

Усвоение данных в современных моделях динамики ионосферы

Кулямин Д.В., Дымников В.П.

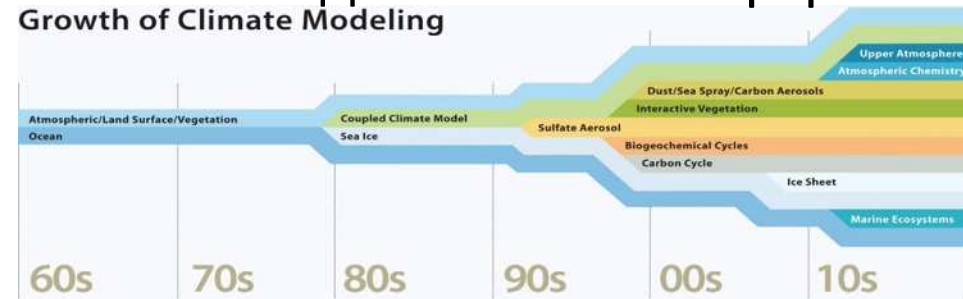
kulyamind@mail.ru

Институт Вычислительной Математики им. Г.И. Марчука РАН

Мотивация – развитие модели Земной системы

направления развития **модели Земной системы** – рассматриваются не только проблемы моделирования климата Земли, но и специфичные для других областей задачи, которые можно решать с помощью моделей Земной системы

Разработка моделей верхней атмосферы и ионосферы (до высот порядка 500 км) в соогласовании с моделями атмосферы и климата ИВМ РАН



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

Состояние верхней атмосферы и ионосферы определяет:

- работу систем межконтинентальной и спутниковой радиосвязи
- работу геолокационных и навигационных систем глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС, Beidou и др.)
- характеристики движения низкоорбитальных спутников и космических аппаратов

Моделирование ионосферы

данных наблюдений в верхней атмосфере и ионосфере для полной идентификации разработанных моделей и исследования глобальных изменений климата верхней атмосферы и ионосферы недостаточно

Система усвоения данных наблюдений для верхней атмосферы позволила бы исследовать следующие проблемы:

- идентифицировать качество разработанных моделей термосферы и ионосферы
- создать длинный ряд данных по ионосфере и термосфере
- исследовать глобальные изменения в верхней атмосфере и ионосфере
- разработать вариант модели для прогноза характеристик верхней атмосферы и ионосферы

Основная цель:

создание и реализация новой версии модели ионосферы Земли (для высот 100-500 км) и системы вариационного усвоения данных наблюдений на ее основе, разрабатываемой в рамках программного комплекса модели Земной системы ИВМ РАН

Моделирование F слоя ионосферы

Основные проблемы при решении задачи прогноза глобального состояния:

- качественная модель ионосферы (описывающая основные значимые процессы)
- чувствительность к внешним параметрам (если доминирующие возмущения - вынужденные)
сюда можно отнести внешние к верхней атмосфере процессы (параметры солнечной и геомагнитной активности и др.), а также атмосферные процессы (термосфера, динамическое воздействие нижней атмосферы и др.)
- прогноз на короткие предсказуемые время - задача Коши (нужны качественные начальные данные) – требуются системы усвоения данных

В перспективе:

- совместная система усвоения для глобальной модели термосферы и ионосферы
- прогноз внешних параметров, определяемых Солнцем и др.

Моделирование F слоя ионосферы (100-500 км)

Полностью новая модель

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

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

Используемые приближения:

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

- рассматриваются процессы только в F слое;
- динамическое преобладание амбиполярной диффузии: $D = \frac{k(T_i + T_e)}{m_i \nu_{in}}$
- преобладание электромагнитного дрейфа в поперечном направлении
- одноионная постановка (O+), квазинейтральность плазмы; $[\vec{E}' \times \vec{B}]_{\perp}$
- дипольное магнитное поле Земли

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.)

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 (100-500 км)

Основные параметры:

- Ионизация (уровень активности, сечения и др.) $P_o(z) = n_o(z) \int_{\lambda} [I_{\lambda} \cdot \sigma_o^i \cdot \exp(-\tau(z, \lambda, \chi))] d\lambda$
- Температуры (из модели термосферы или задаются) $T_p = \frac{1}{2}(T_i + T_e)$
- Концентрации нейтралов (из модели термосферы или задаются по эмпирическим моделям) $n_o(z), n_{O_2}(z), n_{N_2}(z),$
- Скорости нейтрального ветра (из модели термосферы) $\vec{u}_{||}$
- Электромагнитный дрейф (параметризация полей, эмпирические параметризации) $\vec{E}'$
- Поток ионов на границах (задается на верхней границе, потоковое условие)
- Магнитное поле (дипольное приближение, учитываются положения полюсов) $\vec{B} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \cos I \sin D \\ B \cos I \cos D \\ -B \sin I \end{bmatrix}$

