

Международная конференция "Физика атмосферы и климата", посвященная 70-летию Института физики
атмосферы им. А.М. Обухова РАН
6-9 апреля 2026
г. Кисловодск, Россия

Численное моделирование верхней атмосферы и ионосферы

Кулямин Д.В. Дымников В.П.

Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука (ИВМ РАН)
Москва, Россия



Мотивация – развитие модели Земной системы

Современный подход – разработка комплексных глобальных численных моделей Земной системы.

Основные задачи:

- воспроизведение глобальных характеристик среды и их изменчивости
- исследование физических механизмов их формирования
- описание и прогноз изменений характеристик среды под действием внешних факторов (антропогенных и др.)

В основе современных **моделей Земной системы** – численное решение нелинейной трехмерной системы уравнений геофизической гидродинамики (отдельно для атмосферы и океана) с учетом всех энергетически значимых процессов в глобальной постановке (для всей Земли), для описания которых создаются отдельные модули-модели и параметризации *возможно до высот ~600 км (приближение сплошной среды)*

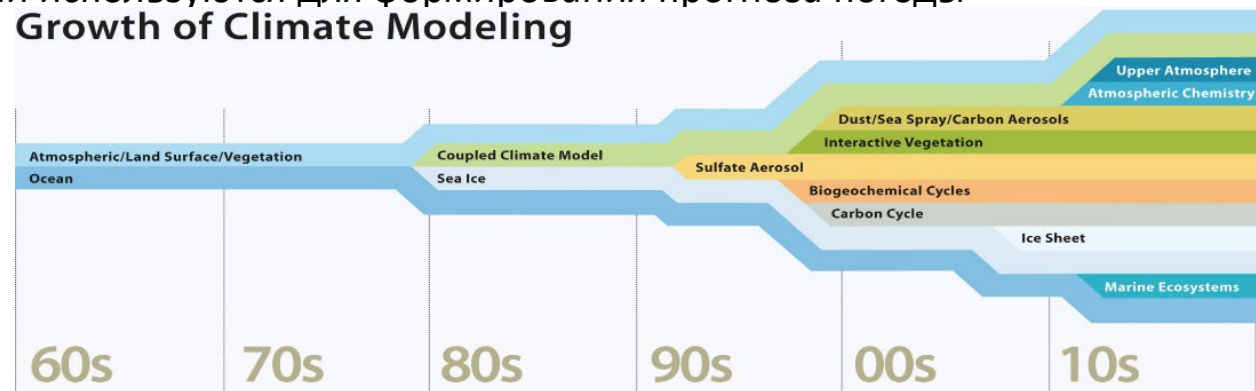
Современные численные модели климата Земли несколько десятилетий успешно используются для решения этих задач их результаты рассматриваются в рамках международных программ под эгидой ООН (МГЭИК/IPCC)

Аналогичные в постановке модели используются для формирования прогноза погоды

Модели климата ИВМ РАН
(INMCM)

Единственный представитель
РФ в международных проектах
AMIP/CMIP, на основе которых
составляется оценочный
доклад МГЭИК (IPCC)

Growth of Climate Modeling



Мотивация – развитие модели Земной системы

Вертикальная структура атмосферы (по градиенту средней температуры)

- тропосфера (~0-10 км)
- стратосфера (~10-50 км)
- мезосфера (~50-90 км)
- термосфера (~90-700 км)
- экзосфера (~700-2000 км)

нейтральный газ

ионосфера

- D слой ионосферы (~50-90 км)
- E слой ионосферы (~90-130 км)
- F слой ионосферы (~90-130 км)

плазмосфера (~1.2-4R)

магнитосфера

заряженные частицы

Модели ионосферы

- Ионизация
- Фотохимия
- Динамика ионов
- Электромагнитные явления

Модели общей циркуляции атмосферы (0-500 км)

(гидродинамические уравнения динамики сплошной среды)

- модель нижней и средней атмосферы (0-90 км)
- модель атмосферы и нижней термосферы (0-120 км)
- модель термосферы (90-500 км)



Ключевые задачи для моделирования верхней атмосферы

Разработка моделей верхней атмосферы и ионосферы

Стратегия – разработка последовательности моделей на единой основе в рамках парадигмы развития модели Земной системы ИВМ РАН и последующие объединение в единую модель
(разбиение по высотным областям)

Фундаментальные проблемы:

- эффекты наблюдаемых и возможных будущих изменений климата в верхней атмосфере и ионосфере
- динамическое взаимодействие верхних и нижних слоев атмосферы
- солнечно-земные связи

задача, имеющее прикладное значение

- *описание и прогноз глобальных характеристик верхней атмосферы, ионосферы и космической погоды*

Основная перспективная цель: создание версии модели Земной Системы, включающей описание верхней атмосферы и ионосферы, на основе моделей ИВМ РАН (0-500 км, океан, атмосфера, химия и др.)

Моделирование атмосферы и ионосферы в ИВМ РАН

Имеющиеся разработки и решенные проблемы:

- **модель климата и Земной системы ИВМ РАН INMCM, ARTS-ESM (0 - 30/60 км)**

наиболее развитая на данный модель ИВМ РАН, множество раз участвовала в международных программах CMIP/AMIP

- **модель общей циркуляции атмосферы INMAIM (0 - 90/120 км)**

на основе атмосферного блока модели климата, включает описание формирования нижней ионосферы (D и E слои), описание распространения ВГВ, модели радиационных притоков тепла, описание основных динамических особенностей средней атмосферы: наблюдаемые моды изменчивости, квазидвухлетние колебания, внезапные стратосферные потепления и др.

- **модель общей циркуляции термосферы (90-500 км)**

гидродинамическое ядро на основе модели атмосферы ИВМ РАН, отдельный модельный блок расчета радиационных притоков тепла в верхней атмосфере, описание взаимодействия нейтральной атмосферы и ионосферы, описание формирования турбулентного пограничного слоя в нижней термосфере за счет обрушения гравитационных волн и др.

