

Обратная задача восстановления поля электронной концентрации с использованием данных о ТЕС

Останин П. А.

МФТИ, Москва, Россия
ИПГ РАН, Москва, Россия
ostanin.pavel.@phystech.edu

В данном докладе рассматривается задача восстановления поля электронной плотности в модели ионосферы Земли INM-IM, а также система вариационного усвоения данных о полном электронном содержании вдоль заданного набора лучей «станция-спутник».

Модель INM-IM [1] основана на решении уравнения неразрывности в стандартных для ионосферы предположениях (квазинейтральность плазмы, одноионная формулировка модели, а также рассмотрение амбиполярной диффузии вдоль магнитных силовых линий как основного динамического процесса). Уравнение модели имеет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} - \nabla(K\nabla n) - \frac{\partial}{\partial z}(u \cdot n) - \frac{\partial}{\partial y}(v \cos \varphi \cdot n) + Tr(n) + kn = P_0 + U, \\ n|_{t=0} = n_0, \\ \left(K_1^2 \frac{\partial n}{\partial z} - K_1 K_2 \frac{\partial n}{\partial y} - un \right) \Big|_{z=z_t, z_b} = 0, \end{cases}$$

где n – электронная концентрация, $K = \begin{pmatrix} K_1^2 & -K_1 K_2 \\ -K_1 K_2 & K_2^2 \end{pmatrix}$ – матрица эффективных коэффициентов диффузии, z и φ – высота и широта, t – время, P – функция фотоионизации, k – коэффициент рекомбинации, Tr – оператор трёхмерного переноса нейтральным ветром и электромагнитным дрейфом, u и v – скорости, отвечающие гравитационному оседанию, U – управление. Задача решается в сферическом слое $\Omega = \{(z, \varphi, \lambda) \mid z \in [z_b, z_t]\}$, где $z_b = 100$ км, $z_t = 500$ км.

Рассматривается обратная задача следующего вида: найти электронную концентрацию n и управление U , удовлетворяющие уравнению модели, а также условиям наблюдений – известны интегралы от n вдоль заданного набора прямолинейных лучей, соединяющих спутники со станциями на поверхности Земли:

$$\int_{\Omega_k} n(z, \varphi, t) d\Omega = Tec_k(t) \quad \forall t \in (0, T), k = 1, \dots, N.$$

Построен итерационный алгоритм решения регуляризованной по Тихонову задачи, на каждом шаге которого решается система прямых и сопряжённых уравнений. В ходе итерационного процесса минимизируется функционал

$$J(U) = \alpha \|U\|_{L_2(\Omega \times (0, T))}^2 + \|Cn(U) - Tec\|_{L_2(0, T)}^2,$$

где C – оператор наблюдений, Tec – векторная функция, имеющая компоненты Tec_k , $\alpha \geq 0$ – параметр регуляризации. Помимо модельных экспериментов [2] рассмотрены первые результаты численных экспериментов по восстановлению поля электронной концентрации на основе данных глобальных навигационных систем.

Список литературы

1. Kulyamin D. V., Dymnikov V. P., Ostanin P. A. INM-IM: INM RAS Earth ionosphere F region dynamical model // Rus. J. of Num. Analys. and Math. Model. 2022, V. 37, № 6, P. 349–362.
2. Дымников В. П., Кулямин Д. В., Останин П. А., Шутяев В. П. Усвоение данных для двумерного уравнения амбиполярной диффузии в модели ионосферы Земли // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2023, Т. 63, № 5, С. 803–826.