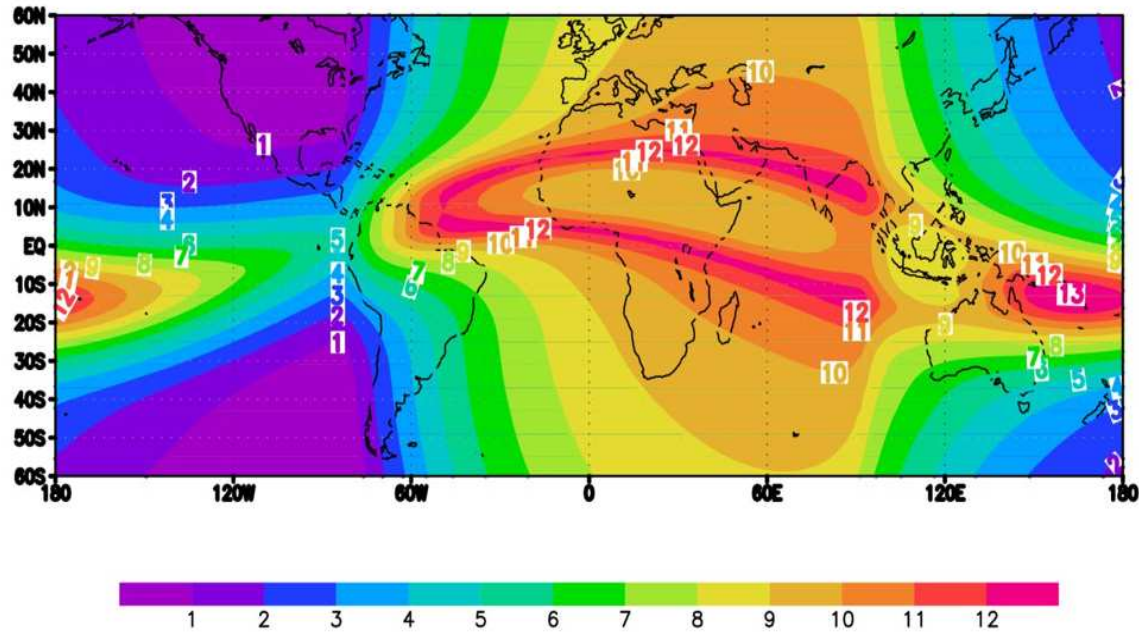
Результаты численных экспериментов

Экваториальная аномалия

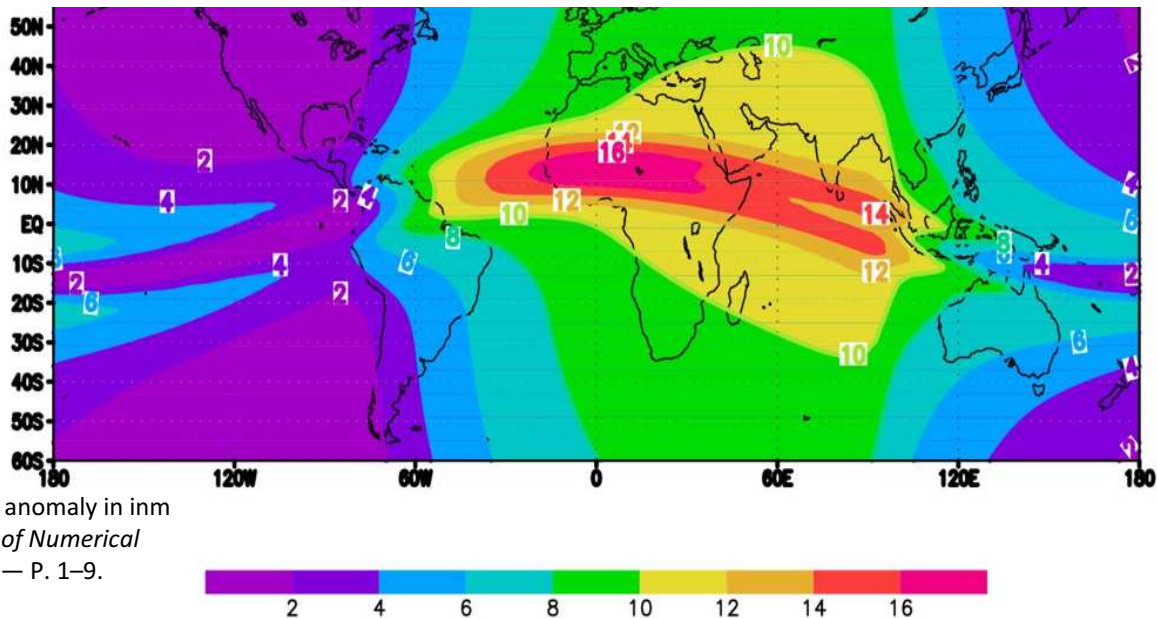
$Ne\ 10^{-5}\ [cm^{-3}]$
равноденствие, март

250 км 3 am UT

сильный ExB дрейф на экваторе



слабый ExB дрейф на экваторе



✓ Kulyamin D. V., Ostanin P. A. Modelling of equatorial ionospheric anomaly in inmras coupled thermosphere-ionosphere model // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. — 2020. — Vol. 35, no. 1. — P. 1–9.

