

# Динамическое моделирование земной ионосферы

Останин Павел Антонович

Научный руководитель: Кулямин Дмитрий Вячеславович

# Постановка задачи

Основные задачи:

- Построение динамической трёхмерной модели Земной ионосферы;
- Согласование с уже разработанной моделью нейтральной термосферы ИВМ РАН.

Уравнение, описывающее эволюцию ионной концентрации:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_i}{\partial t} = & -\operatorname{div}(n_i \vec{u}_{\parallel}) - \operatorname{div} \left( n_i \frac{1}{B^2} [\vec{E} \times \vec{B}] \right) + \\ & + \operatorname{div} \left( D \left[ \nabla_{\parallel} n_i + n_i \frac{1}{T_p} \nabla_{\parallel} T_p - \frac{n_i m_i}{2k T_p} \vec{g}_{\parallel} \right] \right) + [P - k_i n_i] \end{aligned}$$

## Уравнение в сферических координатах в приближении тонкого сферического слоя

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = DYZ(n_i) + DTr(n_i) + Tr(n_i) + [P - kn_i].$$

$$Tr(n_i) = \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[ n_i \frac{1}{B} (E_y \sin l + E_z \cos l) \right] + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ \left( u_z \sin l \cos l - u_y \cos^2 l - \frac{E_x}{B} \sin l \right) n_i \cos \varphi \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( u_y \cos l \sin l - u_z \sin^2 l - \frac{E_x}{B} \cos l \right) n_i \right];$$

$$DYZ(n_i) = \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( D \cos \varphi \left[ \frac{1}{a} \frac{\partial n_i}{\partial \varphi} \cos^2 l - \frac{\partial n_i}{\partial z} \cos l \sin l \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \left[ \frac{\partial n_i}{\partial z} \sin^2 l - \frac{1}{a} \frac{\partial n_i}{\partial \varphi} \cos l \sin l \right] \right);$$

$$DTr(n_i) = \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ \left( \frac{1}{a} \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial \varphi} \cos^2 l - \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial z} \cos l \sin l - \frac{1}{H} \sin l \cos l \right) D n_i \cos \varphi \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( - \frac{1}{a} \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial \varphi} \cos l \sin l + \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial z} \sin^2 l + \frac{1}{H} \sin^2 l \right) D n_i \right].$$

## Метод расщепления

- На первом шаге расщепления решается уравнение для  $z$ -диффузии в проекции со смешанной производной;

$$\frac{\partial n}{\partial t} = P - kn + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D \sin^2 I \left( \frac{\partial n}{\partial z} + \left( \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial z} + \frac{1}{H} \right) n \right) - \right. \\ \left. - \frac{1}{a} D \sin I \cos I \left( \frac{\partial n}{\partial \varphi} + \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial \varphi} n \right) \right]$$

- На втором шаге добавляется диффузия по  $y$ .
- На третьем шаге добавляется перенос.

# Воспроизведение дневного вертикального профиля электронной концентрации

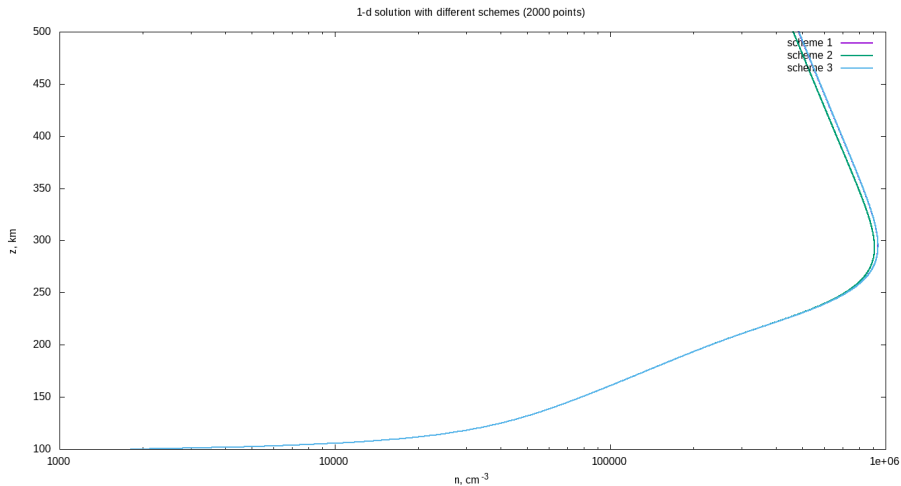


Рис. 1: Стационарные решения на 2000 расчётных узлах.

## Чувствительность к изменению внешних параметров

Варьирование входящих в уравнение температур показывает, что наибольшую чувствительность решение имеет к температуре нейтральных молекул.

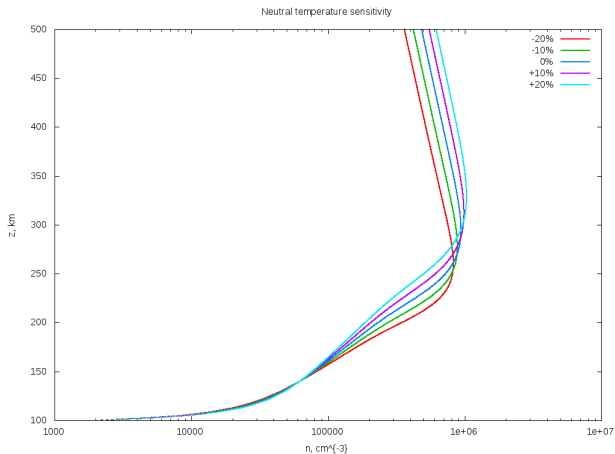


Рис. 2: Чувствительность к изменению температуры нейтральных молекул.

## Моделирование суточного хода

Вычисляется стационарное решение одномерной задачи при дневном значении  $P(z)$ , затем итерации по времени продолжаются с меняющимся  $P(z, t)$ .

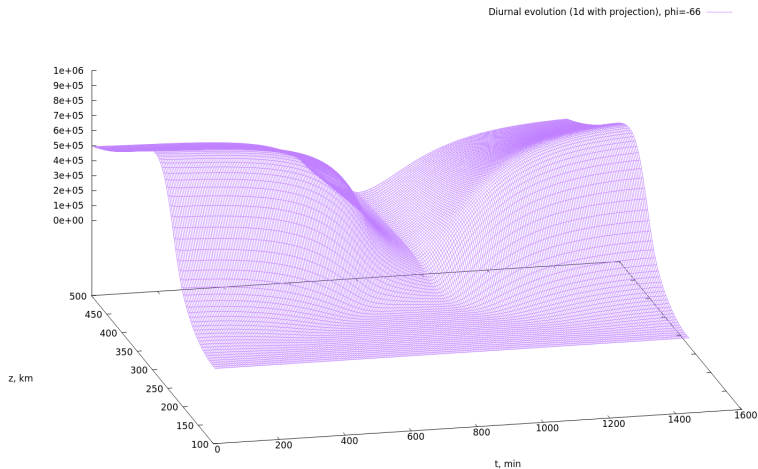


Рис. 3: Суточный ход в одномерной модели с учётом проекции,  $\varphi = -66^\circ$ .