

# Динамическое моделирование земной ионосферы

Останин Павел Антонович

Выпускная квалификационная работа

Научный руководитель: Кулямин Дмитрий Вячеславович

# Введение

Основные задачи:

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

Актуальность задачи обусловлена особой ролью состояния ионосферы в следующих отраслях:

- Системы глобальной радиосвязи;
- Спутниковые системы;
- Космическая отрасль.

## Постановка задачи

Используемые приближения:

- Динамическое преобладание амбиполярной диффузии;
- Одноионная постановка, квазинейтральность плазмы;
- Дипольное магнитное поле Земли;
- Приближение совпадения географических и магнитных полюсов;

Уравнение, описывающее эволюцию ионной концентрации:

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

## Входящие в уравнение параметры

Для функций  $P$ ,  $k$ , температур и концентраций  $N_2$ ,  $O_2$  и  $O$  используются аналитические формулы:

- $$T(z) = T_\infty - (T_\infty - T_0) \exp\left(-\frac{g}{RT_\infty}(z - z_0)\right),$$

$$T_{n\infty} = 800 \text{ K}, T_{i\infty} = 950 \text{ K}, T_{e\infty} = 2200 \text{ K}.$$

- Для концентраций — Больцмановское распределение:

$$n_{O_2, N_2, O}(z) = n_{O_2, N_2, O}(z_0) \cdot \exp\left(-\frac{M_{O_2, N_2, O} g}{R_0 T_n}(z - z_0)\right).$$

На высоте 100 км  $n_{O_2} = 5,6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ ,  $n_O = 2,8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  
 $n_{N_2} = 5,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

- В дневное время  $P = 4 \cdot 10^{-7} n_O(z)$ ;  
 $k = 1,2 \cdot 10^{-12} n_{N_2}(z) + 2,1 \cdot 10^{-11} n_{O_2}(z)$

## Требования к схемам и свойства решения

- Концентрация неотрицательна, для сохранения этого свойства используем монотонные (по Годунову) схемы;
- Уравнение имеет закон сохранения массы, схемы должны быть консервативны;
- Характерные времена на нижней и верхней границах отличаются на несколько порядков, по времени используем неявные схемы;
- При постоянных  $P$  и  $k$  уравнение имеет стационарное решение.

# Метод расщепления

- На первом шаге расщепления решается уравнение для  $z$ -диффузии в проекции со смешанной производной;
- В результате первых двух шагов решается двумерная  $y - z$ -постановка без нейтрального и поперечного переноса;
- На третьем шаге добавляется перенос.

# Первый шаг метода расщепления, три постановки

Первое приближение: диффузия вдоль оси  $z$ :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = P - kn + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial n}{\partial z} + \left( \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial z} + \frac{1}{H} \right) n \right)$$

Следующий шаг — учёт широтной зависимости: замена  $D$  на  $D \sin^2 I$  ( $I \approx \arctg(2 \operatorname{tg} \varphi)$ ):

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

Более точный учёт широтной зависимости:  $z$ -диффузия в проекции (со смешанной производной):

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

## Используемые схемы

Для аппроксимации диффузионного слагаемого используется схема

$$\frac{\partial}{\partial z} D \frac{\partial n}{\partial z} \approx \frac{1}{h_{i+1/2}} \left( \frac{D_{i+1/2}(n_{i+1} - n_i)}{h_i} - \frac{D_{i-1/2}(n_i - n_{i-1})}{h_{i-1}} \right)$$

Для одномерного уравнения исследованы следующие схемы:

- В схеме 1 потоковый член и граничное условие аппроксимируются с помощью направленных разностей;
- В схеме 2 потоковый член аппроксимируется центральной разностью, граничное условие — направленной разностью;
- Схема 3 имеет согласованные граничное условие и схему, записанные с помощью центральных разностей.

Для уравнения со смешанной производной вводится

$$u_\varphi = -\frac{1}{a} D \sin l \cos l \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \varphi}$$

— нелинейная добавка к эффективной скорости.