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
(задачи формулируются и исследуются как в дифференциальной, так и в конечномерной форме)

Усвоение данных для модели F слоя ионосферы

Результаты тестовых численных экспериментов

Исследование точности алгоритма усвоения

Контрольные «данные наблюдений» – возмущенные решения **прямой задачи**

Заданы **вертикальные** интегралы электронного содержания (vTEC), **искомое решение** – слабо возмущенный профиль

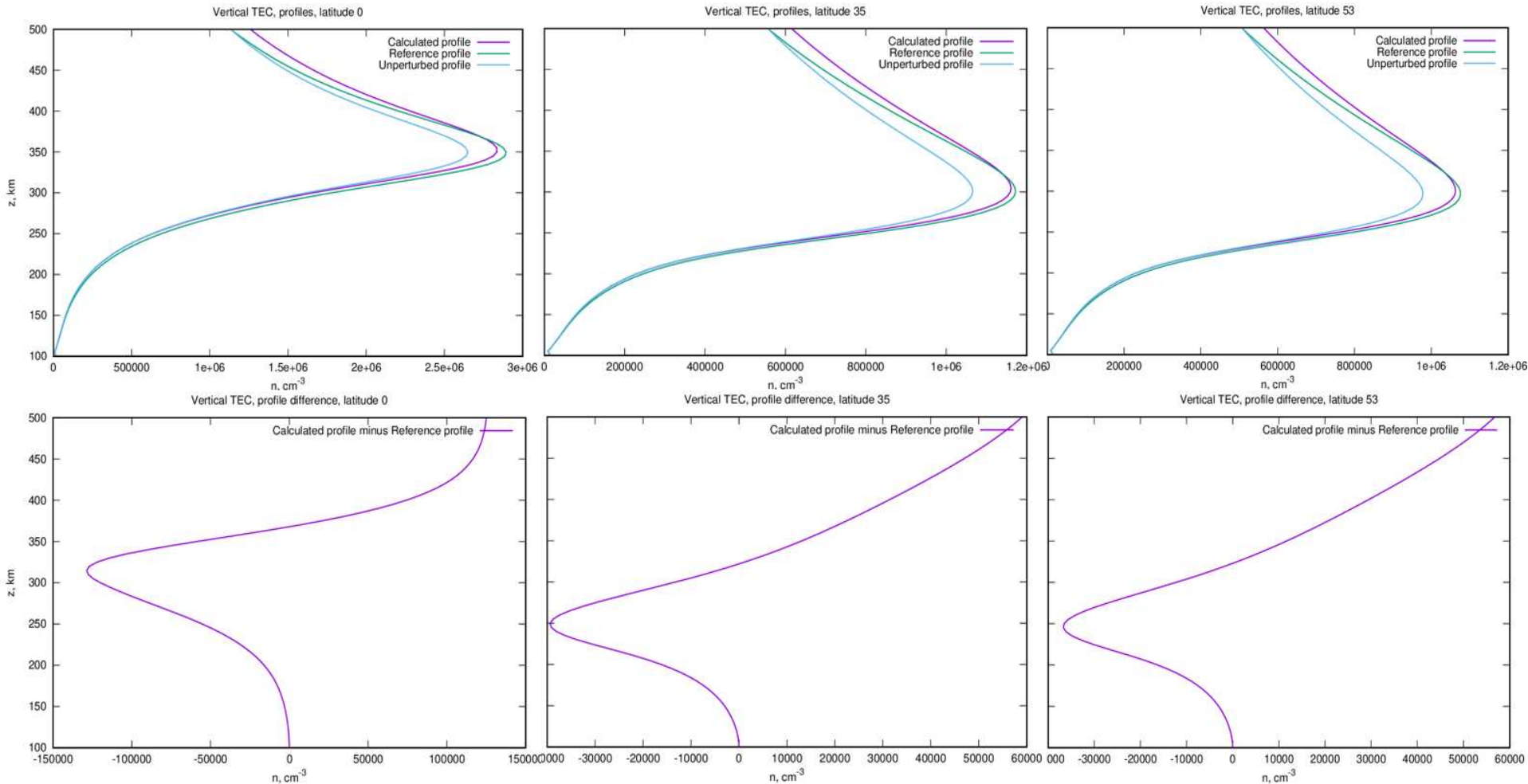
$$(1 + 0,1 \cdot \sin(\pi(z - 100)/500))$$