- **модель динамики ионосферы INM-IM (100-500 км)**

новая отдельная глобальная динамическая модель, описание формирования и динамики ионосферы и его связей с термосферой

- **системы усвоения данных наблюдений для модели ионосферы, в том числе на основе методов машинного обучения**

Совместная модель общей циркуляции атмосферы и нижней ионосферы INMAIM (0-120 км)

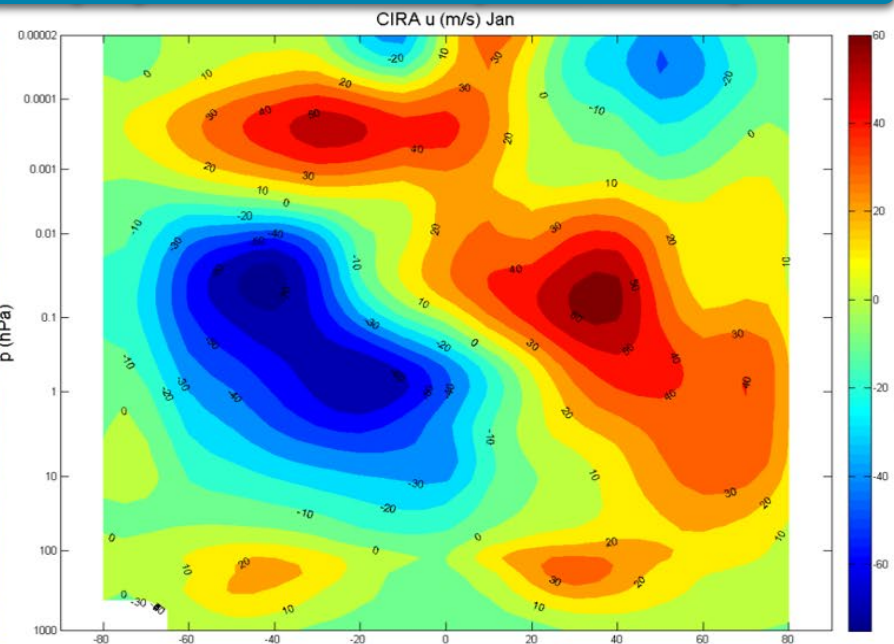
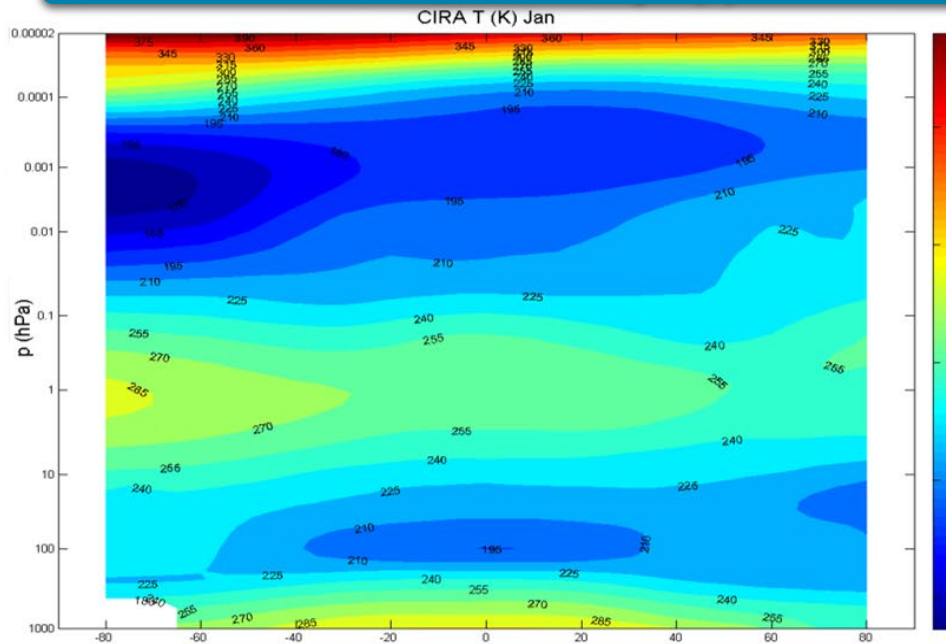
(тропосфера-стратосфера-мезосфера-нижняя термосфера)

численное решение уравнений гидротермодинамики атмосферы для скоростей ветра, температуры и геопотенциала (высоты) в сферических координатах связанных с давлением

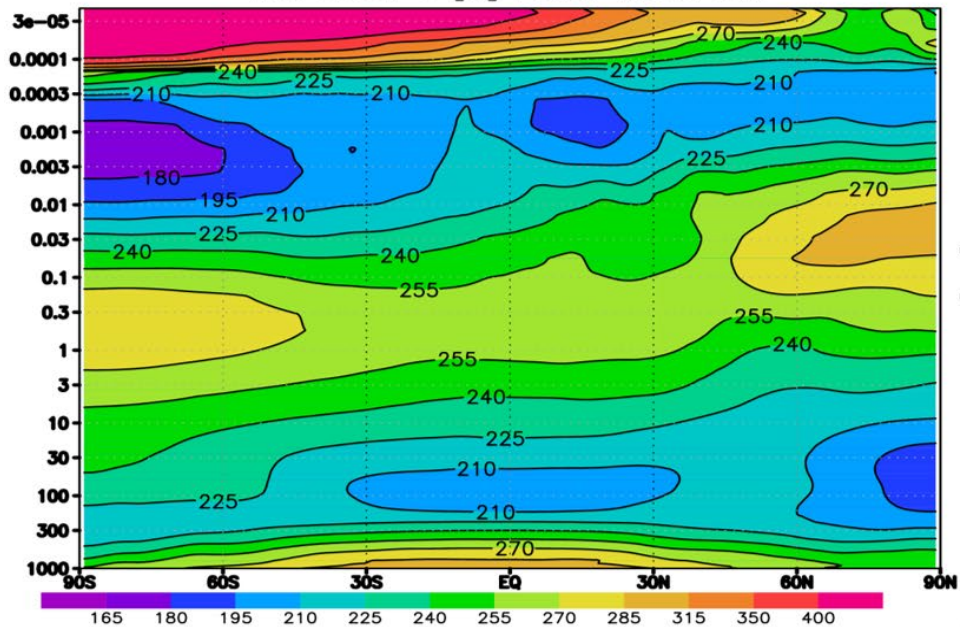
Горизонтальное разрешение $2^\circ \times 2.5^\circ$,
86 вертикальных уровней в гибридной координате (p, ps)
вертикальное разрешение в мезосфере и термосфере ~ 5 км

- гибридная сигма-p координата
- добавление нового радиационного блока (для высот 70 -130 км)
- добавление параметризаций физических процессов на высотах термосферы: молекулярная диффузия и теплопроводность, ион-нейтральное взаимодействие (согласовано с моделью ионосферы) и др.
- усовершенствование параметризаций волнового воздействия

