**2.1 Задачи и актуальность**

Моя работа посвящена созданию модели F слоя Земной ионосферы. Эта работа проводится в рамках задачи создания совместной модели термосферы-ионосферы со включением последней как вычислительного блока.

Рассматривается задача моделирования верхних слоёв, а именно F слоя, приблизительно от 130 до 600. Основное содержание работы включает формулирование полной системы уравнений модели, описание методов ее решения и их сравнение.

Рассмотрение моделей Земной системы подразумевает включение новых областей, в частности верхних слоев атмосферы ионосферы. Это важно для ряда задач космической отрасли, спутниковой коммуникации, радиолокации, навигации.

Задача описания ионосферы традиционно решается на основе экспериментальных данных с построением эмпирических моделей, не учитывающих изменчивость среды. На сегодняшний день общий уровень развития таких моделей ниже по сравнению с существующими моделями для нижних слоев атмосферы.

**Приближения и векторное уравнение**

Представленная модель ионосферы основывается на нескольких приближениях.

1. рассматривается только F слой ионосферы
2. используется одноионная формулировка*;*
3. предполагается квазинейтральность плазмы и динамическое преобладание амбиполярной диффузии вдоль B и дипольное приближение магнитного поля.

Уравнение неразрывности для электронной концентрации имеет следующий вид.

**Полное уравнение с учетом трёхмерного переноса**

Полное уравнение неразрывности с учетом трехмерного переноса плазмы при указанных выше приближениях представлено на слайде:

В основу положен метод расщепления по физ. процессам. На первом этапе рассматривается амбиполярная диффузия и плазмохимия. На втором этапе описывается трехмерный перенос. При таком подходе первый этап рассматривается как самостоятельная приближённая модель. ***Сначала будет рассмотрена эта модель.***

**2.2 Особенности системы уравнений модели ионосферы**

Рассматриваемые уравнения содержит ряд особенностей:

1. Основное уравнение представляет баланса массы, поэтому должны выполняется соответствующие интегральные соотношения.
2. Задача имеет геометрические особенности: выделенные направления движения.
3. Коэффициент диффузии и др. параметры экспоненциально меняются с высотой.
4. Характерные времена плазмохимических процессов малы (порядка секунд).
5. Решение рассматриваемой системы в силу физического смысла неотрицательно.

**3. Метод численной реализации модели**

Рассмотрим двумерную задачу амбиполярной диффузии и плазмохимии. Одна из основных сложностей – наличие смешанных производных.

Построена аппроксимация смешанных производных со вторым порядком, для которых при постоянстве коэффициентов имеет место разностный аналог интегрального соотношения выше.

Аппроксимация строится как полусумма смешанных производных по квадратам в зависимости от знака коэффициента *(показать на слайде).*

**3.2 Аппроксимация по времени**

Исследованы два метода аппроксимации по времени. В первом методе использована неявная схема, которая позволяет выбрать достаточно большой шаг по времени. Для решения линейной системы использовался стабилизированный метод бисопряженных градиентов.

Во втором методе применено расщепление: на первом шаге диффузия в проекции на вертикальную ось и смешанные производные + плазмохимия. На втором шаге диффузия вдоль широты. Обе задачи решаются одномерными прогонками.

Для исследования точности рассмотрено модельное решение, на качественном уровне отражающее поведение реального решения.

**4. Результаты численных экспериментов по исследованию двумерной задачи амбиполярной диффузии**

На рис. приведены распределения ошибок в численном моделировании. Ошибка обоих методов сосредоточена в средних широтах. Итерационный метод показал более высокую точность для данной постановки. Для метода расщепления та же точность достигается при t порядка 1 сек. При этом точность в 10% достигается при шагах 30 сек.

**5. Перенос нейтральным ветром**

Следующая стадия построения модели заключается в учете трёхмерного переноса, входящего в полное уравнение динамики электронной концентрации. Для этого применяется расщепление, в котором к первому шагу отнесена амбиполярная диффузия с применением неявной аппроксимации по времени, а ко второму шагу задача моделирования переноса. Для решения уравнения переноса используется модификация схемы КАБАРЕ на сферическом слое с нелинейной коррекцией. Такая модификация обладает свойствами консервативности и монотонности и имеет второй порядок аппроксимации по пространству.

Для исследования точности полученной схемы аналогично случаю двумерной диффузии выбирается стационарное модельное решение и исследуется разница точного решения дифференциальной задачи и полученного в модели численного стационарного решения.

Результаты показали, что действительно имеет место сходимость с первым порядком по tau. При этом (при характерном шаге по времени 30 секунд) наблюдается значительно меньшая ошибка, чем при расщеплении амбиполярной диффузии на два шага, что позволяет надеяться на большую практичность и применимость такого расщепления полного оператора уравнения. Отметим, что с целью проверки поле скорости в модельной задаче заведомо выбиралось по модулю большим, чем скорость нейтрального переноса в реальной задаче. При этом для выполнения ограничения на число Куранта c<1/2 делался один шаг амбиполярной диффузии и несколько шагов адвекции.

Помимо теста по сходимости к стационарному решению проведена дополнительная проверка: правая часть уравнения задавалась так, чтобы подобранная модельная функция давала стационарное решение, после чего в части кода, реализующего адвекцию, скорости переноса занулялись. Модель сходилась к некоторому стационарному решению, вообще говоря, другому. В таком тесте проверялся вклад переноса. Результаты показали существенную ошибку в вычисленном стационарном решении, что и ожидалось.

**6. Заключение**

Кратко сформулируем основные результаты работы.

* Создана первая версия трёхмерной динамической модели F слоя на основе решения уравнения амбиполярной диффузии в сферических координатах с учетом нейтрального ветра, сформулированы основные уравнения модели, предложен алгоритм поэтапной реализации.
* Разработаны и реализованы два метода численного интегрирования двумерной модели, включающей только амбиполярную диффузию и плазмохимию, проведено сравнение точности разработанных методов на основе аналитического решения.
* Реализован алгоритм численного решения трёхмерного уравнения, включающего амбиполярную диффузию и перенос нейтральным ветром. Применено расщепление оператора на две части, для решения уравнения переноса использована схема КАБАРЕ.