

Д.А. ДЗЮБАНОВ, канд. физ.-мат. наук, с.н.с., зав. отделом,
Институт ионосферы, Харьков;
Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом,
Институт ионосферы, Харьков;
А.А. ЛОЙКО, магистр, студент, НТУ “ХПИ”

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ НА ВЫСОТАХ МАКСИМУМА F-ОБЛАСТИ ПО ДАНЫМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Приводятся результаты расчета дневного профиля электронной концентрации на основе решения уравнения непрерывности. В расчетах используются экспериментальные значения температур заряженных частиц и данные о скорости движения плазмы на высоте 300 км. В процессе анализа согласованности ионосферных параметров вычисляется вертикальная составляющая скорости движения плазмы, обусловленная термосферным ветром.

Ключевые слова: динамика ионосферы, нейтральная атмосфера, метод некогерентного рассеяния, скорость движения ионосферной плазмы, термосферный ветер.

Наведено результати розрахунку денного профілю електронної концентрації на основі розв'язання рівняння безперервності. В розрахунках використано експериментальні значення температур заряджених частинок та дані про швидкість руху плазми на висоті 300 км. При аналізі узгодженості іоносферних параметрів розраховується вертикальна складова швидкості руху плазми, що обумовлена термосферними вітрами.

Ключові слова: динаміка іоносфери, нейтральна атмосфера, метод некогерентного розсіяння, швидкість руху іоносферної плазми, термосферний вітер.

The results of calculation of daytime electron density profile using continuity equation are presented. Experimental data of charged particle temperatures and plasma transport velocity at 300 km are used. At analysis of ionospheric parameters agreement vertical component of plasma velocity, caused by thermospheric wind is calculated.

Keywords: dynamics of the ionosphere, neutral atmosphere, incoherent scatter method, ionospheric plasma transport velocity, thermospheric wind.

Введение. Динамические процессы играют важнейшую роль в поведении ионизированной и нейтральной составляющих верхней атмосферы. Нейтральная компонента постоянно находится в движении под влиянием большого количества факторов: нагрева солнечным излучением, солнечного и лунного приливов, волновых процессов в атмосфере, передачи энергии из тропосферы на ионосферные высоты во время мощных природных катаклизмов – ураганов, цунами, землетрясений. Картина усложняется еще и силами Кориолиса, обусловленными вращением Земли, и многими другими факторами. В своем движении нейтральная компонента увлекает ионизированную составляющую вследствие относительно низкой степени ионизации плазмы (порядка 10^{-3} на ионосферных высотах).

© Д.А. Дзюбанов, Л.Я. Емельянов, А.А. Лойко, 2013

Ионизированная компонента, кроме этого, диффундирует сквозь нейтральный газ и подвержена электромагнитному дрейфу. Результирующая скорость движения плазмы является суммой скоростей перечисленных факторов (диффузии, переноса нейтральным ветром и электромагнитного дрейфа), вклад каждого из которых меняется в зависимости от гелиогеофизических условий. Метод некогерентного рассеяния (НР) позволяет измерить вертикальную составляющую общей скорости совместно с другими параметрами ионосферы (концентрации электронов, температур ионов и электронов, ионного состава и др.). Результаты измерений дают возможность объяснить вариации ионосферных параметров в течение суток, сезонов и при различных уровнях солнечной активности.

Цель статьи – выделение составляющую скорости движения, плазмы, обусловленную ее увлечением термосферным ветром, с привлечением результатов измерений электронной концентрации, температур заряженных частиц и общей скорости движения плазмы. Это можно сделать, решая уравнение непрерывности и анализируя вклад каждой компоненты скорости.

Физические процессы, обуславливающие движения плазмы на ионосферных высотах. Несомненно, основным движением нейтральной верхней атмосферы является движение под воздействием солнечного излучения от более нагретых областей к более холодным, т.е. с дневной стороны на ночную. Массы вещества в этом процессе снова возвращаются на дневную сторону, формируя при этом картину так называемой глобальной термосферной циркуляции. В силу того, что степень ионизации плазмы на ионосферных высотах составляет примерно 10^{-3} , за счет достаточно интенсивной частоты столкновений нейтральных и ионизированных частиц, происходит увлечение ионосферной плазмы движущимся нейтральным газом. Может, однако, происходить и обратный процесс (увлечение нейтральной составляющей ионосферной плазмы), но постоянные времени этих процессов существенно различны. Так, для высоты 300 км время реагирования ионосферы на движение атмосферы составляет 2 с, а время реагирования атмосферы соответственно 1800 с [1]. Следует отметить, что наличие магнитного поля Земли вынуждает заряженные частицы двигаться вдоль магнитных силовых линий. Это же относится к диффузионному движению под действием сил, обусловленных градиентами давления за счет изменения с высотой температуры и концентрации частиц.

Наличие геомагнитного поля в такой ситуации приводит к двум важным особенностям в динамике плазмы.

1. Частицы движутся вдоль магнитных силовых линий, изменяя направление движения относительно термосферного ветра и сил давления.