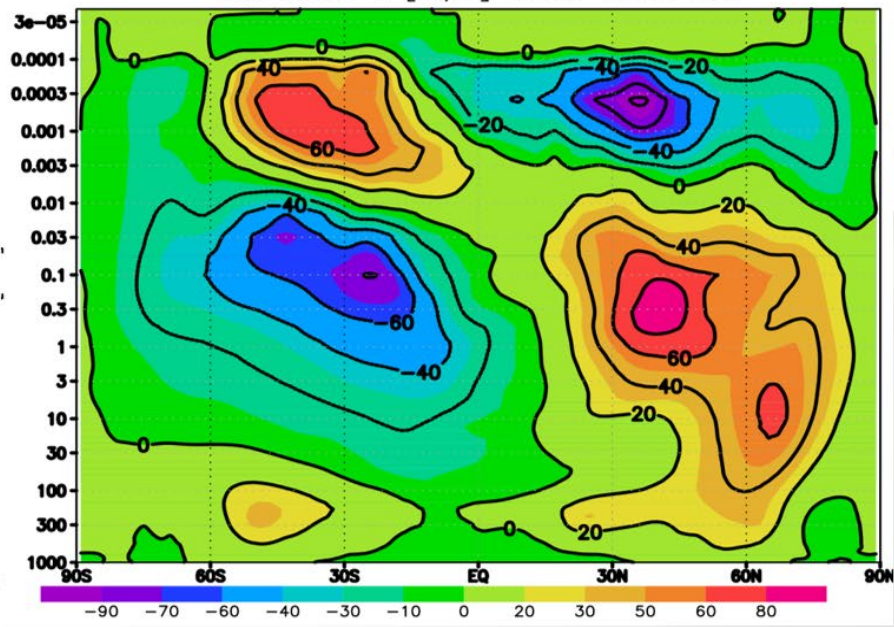
Климатология средней атмосферы INMAIM (0-130 км)



INM AGCM T [K] Zonal mean Jan



INM AGCM u [m/s] Zonal mean Jan

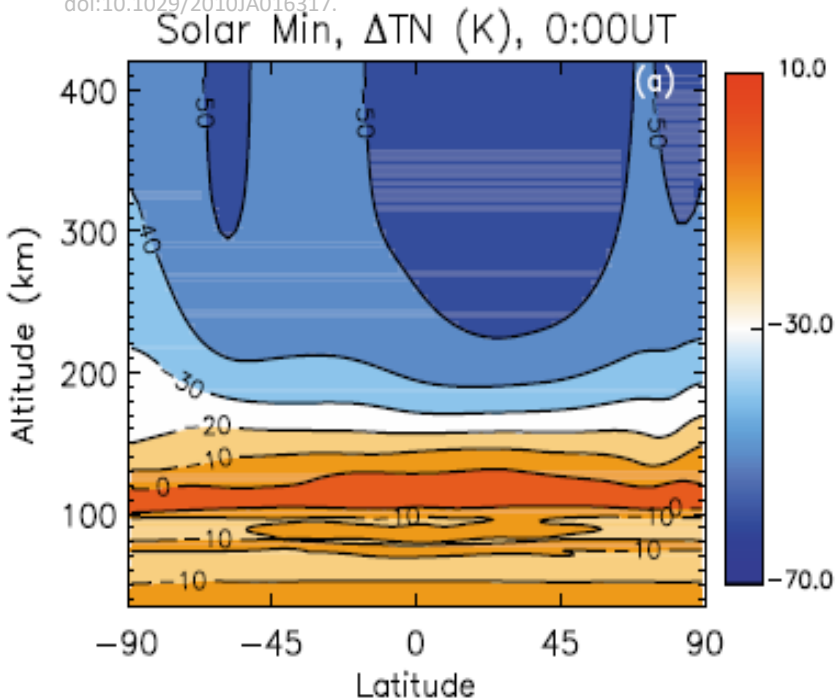


Отклик верхней атмосферы на изменения климата

- Охлаждение с более высокой чувствительностью (по сравнению с поверхностью)
- Оседание (увеличение плотности на более низких слоях)

Чувствительность верхней атмосферы к удвоению CO₂ (моделирование, TIME-GCM)

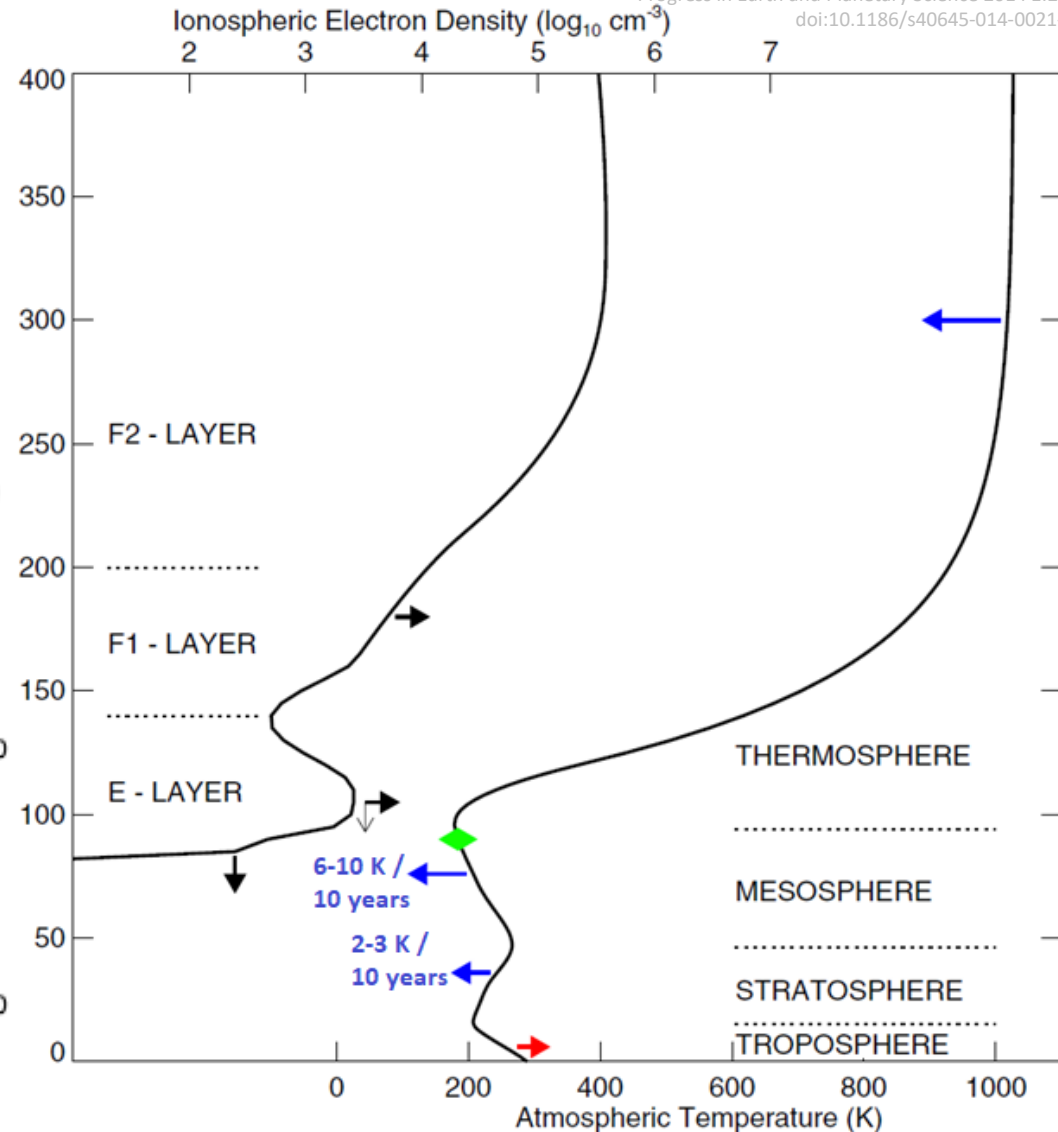
✓ Qian, L., J. Laštovička, R. G. Roble, and S. C. Solomon (2011), Progress in observations and simulations of global change in the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 116, A00H03, doi:10.1029/2010JA016317.



