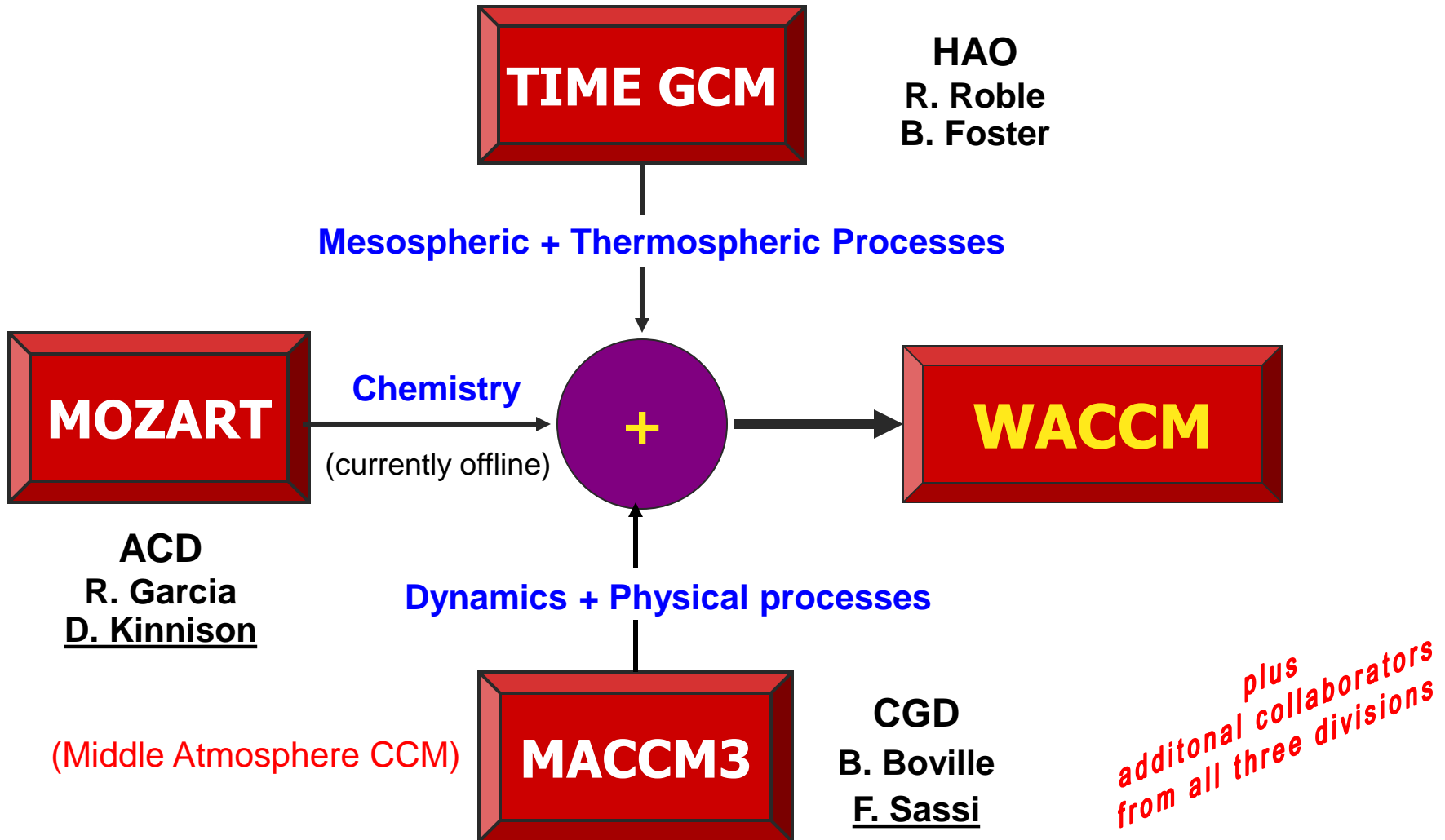
ГСМ ТИП



Буря в сентябре 2011 года

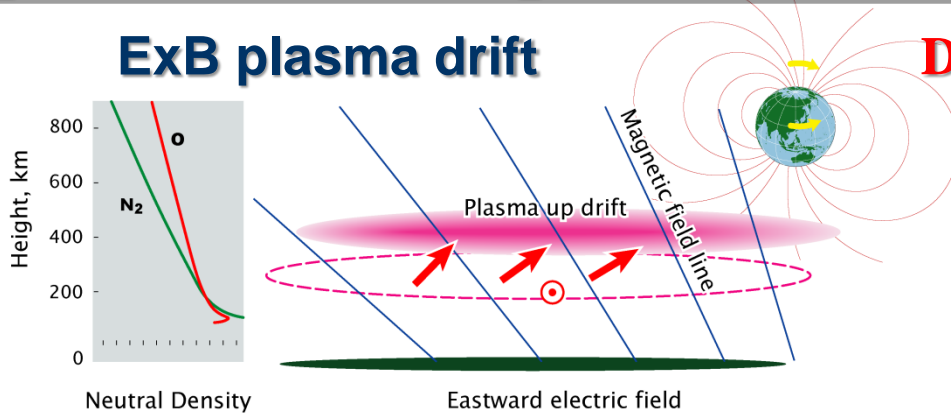


WACCM Components: A collaboration among 3 NCAR Divisions



Механизмы положительной ионосферной бури: развитие во время главной фазы

1 stage
First 1-2
hrs of
storm
beginning