# Воспроизведение дневного вертикального профиля электронной концентрации

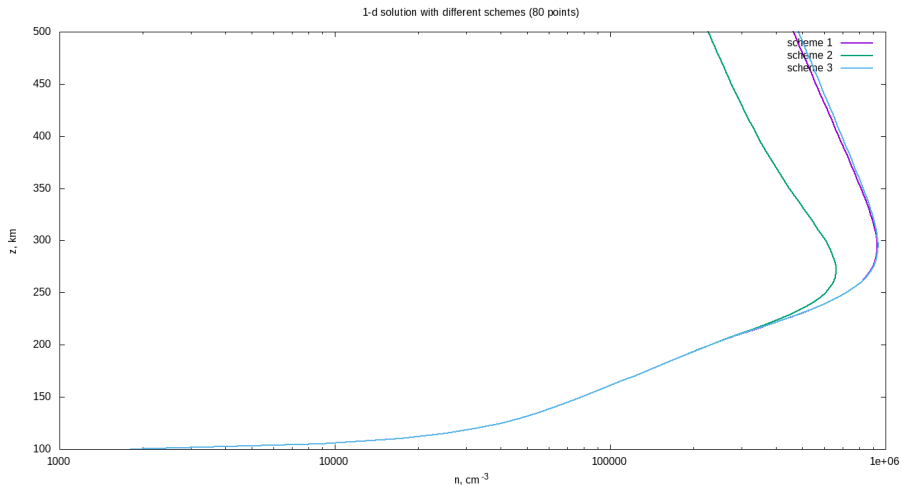


Рис. 1: Стационарные решения на 80 расчётных узлах.

# Воспроизведение дневного вертикального профиля электронной концентрации

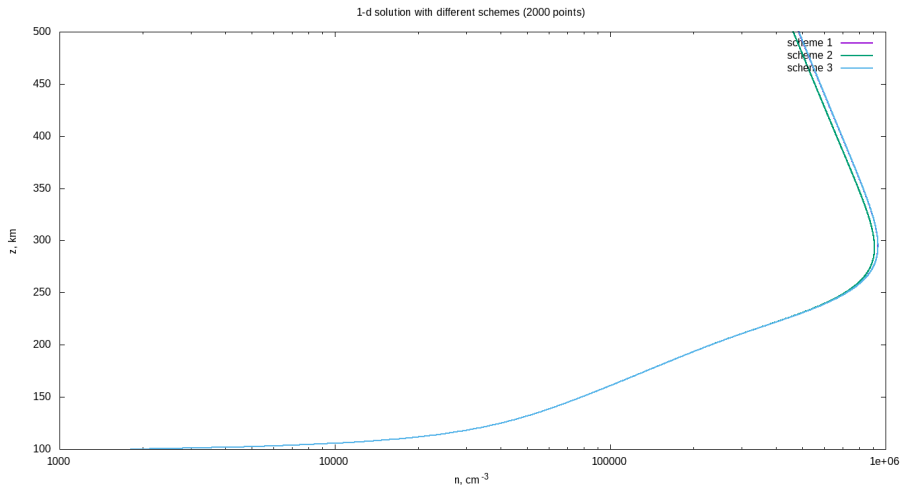


Рис. 2: Стационарные решения на 2000 расчётных узлах.

## Чувствительность к изменению внешних параметров

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

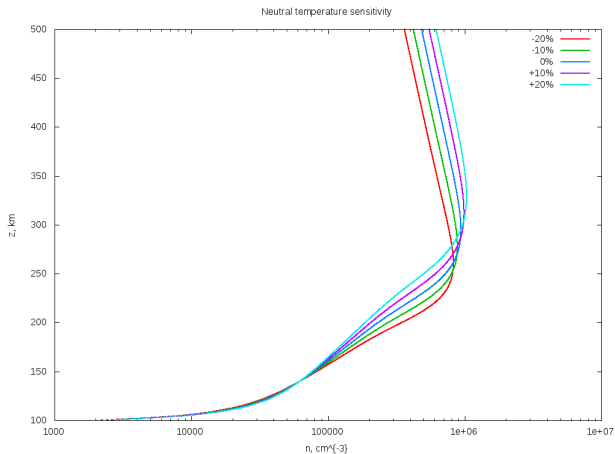


Рис. 3: Чувствительность к изменению температуры нейтральных молекул.

# Чувствительность к изменению внешних параметров

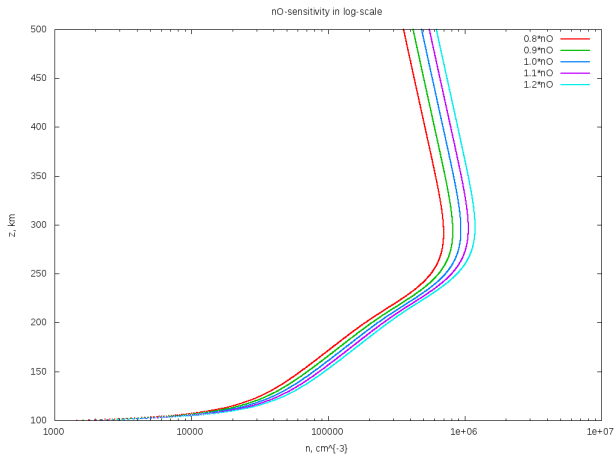
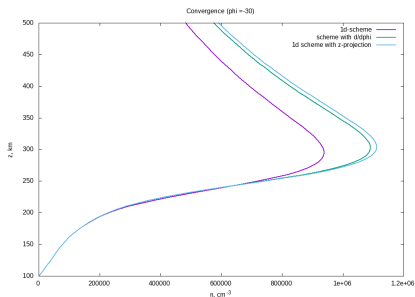


Рис. 4: Чувствительность к изменению концентрации атомарного кислорода.