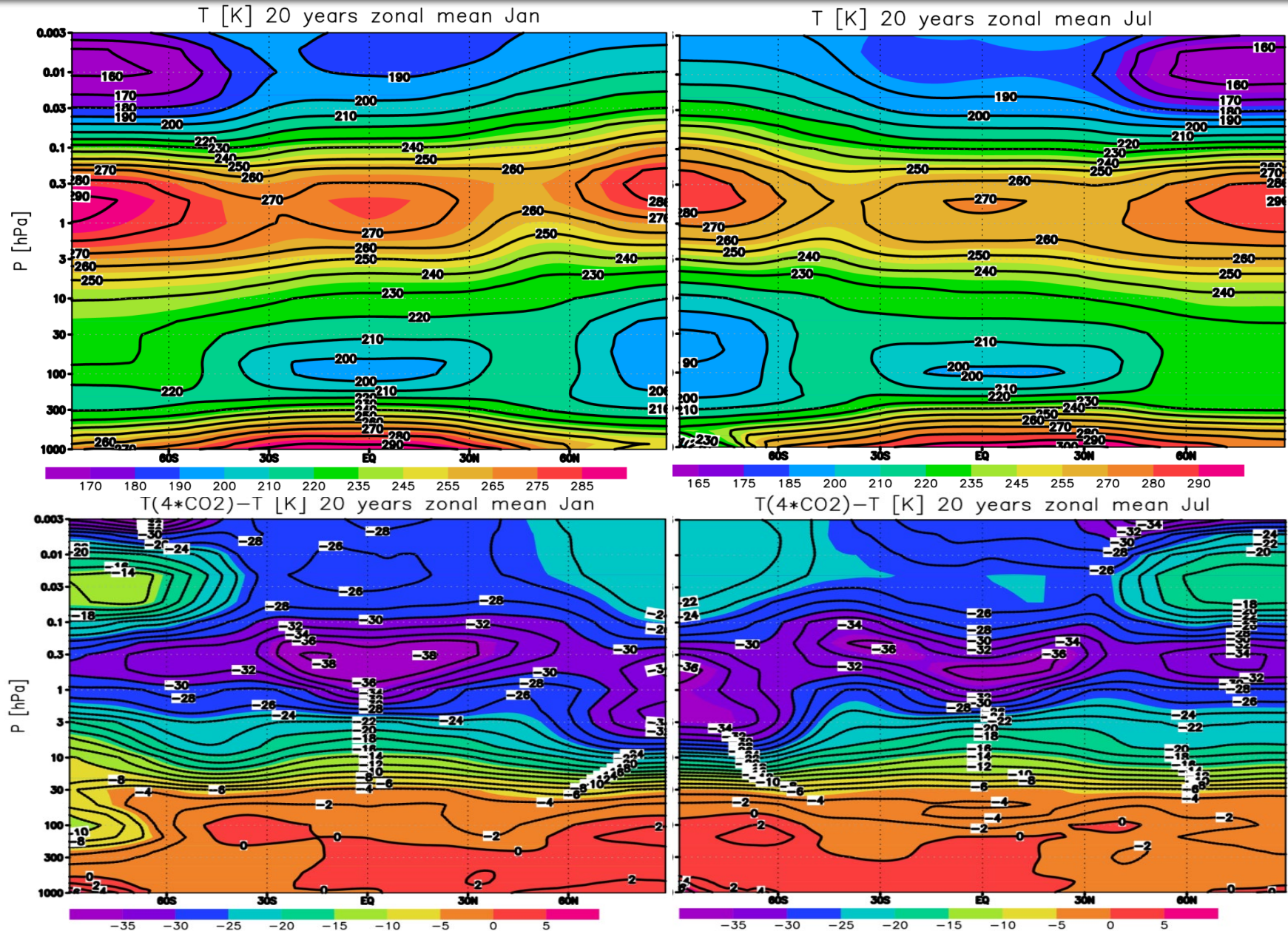
Оценки наблюдаемых трендов в ионосфере и верхней и средней атмосфере

(конец XX – начало XXI века)

✓ Laštovička et al.: Response of the mesosphere-thermosphere-ionosphere system to global change - CAWSES-II contribution: Progress in Earth and Planetary Science 2014 1:21. doi:10.1186/s40645-014-0021-6



Моделирование чувствительности верхней атмосферы к изменениям климата INM AIM



Моделирование F слоя ионосферы, модель INM-IM

Решение **уравнения неразрывности** (описывает эволюцию плотности электронов)

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = -\text{div}(n_i \vec{u}_{\parallel}) - \text{div}\left(n_i \frac{1}{B^2} [\vec{E}' \times \vec{B}]_{\perp}\right) + \text{div}\left(D \left(\nabla_{\parallel}(n_i) + n_i \frac{1}{T_p} \nabla_{\parallel} T_p - \frac{n_i m_i}{2kT_p} \vec{g}_{\parallel} \right)\right) + [P - k_i n_i]$$

$$P_o(z) = n_o(z) \int_{\lambda} \left[I_{\lambda} \cdot \sigma_o^i \cdot \exp(-\tau(z, \lambda, \chi)) \right],$$

Используемые приближения:

- рассматриваются процессы только в F слое;
- динамическое преобладание амбиполярной диффузии;
- преобладание электромагнитного дрейфа в поперечном направлении $[\vec{E}' \times \vec{B}]_{\perp}$
- **одноионная постановка (O+)**, квазинейтральность плазмы;
- дипольное магнитное поле Земли

$$D = \frac{k(T_i + T_e)}{m_i V_{in}}$$

Обозначение	Реакции	Константы скоростей	
P	$O + h\nu \rightarrow e + O^+$		
M ₁	$O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N$	$1.2 \cdot 10^{-12}$	$\text{см}^3 \text{с}^{-1}$
M ₂	$O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$	$2.1 \cdot 10^{-11}$	$\text{см}^3 \text{с}^{-1}$

Используется трехмерная географическая система координат (тонкий сферический слой)

- согласована с моделью циркуляции термосферы (нет проблем переинтерполяции и др.)
- характерное направление в распределении многих параметров – вертикальное (температуры, скорость ионизации, концентрации нейтралов, и др.)