равноденствие, март, полдень

0° lon ошибки < 4.9%

35° lon ошибки < 3%

70° lon ошибки < 1.8%



Усвоение данных для модели F слоя ионосферы

Результаты тестовых численных экспериментов

Исследование точности алгоритма усвоения

Контрольные «данные наблюдений» – возмущенные решения **прямой задачи**

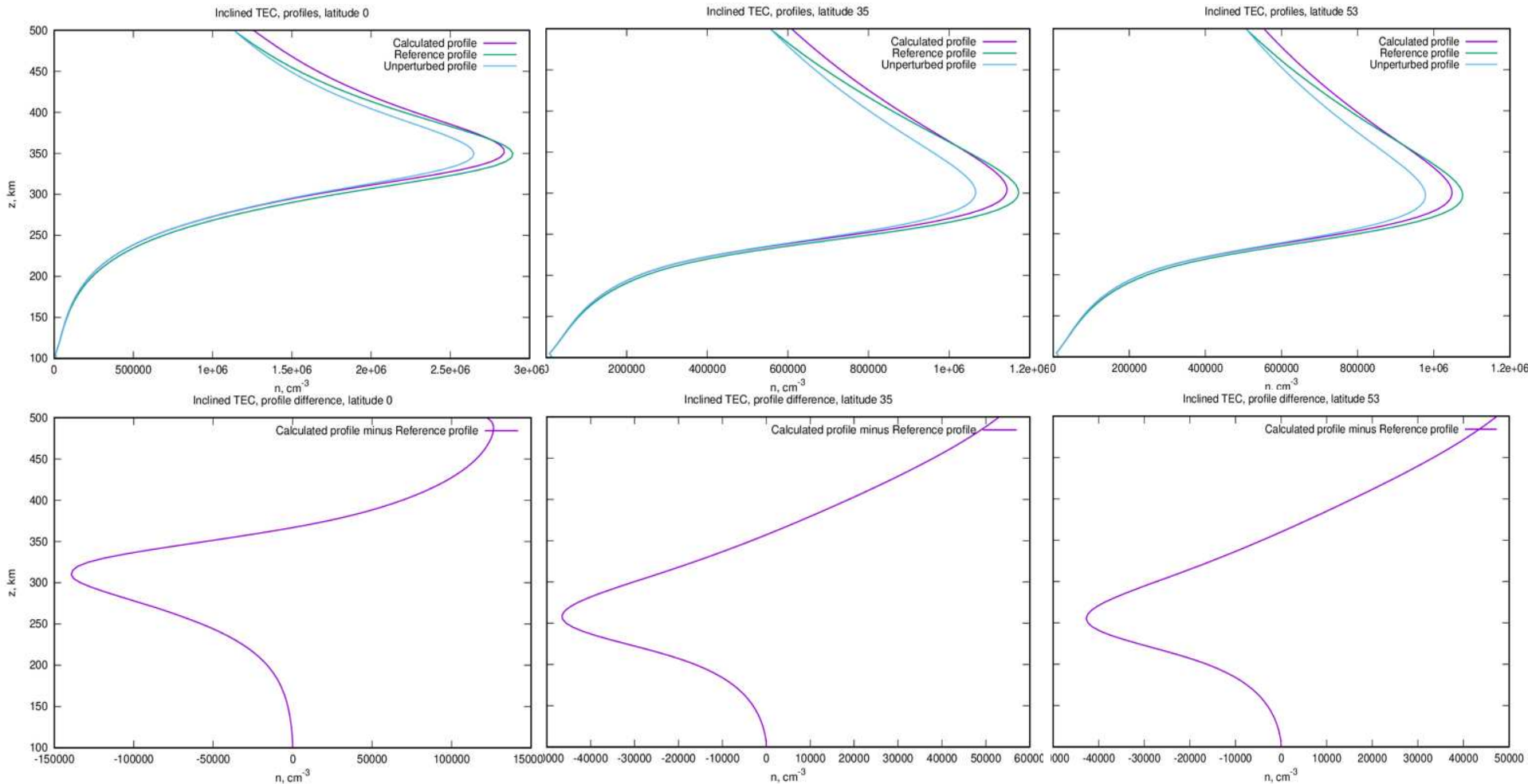
Заданы **наклонные** интегралы электронного содержания (TEC), **искомое решение** – слабо возмущенный профиль $(1 + 0,1 \cdot \sin(\pi(z - 100)/500))$