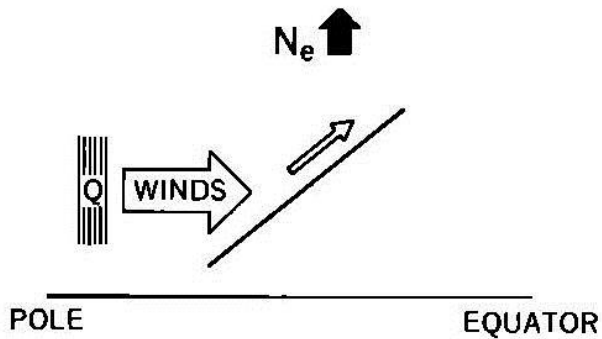


Dmitriev et al., 2017 JGR

Mayr et al., 1978

Review of Geophysics

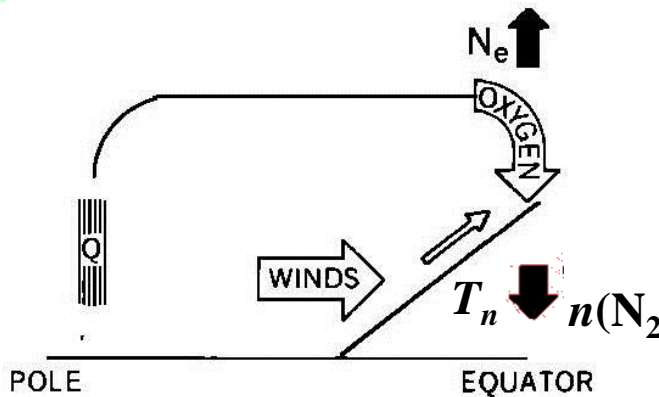
2 stage
2-5 hrs
after
storm
beginning



PHASE I

- (1) ENERGY DEPOSITION
- (2) EXCITATION OF MERIDIONAL WINDS
- (3) PLASMA TRANSPORT TO HIGHER ALTITUDES
- (4) OVERALL N_e INCREASE

