**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.

Рассмотрение моделей Земной системы подразумевает включение в современные модели новых областей, в том числе верхних слоев атмосферы и моделей ионосферы. Это важно для ряда задач: для задач космической отрасли, спутниковой коммуникации, радиолокации и 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 моделями для нижних слоев атмосферы.

**Приближения и векторное уравнение**

Представленная модель ионосферы основывается на следующих приближениях:

1. рассматривается только F слой ионосферы Земли *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 следующий вид (представлено на слайде):

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. Рассмотрим сначала эту модель.

**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**

Построена 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 по квадратам в зависимости от знака коэффициента перед смешанной производной *(показать на слайде).*

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

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

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. Перенос нейтральным ветром**

Следующая стадия построения модели заключается в учете трёхмерного переноса, входящего в полное уравнение динамики электронной концентрации. Для этого вновь 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 аппроксимационных свойств полученной схемы для полного решаемого уравнения, 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 модельному решению была проведена также следующая проверка: правая часть уравнения задавалась так, чтобы по-прежнему подобранная модельная функция давала стационарное решение, после чего в части кода, реализующего адвекцию, скорости переноса полагались равными нулю. Перенос при этом отключался, а модель сходилась к некоторому стационарному решению, отличному от модельного. В таком тесте проверялся вклад переноса в получаемое решение.  
Результаты показали существенную ошибку в вычисленном стационарном решении, что и ожидалось.

**6. Заключение**

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

* Создана первая версия трёхмерной динамической модели F слоя на основе решения уравнений динамики плазмы в приближении амбиполярной диффузии в сферических геомагнитных координатах с учетом нейтрального ветра, сформулированы основные уравнения модели и предложен алгоритм поэтапной реализации.
* Разработан и реализованы два метода численного интегрирования двумерной модели, включающей только амбиполярную диффузию и плазмохимию, проведено сравнение точности разработанных методов на основе аналитического решения.
* Разработан и 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.