равноденствие, март, полдень

0° lon ошибки < 5%

35° lon ошибки < 3%

70° lon ошибки < 3%



Усвоение данных для модели F слоя ионосферы

Результаты тестовых численных экспериментов

Исследование точности алгоритма усвоения, суточный ход

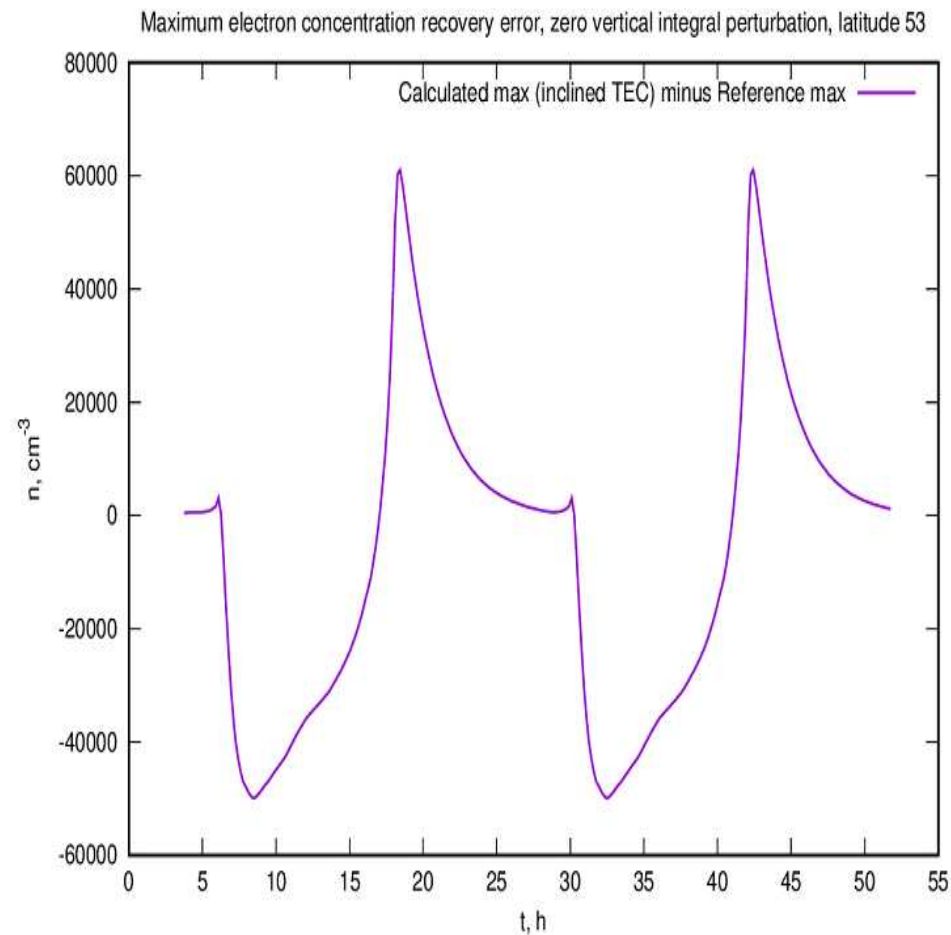
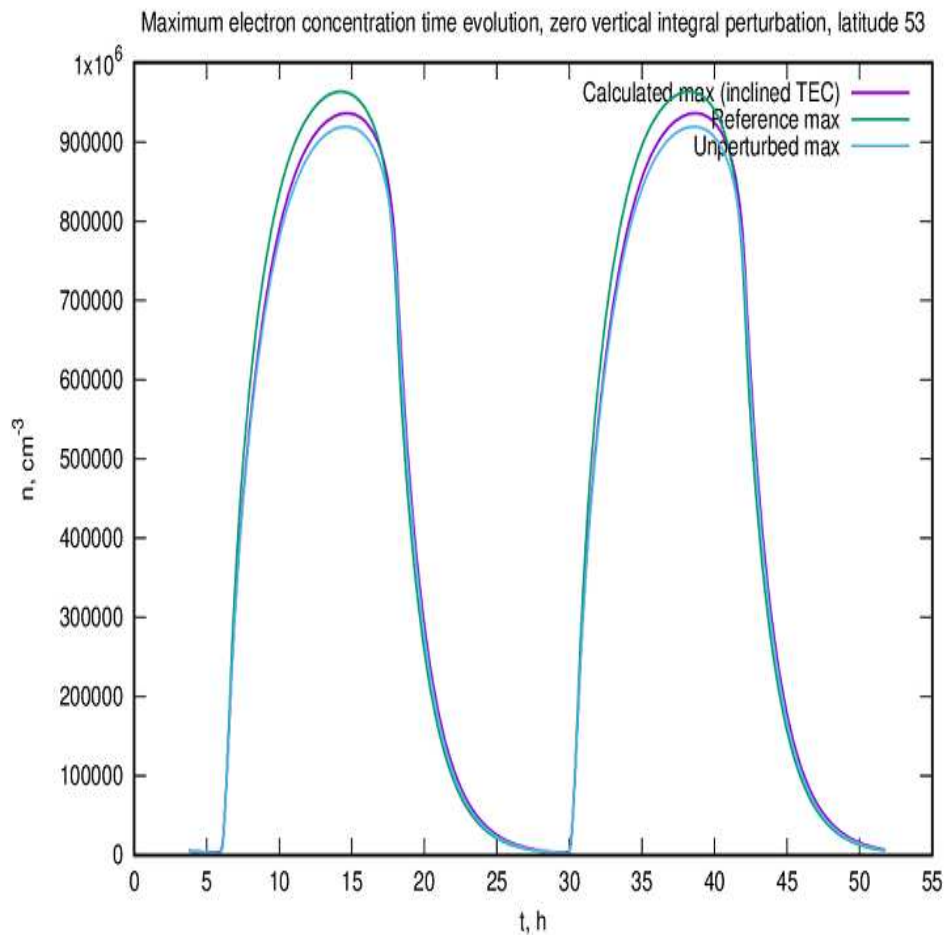
Контрольные «данные наблюдений» – возмущенные решения **прямой задачи**

Заданы **наклонные** интегралы электронного содержания (TEC), **искомое решение** –
слабо возмущенный профиль $(1 + 0,1 \cdot \sin(\pi(z - 100)/500))$

равноденствие, март, полдень

максимумы концентрации электронов

ошибка восстановления (<6%)