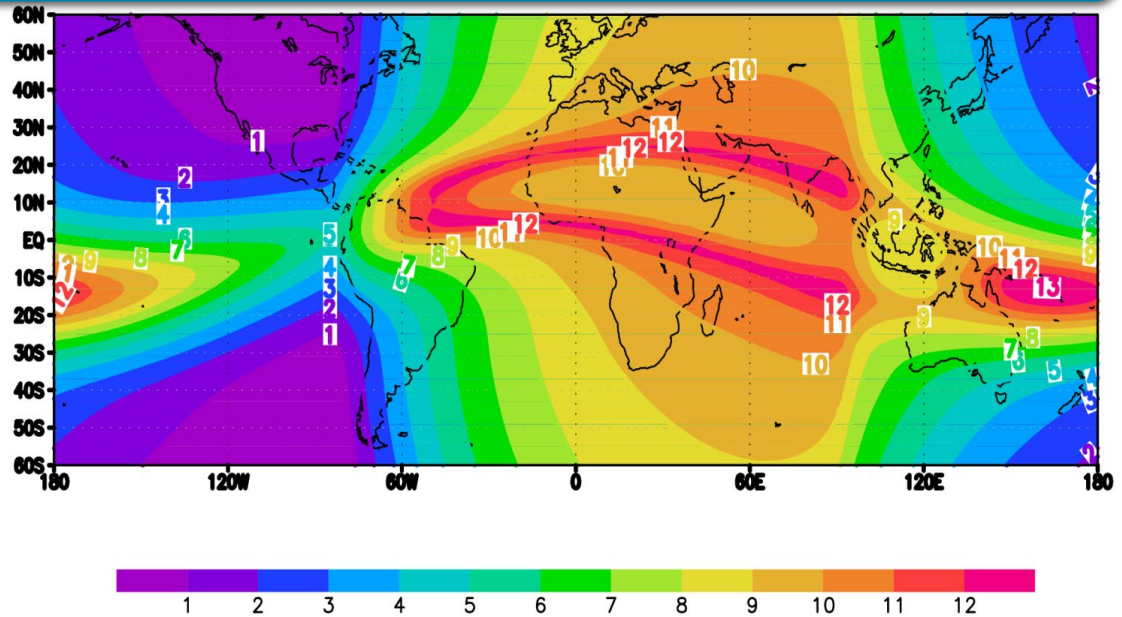
Высотный диапазон 100 – 500 км. Регулярная горизонтальная сетка (с шагами 2° по широте и 2.5° по долготе, 5 км по вертикали), шаг по времени 10-100 сек