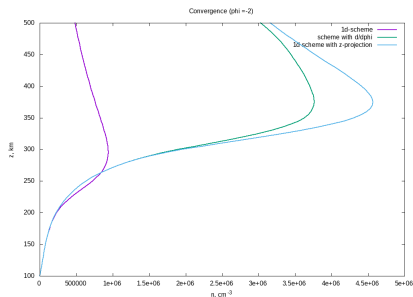
## Учёт широтной зависимости

Различные постановки используются для учёта наклона магнитных силовых линий.

Полученные стационарные решения при широтах  $\varphi = -30^\circ$  и  $\varphi = -2^\circ$ :



$$\varphi = -30^\circ.$$



$$\varphi = -2^\circ.$$

## Моделирование суточного хода

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

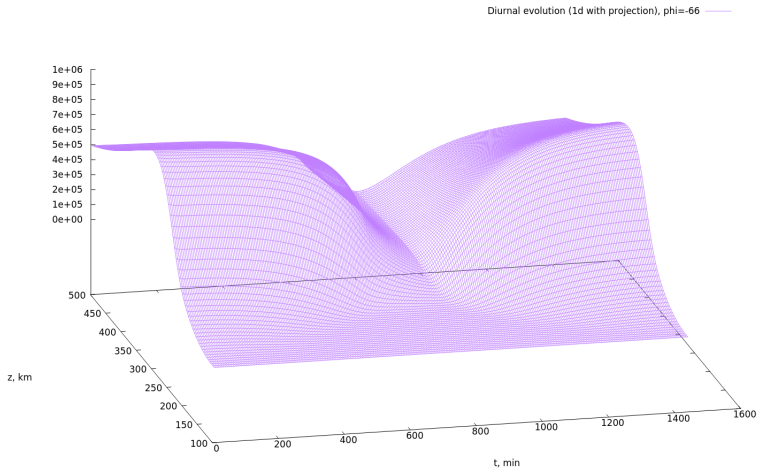


Рис. 5: Суточный ход в одномерной модели с учётом проекции,  $\varphi = -66^\circ$ .

# Моделирование суточного хода

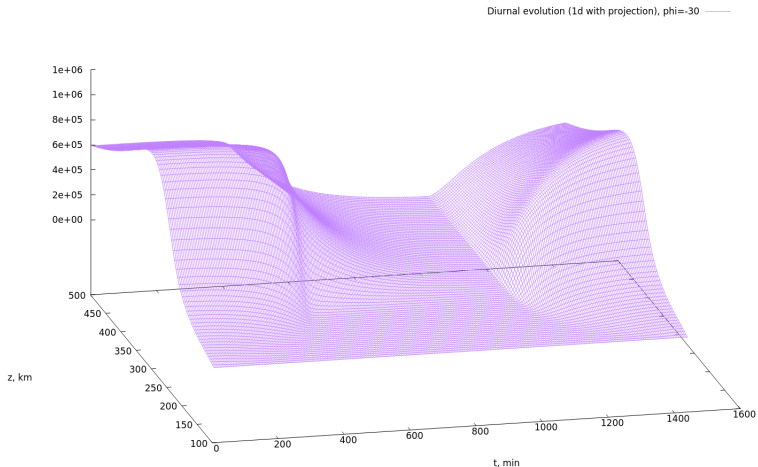


Рис. 6: Суточный ход в одномерной модели с учётом проекции,  $\varphi = -30^\circ$ .

## Список использованной литературы

1. *Kulyamin D. V. and Dymnikov V. P.* A three-dimensional model of general thermospheric circulation. // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. — 2013. — 28(4). — С. 353-380.
2. *Кулямин Д. В., Дымников В. П.* Моделирование климата нижней ионосферы. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2015. — Т. 51(3). — С. 317–337.
3. *Schunk R.W., Nagy A.F.* IONOSPHERES Physics, Plasma Physics, and Chemistry. — New York, United States: Cambridge University Press, 2009. — 628 p.
4. *Холодов А. С., Холодов Я. А.* О критериях монотонности разностных схем для уравнений гиперболического типа. // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2006. — Т. 46, № 9. — С. 1560-1588.
5. *Федоренко Р. П.* Введение в вычислительную физику: Учебное пособие для вузов / Под ред. А. И. Лобанова. — 2-е изд., испр. и доп. — Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008. — 504 с.
6. *Калиткин Н. Н.* Численные методы: учеб. пособие. — 2-е изд., исправленное. — СПб.: БХВ-Петербург, 2014. — 592 с.



Спасибо за внимание!