Усвоение данных для модели F слоя ионосферы

Результаты тестовых численных экспериментов

Исследование точности алгоритма усвоения, суточный ход

Контрольные «данные наблюдений» – возмущенные решения прямой задачи

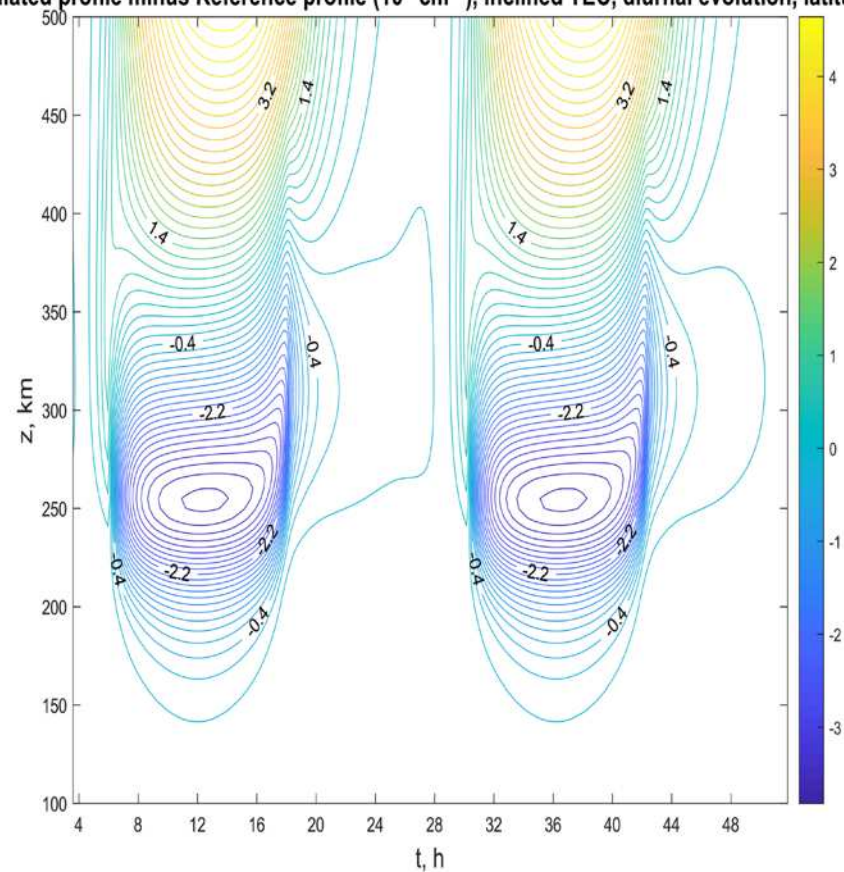
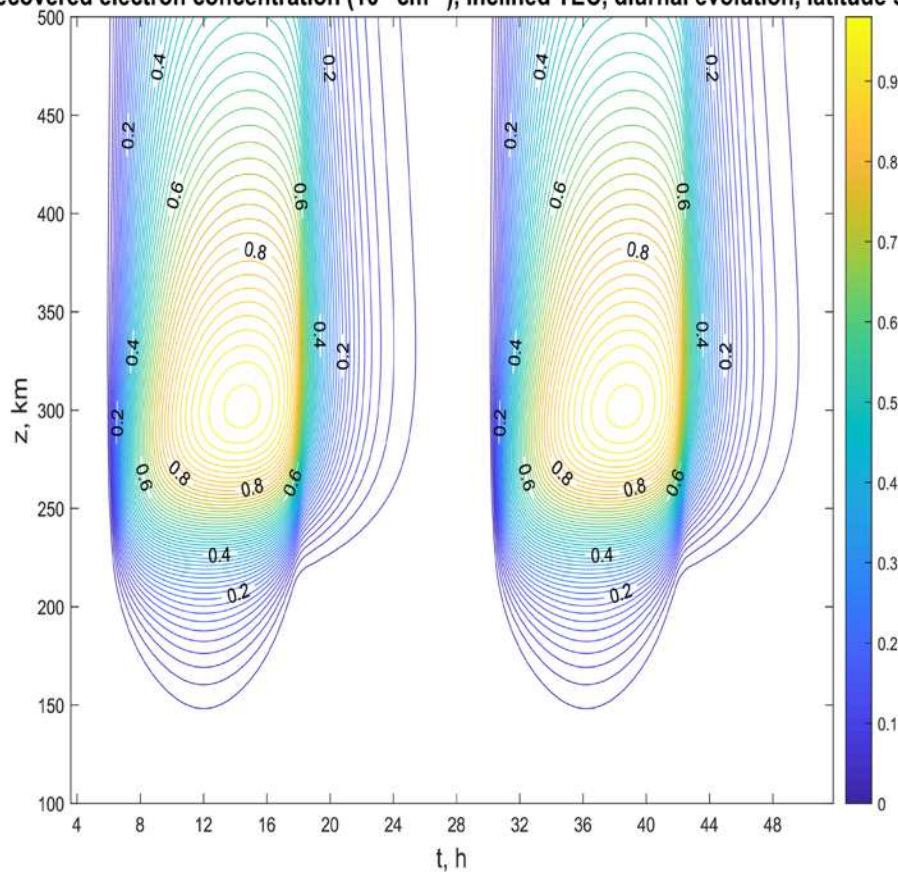
Заданы **вертикальные** интегралы электронного содержания (vTEC), искомое решение – слабо возмущенный профиль $(1 + 0,1 \cdot \sin(\pi(z - 100)/500))$

равноденствие, март, полдень

восстановленная концентрация электронов

ошибка восстановления (<2%)

Recovered electron concentration (10^6 cm^{-3}), inclined TEC, diurnal evolution, latitude 53° Calculated profile minus Reference profile (10^4 cm^{-3}), inclined TEC, diurnal evolution, latitude 53°