Моделирование F слоя ионосферы

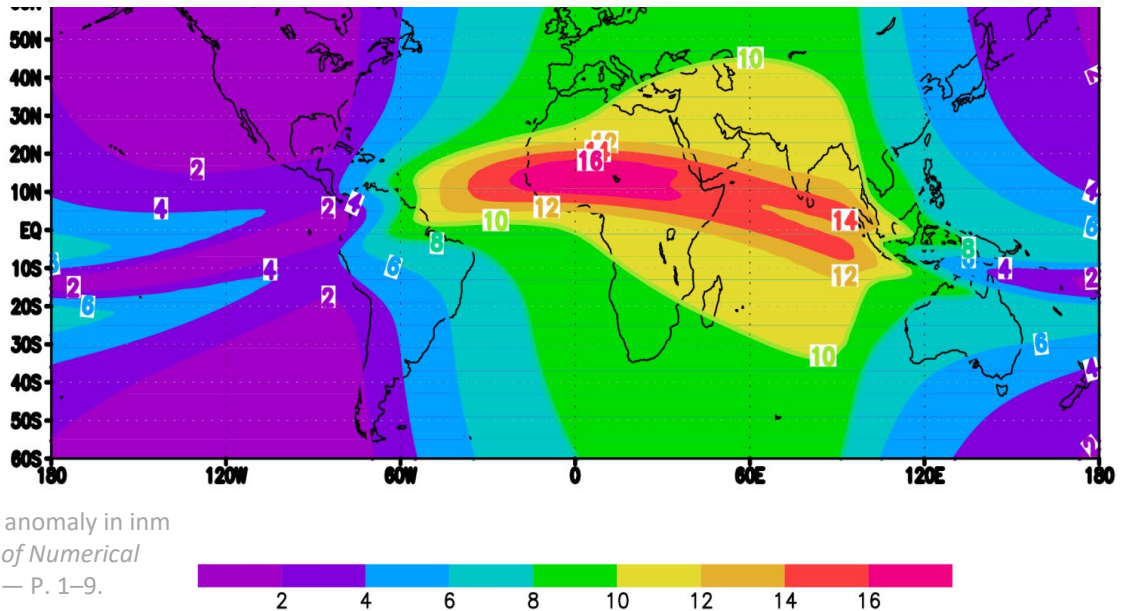
Экваториальная аномалия

$N_e 10^{-5} [\text{cm}^{-3}]$ 250 км 3 am UT
равноденствие, март

сильный ExB дрейф на экваторе

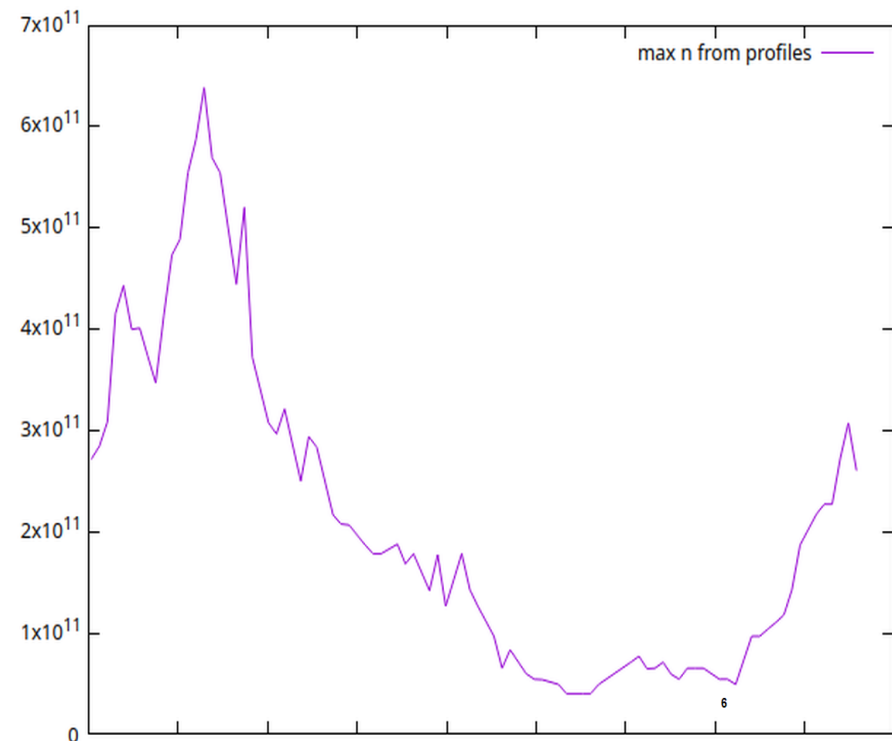
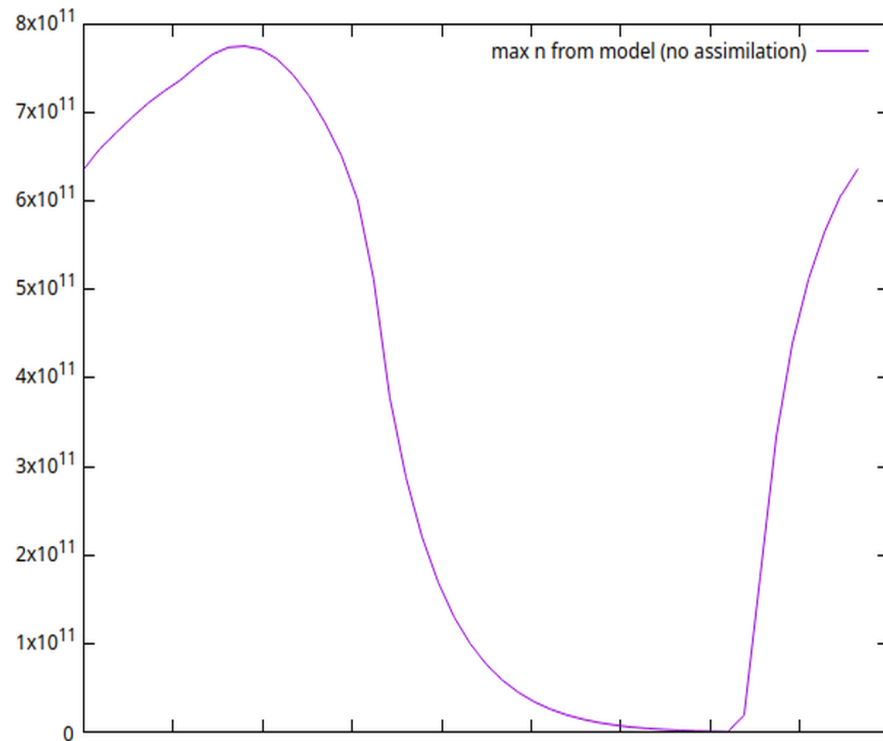


