**2.1 Задачи и актуальность**

Мой доклад посвящён созданию модели F слоя Земной ионосферы. Эта работа проводится в рамках задачи создания совместной модели термосферы-ионосферы на основе представленной модели ионосферы как вычислительного блока.

В работе рассматривается задача моделирования верхних слоёв (F слой, высоты 130-600 км). Основное содержание моего доклада включает формулирование полной системы уравнений модели, описание методов ее решения и их сравнение.

Переход от климатических моделей к моделям Земной системы подразумевает включение в современные модели новых областей, в том числе верхних слоев атмосферы и моделей ионосферы. Появление таких моделей важно для ряда задач: информация о состоянии термосферы и ионосферы требуется для задач космической отрасли, спутниковой радиокоммуникации, а также радиолокации, поскольку оно частично определяет характеристики движения низкоорбитальных спутников. Оно определяет и условия для распространения радиосигналов для систем радиосвязи и навигации.

Задача описания ионосферы традиционно решается на основе экспериментальных данных с построением эмпирических моделей: они описывают глобальное состояние в определенных условиях и не учитывают изменчивость среды, но широко применяются для решения прикладных задач. На сегодняшний день общий уровень развития моделей верхней атмосферы ниже по сравнению с моделями для нижних слоев атмосферы.

**Приближения и векторное уравнение**

Представленная модель ионосферы основывается на следующих приближениях:

1. рассматривается только F слой ионосферы Земли, как зона максимального содержания электронов и как ключевая область практического интереса
2. используется одноионная формулировка модели в силу преобладания атомарного кислорода O и рекомбинации его иона;
3. предполагается локальная квазинейтральность плазмы и динамическое преобладание амбиполярной диффузии вдоль магнитных линий;
4. предполагается дипольное приближение формы магнитного поля.

Полученное с учетом всех приближений уравнение неразрывности для электронной концентрации в F слое ионосферы имеет вид:

В основу положен метод расщепления по физ. процессам: амбиполярной диффузии и адвективного переноса. На первом этапе рассматривается амбиполярная диффузия и плазмохимия. На втором этапе описывается трехмерный перенос. При таком подходе первый этап рассматривается как самостоятельная приближённая модель. Эта модель и рассматривается в данной работе.

**Полное уравнение без учета трёхмерного переноса**

Полное уравнение неразрывности без учёта трехмерного переноса плазмы при указанных выше приближениях из общего уравнения (2) в данной системе координат:

В качестве краевых условий принимаем условие Дирихле на нижней границе, а на верхней границе ставятся условия третьего рода: задание полного потока:

**2.2 Особенности системы уравнений модели ионосферы**

Постановка уравнений содержит ряд особенностей:

1. Основное уравнение является представлением баланса массы, для искомого распределения должны выполняется соответствующие интегральные соотношения.
2. Задача имеет геометрические особенности, связанные с выделенным направлениям движения (вдоль магнитной линии).
3. Характерные значения коэффициента диффузии и других параметров экспоненциально меняются с высотой на 6 порядков.
4. Характерные времена плазмохимических процессов малы (порядка секунд).
5. Решение рассматриваемой системы в силу физического смысла неотрицательно.

Следствием особенностей 3 и 4 является то, что рассматриваемая задача обладает существенной жесткостью.

**3. Метод численной реализации модели**

Построенная аппроксимация смешанных производных со вторым порядком, для которых при постоянстве коэффициентов диффузии также имеет место диффузия вдоль направления силовой линии.

Искомая аппроксимация строится следующим образом: аппроксимация строится как полусумма аппроксимаций смешанной производной второго порядка.

Рассмотренный выше метод применен и для аппроксимации производной  в верхнем краевом условии, согласованной с аппроксимацией уравнения во всей области.

**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 задача диффузии в проекции на вертикальную ось *z* + смешанные производные и плазмохимия .На втором шаге задача диффузии вдоль широты.

Такое расщепление позволяет естественным образом расщепить краевые условия. Обе задачи решаются одномерными прогонками вдоль соответствующих направлений.

Для исследования точности схем рассмотрим модельное решение, на качественном уровне отражающее поведение реальной ионосферы при решении исходной задачи. Для фиксированного дневного распределения вблизи нижней границы имеет место резкий рост содержания электронов с высотой до максимума F слоя, выше него наблюдается экспоненциальное падение, связанное с преобладанием диффузии. В широтном направлении наблюдается максимум распределения в экваториальной области. С учётом этого было выбрано модельное

**4. Результаты численных экспериментов**

На рис.приведены распределение ошибок по результатам численных экспериментов на сетке с шагом  км по высоте и шагом  по широте. Численная ошибка обоих методов сосредоточена в средних широтах и приэкваториальной области.

Итерационный метод показал более высокую точность для данной постановки задачи. Для метода расщепления ошибка аппроксимации при сравнимых шагах по времени больше, для достижения той же точности, что и в неявной схеме, необходимо выбирать шаг по времени порядка 1 сек. При этом точность в 10%, которая считается приемлемой в задачах моделирования F слоя [1,2], достигается при шагах по времени порядка 30 сек.

**5. Заключение**

В настоящей работе мы исследовали методы решения системы уравнений, описывающих динамику F слоя Земной ионосферы в приближении амбиполярной диффузии. Коротко сформулируем основные результаты работы.

* Создана первая версия двумерной динамической модели F слоя на основе решения уравнений динамики плазмы в приближении амбиполярной диффузии в сферических геомагнитных координатах, сформулированы основные уравнения модели и предложен алгоритм поэтапной реализации.
* Разработаны и реализованы два метода численного интегрирования модели, проведено сравнение точности разработанных методов на основе аналитического решения.