Усвоение данных для модели F слоя ионосферы

Результаты тестовых численных экспериментов

Исследование точности алгоритма усвоения, суточный ход

Контрольные «данные наблюдений» – возмущенные решения прямой задачи

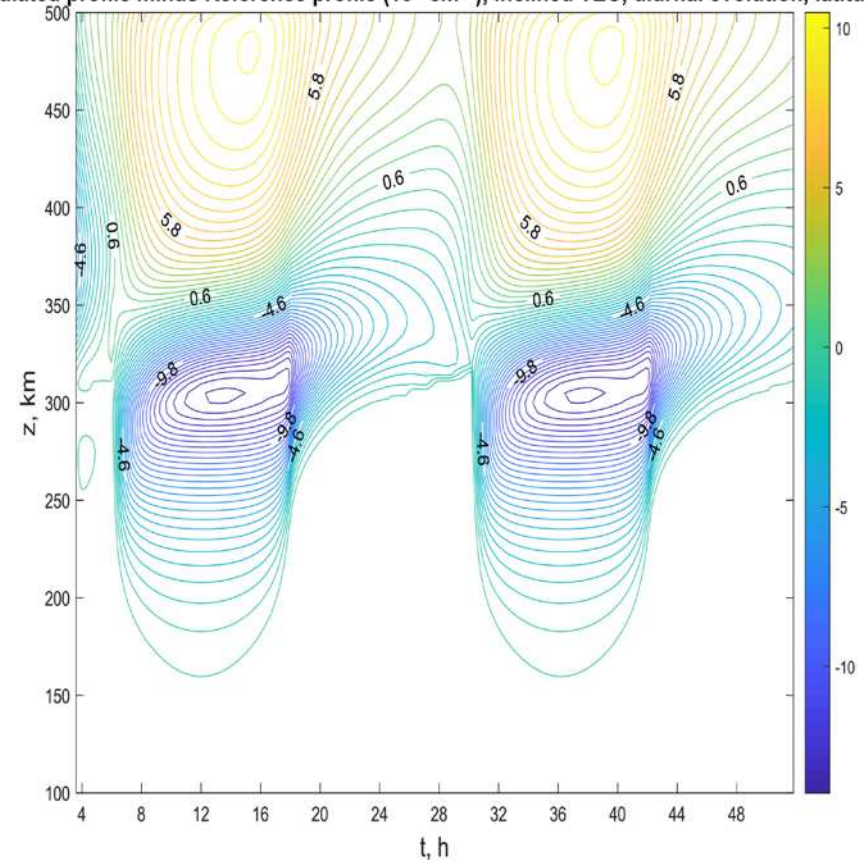
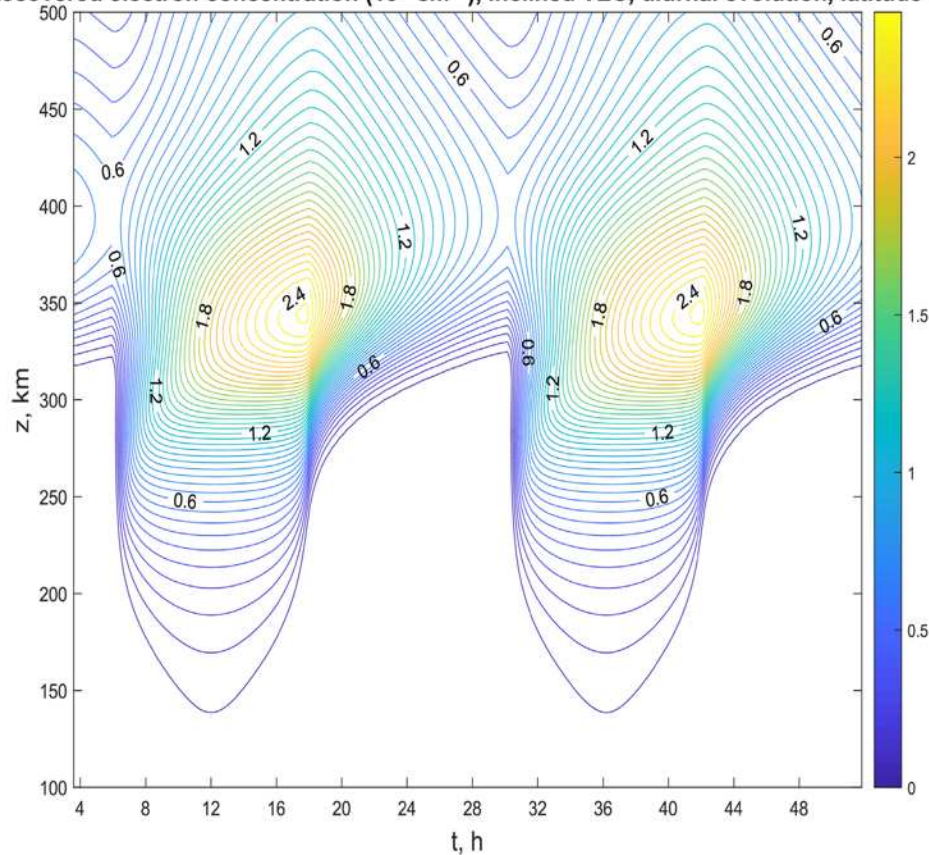
Заданы **вертикальные** интегралы электронного содержания (vTEC), искомое решение – слабо возмущенный профиль $(1 + 0,1 \cdot \sin(\pi(z - 100)/500))$

восстановленная концентрация электронов

равноденствие, март, полдень

ошибка восстановления (<5%)

Recovered electron concentration (10^6 cm^{-3}), inclined TEC, diurnal evolution, latitude 0° Calculated profile minus Reference profile (10^4 cm^{-3}), inclined TEC, diurnal evolution, latitude 0°