2. Тот факт, что геомагнитные полюса не совпадают с географическими (например северный геомагнитный полюс находится на $82^{\circ}07'$ с. ш. $114^{\circ}04'$ з. д.) и что ось магнитного диполя наклонена к оси вращения Земли под углом близким к 11.5° , приводит к отсутствию сферической симметрии

свойств ионизированной части верхней атмосферы. Поэтому эти свойства в любом регионе являются уникальными и данные ионосферных наблюдений в каждом регионе также уникальны. Эффективное построение глобальных моделей ионосферных процессов невозможно при использовании только лишь данных, полученных традиционно в западном полушарии. Данные радара НР Института ионосферы успешно дополняют данные других исследовательских комплексов. Перенос вещества в ионосферной плазме играет не менее важную роль в процессах образования и сохранения ионосферы, чем ионизация и рекомбинация.

Уравнение непрерывности. Вариации электронной концентрации в F-области ионосферы определяются тремя основными процессами: ионизацией нейтрального газа солнечным излучением, рекомбинацией и динамическими процессами. Последние включают в себя диффузию и перенос плазмы под действием термосферных ветров и электрических полей. Если обозначить суммарную скорость переноса как v_i , то изменение концентрации электронов за счет этого процесса определяется дивергенцией потока частиц $n_i v_i$. При использовании общепринятых обозначений q и L для скоростей процессов ионообразования и рекомбинации, уравнение непрерывности, описывающее совместное действие этих процессов, представляется выражением [2, 3]

$$\frac{dn_i}{dt} = q_i - L_i - \text{div}(n_i v_i),$$

где n_i – концентрация ионов.

Это уравнение выполняется для каждой i -й ионизированной составляющей. При этом соблюдается условие электронейтральности плазмы, т.е. электронная концентрация n_e равна суммарной концентрации всех ионных компонент $n_e = \sum n_i$.

В слое F2 ионосферы, где основным ионом является атомный кислород O^+ , распределение электронной концентрации представляется уравнением непрерывности, которое в диффузионном приближении записывается в виде [2]:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{in} \sin^2 I \left(\frac{\partial n_i}{\partial z} + A n_i \right) - w n_i \right] - \beta n_i + q,$$

где D_{in} – коэффициент диффузии ионов O^+ через нейтральный газ,

$$A = \frac{T_e}{n_i T_i} \frac{\partial n_i}{\partial z} + \frac{m_i g}{k T_i} + \frac{1}{T_i} \frac{\partial (T_e + T_i)}{\partial z}, \quad T_e \text{ и } T_i \text{ – температуры электронов и ионов, } k \text{ –}$$

постоянная Больцмана, β – коэффициент линейной рекомбинации, m_i – масса иона, g – ускорение свободного падения. Вертикальная составляющая движения плазмы за счет термосферного ветра и дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях w вычисляется по формуле:

$$w = v_{nx} \sin I \cos I \cos D - v_{ny} \sin I \cos I \sin D + \frac{E_x}{B} \cos I \sin D + \frac{E_y}{B} \cos I \cos D,$$

где v_{nx} , v_{ny} – зональная и меридиональная компоненты термосферного ветра, B , I , D – индукция, углы наклона и склонения геомагнитного поля, E_x , E_y – меридиональная и зональная компоненты электрического поля. При этом предполагается, что оси координат направлены: x на юг, y на восток и z вертикально вверх.

Электрическое поле возникает в динамо-области на высоте примерно 110 км. Высокая проводимость ионосферной плазмы способствует переносу электрического поля в F-область. Здесь это поле вызывает дрейф плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Если в последнее выражение подставить значение склонения магнитного поля, которое для Харькова равно 7 градусам, то слагаемое с множителем $\sin D$ будет гораздо меньше слагаемого, содержащего $\cos D$, и им можно будет впоследствии пренебречь. Выражение для вертикальной скорости за счет увлечения термосферными ветрами и электромагнитного дрейфа может быть записано как

$$w = v_{nx} \sin I \cos I \cos D - v_{ny} \sin I \cos I \sin D + \frac{E_y}{B} \cos I \cos D.$$

В самом общем случае, если считать, что с высотой изменяются все ионосферные параметры, включая электронную концентрацию, электронную и ионную температуры, среднюю массу ионов, выражение вертикальной скорости переноса плазмы можно записать в виде

$$v_z = -D_a \sin^2 I \left[\frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial z} + \frac{m_i g}{k(T_e + T_i)} + \frac{1}{T_e + T_i} \frac{\partial (T_e + T_i)}{\partial z} \right] + v_{nx} \sin I \cos I \cos D - v_{ny} \sin I \cos I \sin D + \frac{E_y}{B} \cos I \cos D,$$

где $D_a = k(T_e + T_i) / m_i v_{in}$ – коэффициент амбиполярной диффузии, v_{in} – частота столкновения ионов с нейтральными частицами. В данном случае основным ионом, который диффундирует в F-области через нейтральный газ будем считать ионы атомного кислорода, так как они являются преобладающими. Нейтральную атмосферу будем считать состоящей из смеси атомного кислорода с концентрацией $n(O)$, молекул кислорода и азота с концентрациями $n(O_2)$ и $n(N_2)$, распределенных по барометрическому закону с температурой T_n .