3 stage
5-24 hrs
after
storm
beginning

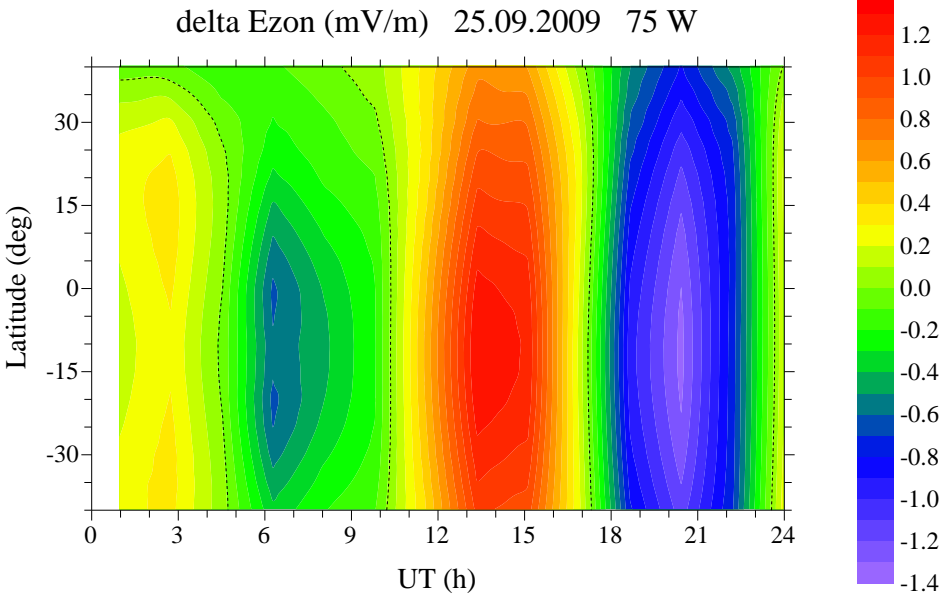


II. Increase in $N_m F2$ at low latitude

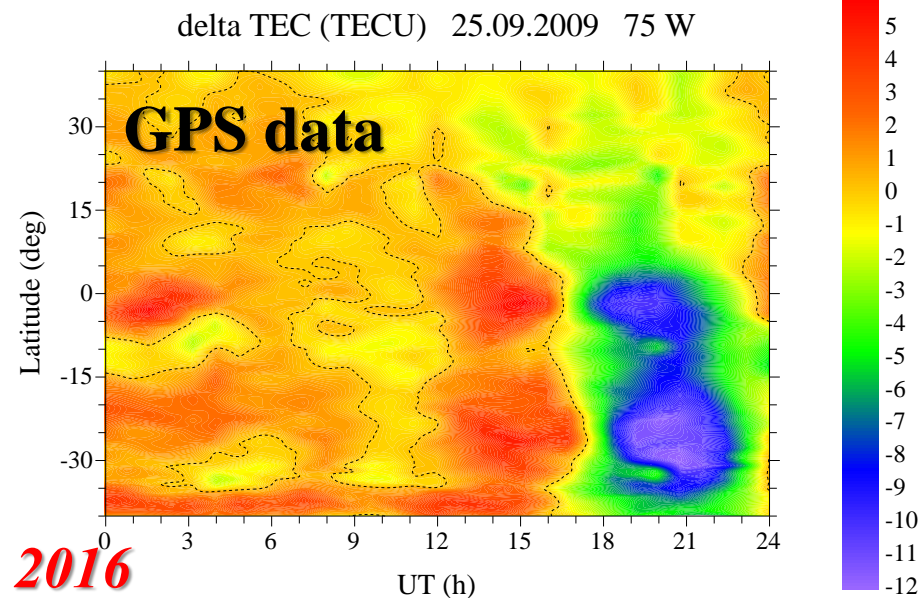
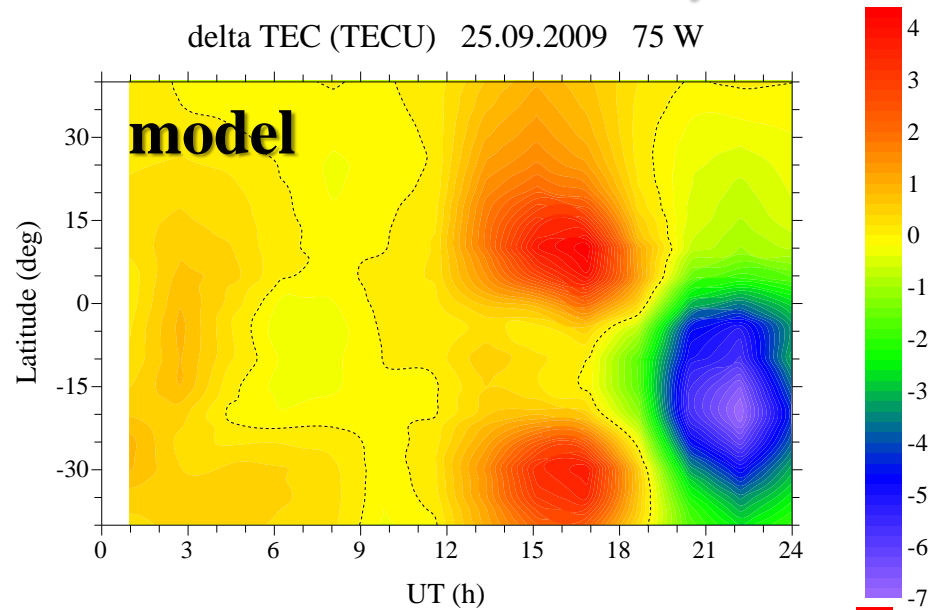
- (1) plasma uplift to region with smaller $n(N_2)$
- (2) equatorward transport of $n(O)$
- (3) Increase in neutral density
- (4) neutral cooling and decrease in $n(N_2)$
- (5) Increase in $n(O)/n(N_2)$