слабый ExB дрейф на экваторе



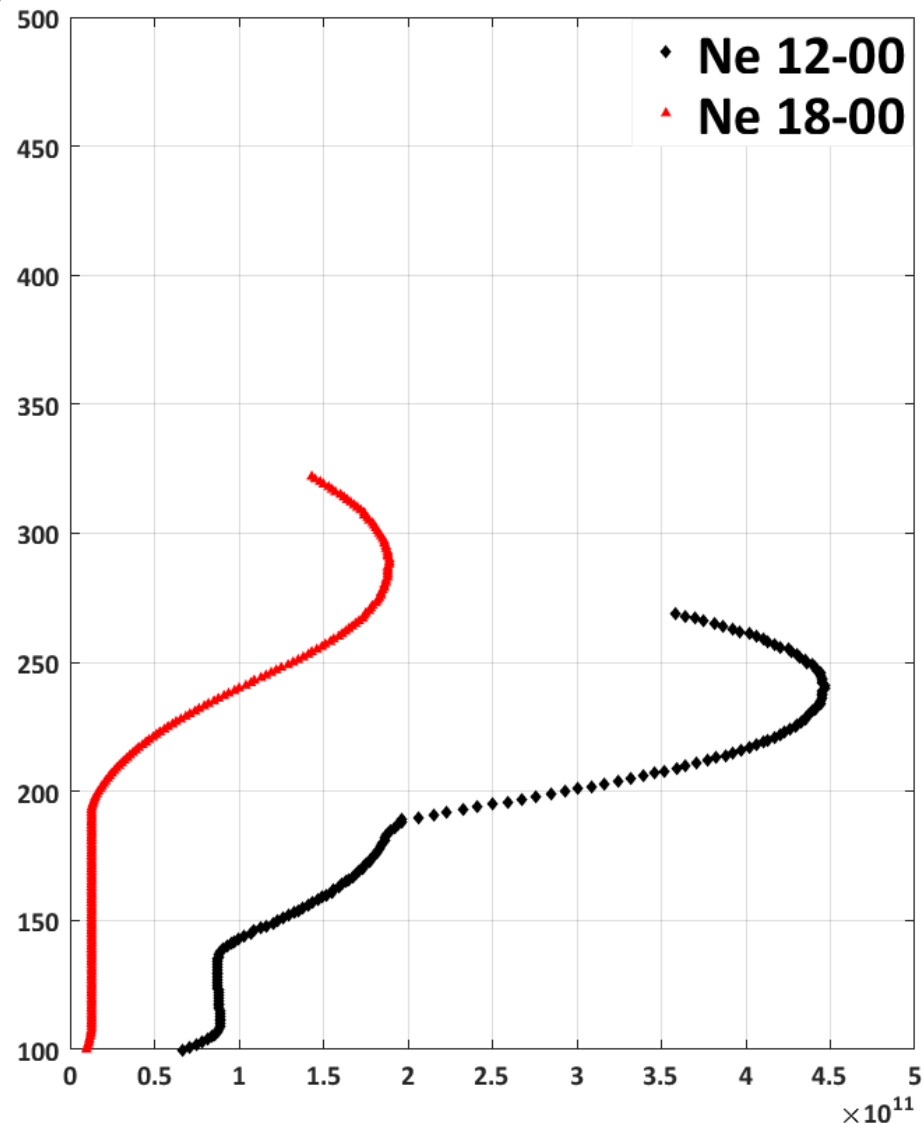
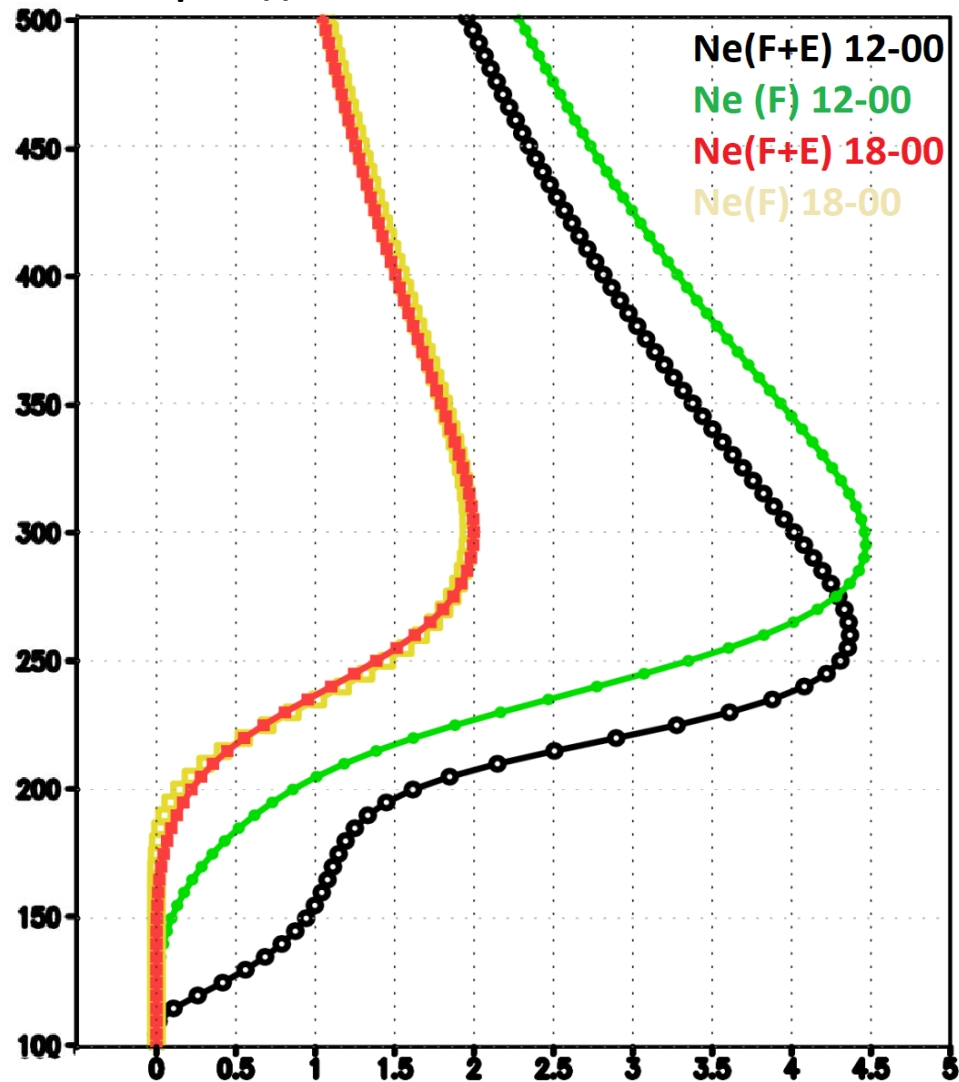
Моделирование F слоя ионосферы

Суточный ход максимума электронной плотности N_e (max), полученный с помощью трехмерной модели INM-IM (слева) и по данным наблюдений с ионозонда (справа) над Новосибирском, Спокойные геомагнитные условия, солнечный минимум, 28.03.2021



Моделирование E и F слоя ионосферы

Вертикальные профили электронной плотности n_e [10^{11} м^{-3}] в полдень и вечернее локальное время, полученный с помощью модели INM-IM (слева) в новой версии с учетом описания E слоя и в старой версии без его учета и по данным наблюдений с ионозонда (справа) над Новосибирском. Высота приведена в км, спокойные геомагнитные условия, солнечный минимум, 28.03.2021



Особенности задачи усвоения данных для ионосферы

- **разный тип данных** (полное электронное содержание (ПЭС, ТЕС), данные ионозондов и др.)

- **вариационный метод ассимиляции**

постановка и решение обратной задач о восстановлении (подправки) ряда параметров модели F слоя ионосферы: при заданных граничных условиях и параметрах требуется найти решение, удовлетворяющее условию наблюдения (оператор наблюдений = числовые данные), управление осуществляется по правой части (предполагается, что ошибки вызваны неточностью в ее задании)

прямая задача (модельное решение) -> обобщенная постановка ->

сопряженная задача -> оптимизация функционала стоимости (задача оптимального управления со стандартной регуляризацией по Тихонову, решается итерационно методом градиентного спуска)

- **численные методы**

для решения как прямой, так и сопряженной задачи используются специально разработанные консервативные схемы, на основе метода расщепления, Кабаре

✓ В. П. Дымников, Д. В. Кулямин, П. А. Останин, В. П. Шутяев Регулярные решения линейных обыкновенных дифференциальных уравнений и усеченные ряды // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2023, т 63, 5, с. 803–826

