УДК:519.6

Моделирование F слоя Земной ионосферы

П. А. Останин1

1Московский физико-технический институт (государственный университет)

В работе рассмотрены методы решения уравнений динамической модели F слоя Земной ионосферы, являющейся вычислительным блоком совместной модели термосферы-ионосферы. Информация о состоянии системы термосфера-ионосфера требуется для решения ряда задач космической отрасли, определяет характеристики движения низкоорбитальных спутников, а также играет определяющую роль для навигационных систем и радиосвязи, что обуславливает актуальность задачи.

Основное уравнение модели представляет собой уравнение неразрывности для концентрации свободных электронов. В работе рассмотрен только F слой ионосферы, при этом используются стандартные приближения относительно этой области: одноионная формулировка модели (в силу фотохимического преобладания ионизации атомарного кислорода и рекомбинации его иона с главными компонентами воздуха), квазинейтральности плазмы (в силу которой предполагается равенство электронной и ионной концентраций ), преобладание амбиполярной диффузии вдоль магнитных силовых линий среди динамических процессов, преобладание электромагнитного поперечного дрейфа в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля, а также приближение дипольного магнитного поля Земли и совпадение географических и магнитных полюсов. В этих предположениях уравнение неразрывности можно записать в виде:

(1)

Здесь  – коэффициент амбиполярной диффузии,  – частота столкновений  с нейтралами,  – атомная масса иона,  – гравитационное поле Земли,  – электрическое поле внешней природы,  – магнитное поле Земли,  – скорость нейтрального ветра,  – температура нейтралов,  – полусумма электронной и ионной температур, индекс  отвечает проекции на силовые линии поля  [3]. Слагаемые  выражают процессы ионизации  в  и рекомбинации. Температуры  вычисляются по аналитическим формулам, согласующимся с эмпирическими данными.

В данной работе уравнение (1) записывается в сферической системе координат в приближении тонкого сферического слоя. Такой выбор системы координат согласован с постановкой модели циркуляции термосферы. В основу численного моделирования положен метод расщепления по физическим процессам. Первый шаг расщепления включает процесс амбиполярной диффузии и плазмохимические процессы. Второй шаг расщепления отвечает трёхмерному адвективному переносу, связанному с электромагнитным дрейфом и нейтральным ветром. В работе рассматривается первый шаг расщепления как отдельная двумерная задача, в первом приближении описывающая динамику ионосферы. Особенности рассматриваемого уравнения приводят к тому, что требуется использовать монотонные и консервативные схемы.

Уравнение амбиполярной диффузии со включением плазмохимических процессов, отвечающее первому шагу расщепления, имеет вид

,

где





В качестве краевых условий на нижней границе ставится условие Дирихле: , а на верхней границе смешанное условие вида:



Пространственная аппроксимация системы реализуется на девятиточечном шаблоне, причем для диффузионных слагаемых используется стандартная консервативная аппроксимация второго порядка точности, а для смешанных производных используется схема, представляющая собой полусумму аппроксимаций смешанной производной в точках с дробными индексами. Производная  в верхнем краевом условии аппроксимируется по тому же принципу.

В работе рассмотрены два метода аппроксимации по времени. Первый метод использует неявную схему первого порядка, что позволяет выбирать шаги по времени, согласованно с моделью термосферы. Для решения возникающих систем линейных уравнений используется стабилизированный метод бисопряженных градиентов. Второй метод представляет метод расщепления, использование которого обусловлено применением в задаче усвоения данных. Расщепление производится для дифференциально-разностной задачи с отнесением диффузии вдоль вертикали и обеих смешанных производных к первому шагу, а оставшейся части оператора ко второму шагу. Для решения систем на обоих шагах использованы одномерные прогонки. Уменьшение ошибки аппроксимации достигается с помощью двуциклического варианта.

Для верификации численной реализации и исследования точности применяемых схем рассмотрена модельная задача, правая часть которой рассчитана по заданному точному решению, которое на качественном уровне отражает характеристики реальной ионосферы. Численные эксперименты показали, что максимальная численная ошибка обоих методов наблюдается в области приэкваториальных широт в верхних слоях ионосферы, а также в области полюсов, причем структуры распределения ошибки близки для обоих методов. Для метода расщепления ошибка аппроксимации по времени выше, а для достижения той же точности, что и в неявной схеме, необходимо выбирать шаг по времени порядка 1 с. При этом точность в 10% достигается при шагах по времени порядка 30 сек.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01305).

Литература

1. *Kulyamin D. V., Dymnikov V. P.* A three-dimensional model of general theromspheric circulation // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling 2013. V. 28(4). P. 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: Cambridge University Press, 2008, 628 c.
4. *Останин П. А., Кулямин Д. В., Дымников В. П.* Численное моделирование F слоя Земной ионосферы // Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2017, 2017. С. 121-124.