Задание наблюдавшегося в период стратосферного потепления 2009 г. вертикального $E \times B$ дрейфа плазмы (зонального электрического поля)

delta E_{zonal} on 25 January 2009

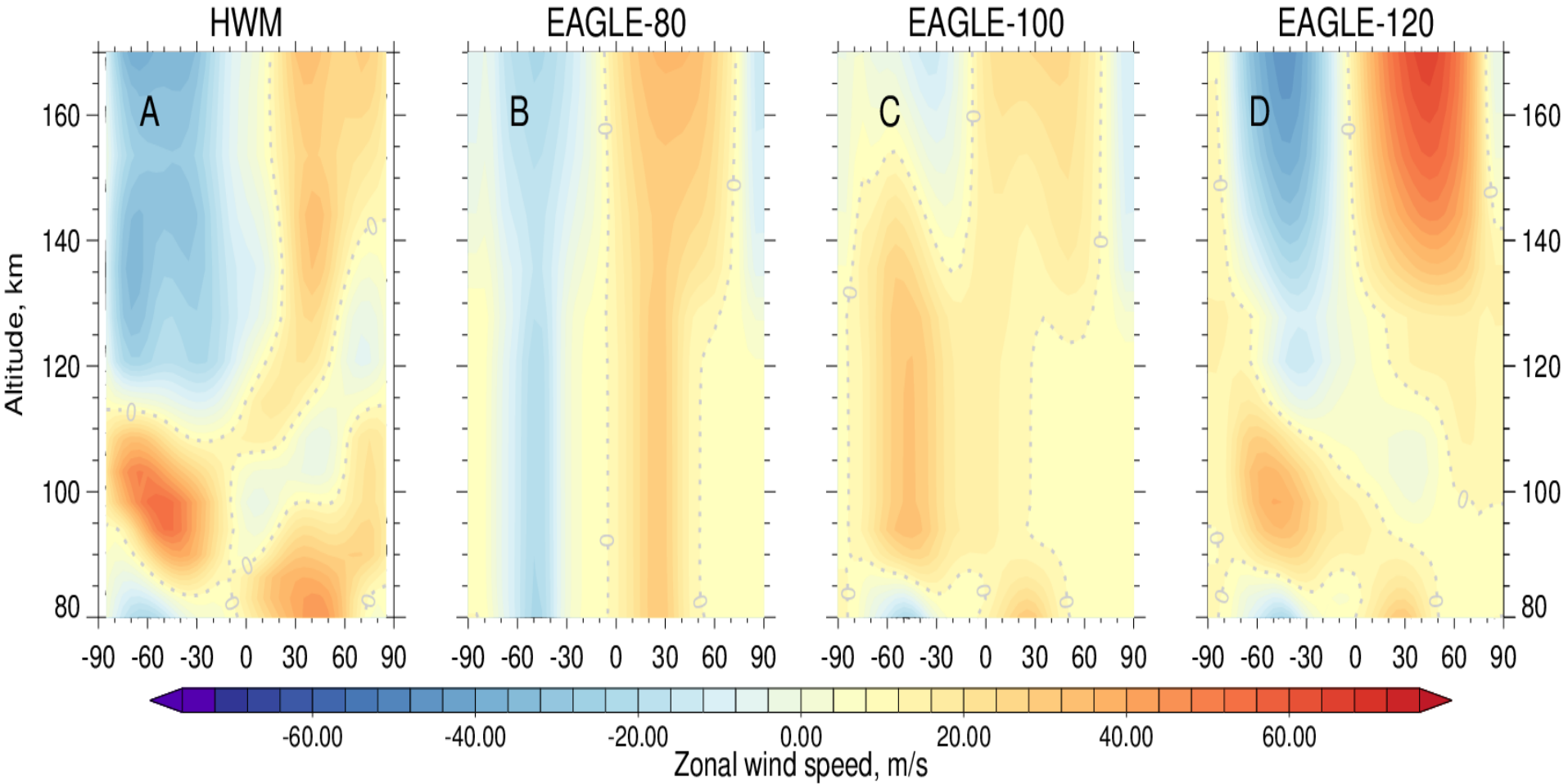


delta TEC on 25 January 2009



Основной механизм формирования эффектов стратосферных потеплений в низкоширотной ионосфере

Выбор версии модели EAGLE



Проблемы, требующие решения

- Константы скоростей многих процессов, особенно в нижней ионосфере известны с точностью до 1-2 порядков, а для целого ряда процессов вообще не определены
- Устаревшие модели ионизации солнечным УФ, рентгеновским и гамма-излучением, протонами высоких энергий
- Отсутствие текущих данных по параметрам ОКП с оценкой точности