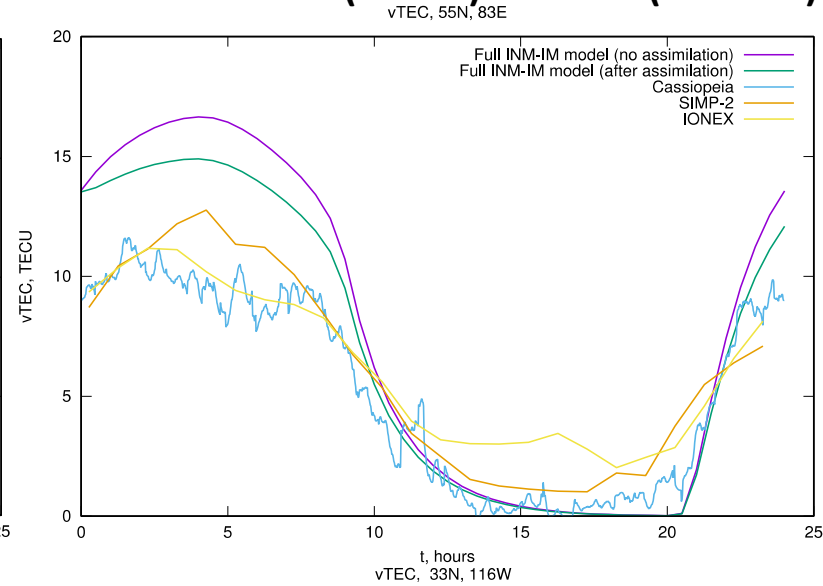
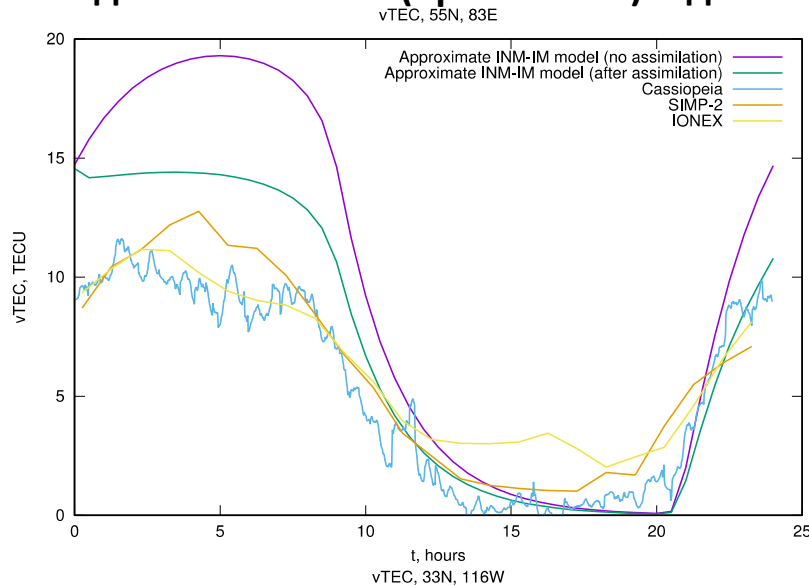
✓ P. A. Ostanin, D. V. Kulyamin, S. V. Kostykin, A. E. Vasilev, V. P. Dymnikov, Four-dimensional variational data assimilation system for the Earth ionosphere // Rus. J. of Num. Analys. and Math. Model. 2025. vol. 40, No.1, pp.33-46

Усвоение данных для модели F слоя ионосферы

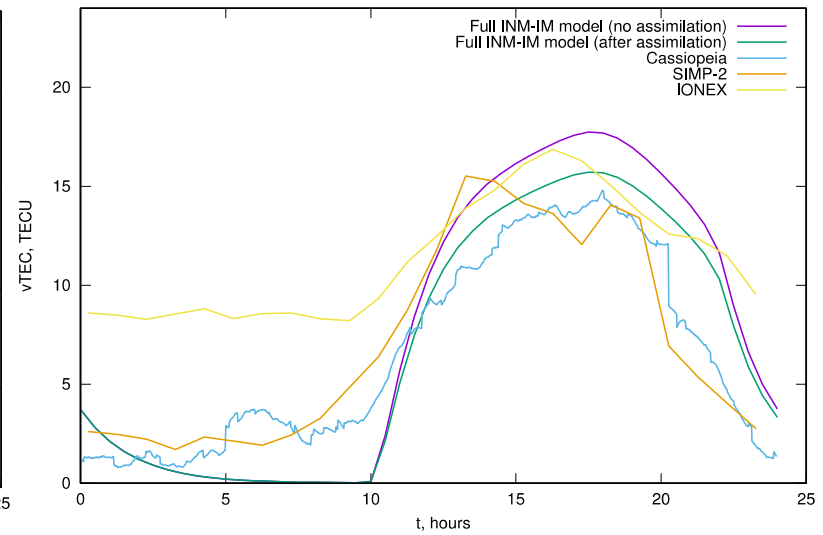
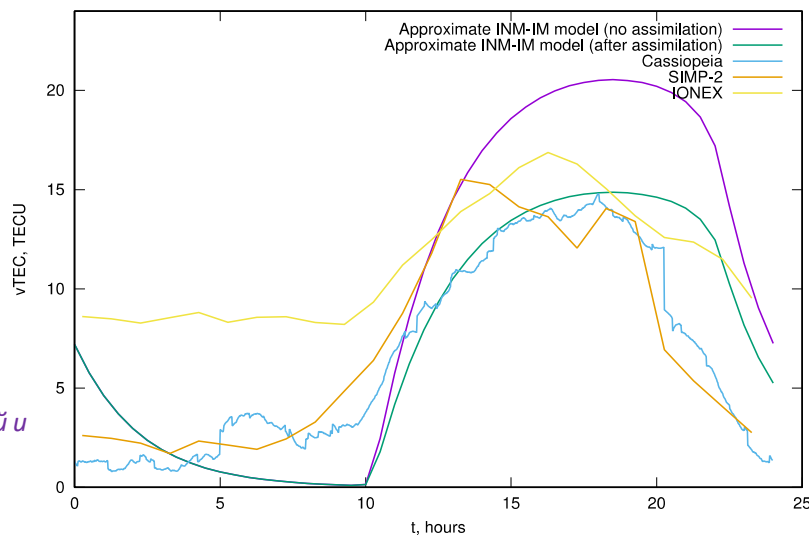
Результаты усвоения данных sTEC для марта 2021

vTEC, полученный с помощью квазидвумерной (слева) и трехмерной модели INM-IM (справа) расчетом без усвоения (фиолетовый), после усвоения данных sTEC в сравнении с полученной в эмпирической модели IGS SIMP-2 (оранжевый) и данными IGS Кассиопея (синий) и IONEX (желтый)

станция
Новосибирск,
Россия



станция
Пиньон-Флэт,
Калифорния,
США



29.03.2021 –
равноденствие,
минимум солнечной и
геомагнитной
активности

Усвоение данных с помощью методов машинного обучения

Восстановление критических частот по данным sTEC

Суточный ход критической частоты (максимума электронной плотности), предсказываемый с помощью метода машинного обучения catboost по данным sTEC (конкретные реализации – синие точки, среднее предсказание – фиолетовая линия) при обучении по данным за месяц в сравнении с данными ионозонда (красный)