Усвоение данных для модели F слоя ионосферы

Результаты тестовых численных экспериментов

Исследование точности алгоритма усвоения

Контрольные «данные наблюдений» – возмущенные решения **прямой задачи**

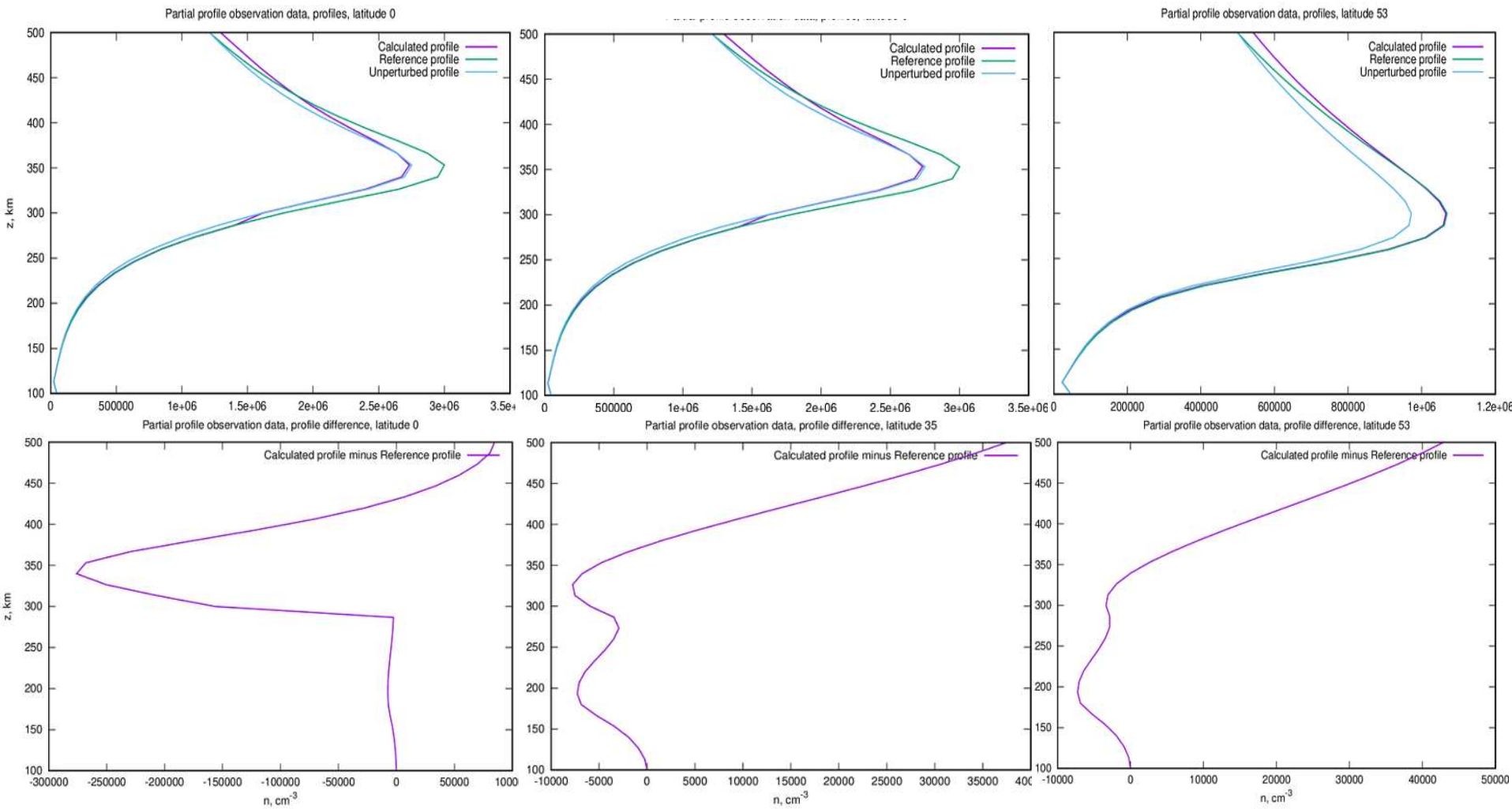
Заданы **частичные вертикальные профили** (реалистичные данные ионозондов и т.п.),

искомое решение – уменьшение на 20% (по всему вертикальному профилю) *равноденствие, март, полдень*

0° lon ошибки < 9%

35° lon ошибки < 3%

70° lon ошибки < 3%



Основные результаты для задачи разработки системы усвоения данных для модели ионосферы

- Рассмотрена постановка задачи вариационной ассимиляции данных наблюдения об интегралах электронной плотности, показана её плотная разрешимость построен итерационный алгоритм решения регуляризованной задачи. Доказана сходимость сеточных решений к псевдорешению конечно-разностной задачи при стремлении параметра регуляризации к нулю.
- Разработаны и исследованы конечно-мерные аппроксимации диффузионных операторов для прямого и сопряженного уравнений. Показана устойчивость и сходимость разработанного численного метода решения задачи оптимальности к решению дифференциальной задачи при измельчении сетки
- Проведены контрольные численные эксперименты по восстановлению профилей по известным тестовым данным для оценки точности и эффективности реализации системы усвоения, показано высокое качество восстановления распределения электронной концентрации в областях с существованием данных наблюдений.
- Разработана первая версия трехмерной модели усвоения реальных данных, и проведены первые численные эксперименты с усвоением данных о наклонных ПЭС