Решение уравнения непрерывности с привлечением экспериментальных данных. Метод НР позволяет определять скорость перемещения ионосферной плазмы как единого целого. Принцип измерения скорости базируется на известном эффекте Доплера, проявляющемся в том,

что движение плазмы в импульсном объеме вдоль луча радара приводит к частотному смещению спектра рассеянного сигнала. При движении в направлении радара частота принятого сигнала увеличивается, при движении от радара – уменьшается. При несущей частоте радара Института ионосферы около 158 МГц изменение скорости движения плазмы на 1 м/с приводит к изменению доплеровского сдвига спектра рассеянного сигнала примерно на 1 Гц. Поэтому для определения скорости с приемлемой для геофизических задач точностью (несколько метров в секунду) необходимо обеспечить высокую стабильность частоты излучения и радиоприёмной системы [4, 5].

Используя в составе радара ИР Института ионосферы зенитную антенну, осуществляются прямые измерения вертикальной составляющей скорости плазмы v_z . Методика определения v_z с применением корреляционного анализа принятого ИР сигнала описана, например, в [6]. Зондирование ионосферы осуществляется составным двухчастотным радиоимпульсным сигналом, один из элементов которого длительностью около 650 мкс предназначен для определения концентрации электронов, температур ионов и электронов, скорости движения ионосферной плазмы и ионного состава по измеренным корреляционным функциям рассеянного ионосферой сигнала. Второй элемент длительностью 120 мкс используется для определения мощности ИР сигнала с целью коррекции профиля электронной концентрации.

Для исследования физической картины процессов переноса в ионизированной и нейтральной составляющих верхней атмосферы предлагается следующий алгоритм. Определяются высотные зависимости вертикальной составляющей общей скорости переноса плазмы. По данным об электронной концентрации и о температурах заряженных частиц, а также с привлечением ряда модельных представлений вычисляются высотные зависимости диффузионной скорости. Вычитая из общей скорости компоненту, обусловленную диффузией, рассчитывается движение плазмы за счет увлечения её термосферным ветром и за счет электромагнитного дрейфа. Разделить влияние двух последних факторов сложно, несмотря на существование моделей электрических полей. Поскольку влияние термосферных ветров в средних широтах носит определяющий характер, можно считать это влияние основным.

Пользуясь методикой численного решения уравнения непрерывности, изложенной в [2], было рассчитано высотное распределение электронной концентрации для условий летней околополуденной ионосферы при средней солнечной активности. При этом для расчета характеристик рекомбинационных и диффузионных процессов использовались экспериментальные данные о высотных распределениях температур электронов и ионов. Также, в соответствии с изложенным выше, были использованы результаты измерений v_z . Рассчитанный высотный профиль концентрации электронов n_e приведен на рис. 1. На этом же рисунке нанесены измеренные значения n_e .

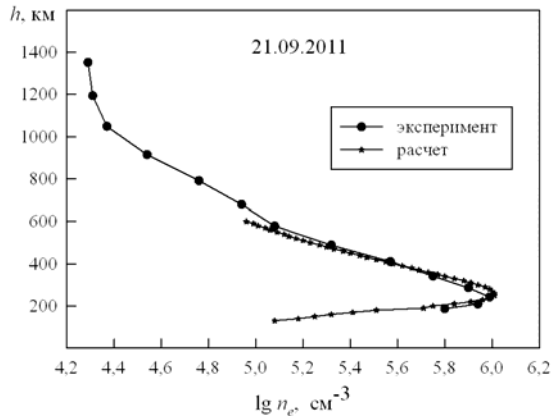


Рис. 1 – Высотные профили концентрации электронов

Видно достаточно хорошее согласие результатов расчёта и эксперимента (отличие на 17 км по высоте максимума и на 0,05 по $\lg n_e$). Также это свидетельствует об адекватности используемой схемы расчётов и о том, что температуры заряженных частиц, использовавшиеся в расчётах, дают правильные значения коэффициентов рекомбинации и характеристик диффузионного потока частиц.

Обсуждение результатов. Помимо профиля концентрации электронов, были получены высотный профиль скорости движения плазмы v_z и значение вертикальной составляющей термосферного ветра на высоте 300 км. Поэтому целесообразно было провести сопоставление измеренного профиля v_z и профиля, полученного при решении уравнения непрерывности. Для анализа величины вертикальной составляющей скорости плазмы, обусловленной увлечением нейтральным ветром, по модели HWM93 был произведен расчёт скорости горизонтального нейтрального ветра на уровне термосферы, а именно на высоте 300 км. Принимая во внимание наклонение и склонение геомагнитного поля, эта скорость была пересчитана на вертикальное направление. Целью такого сопоставления должны быть рекомендации по корректировке модельных представлений, основываясь на данных эксперимента.

На рис. 2 видно качественное согласие высотного хода экспериментальных и расчётных величин скорости движения плазмы. Однако на высоте 300 км эти значения отличаются на 12 м/с. Расчётные же значения на высоте 600 км положительны, в то время как экспериментальные данные говорят о хотя и небольшом, но нисходящем движении плазмы на этой высоте ($v_z < 0$).

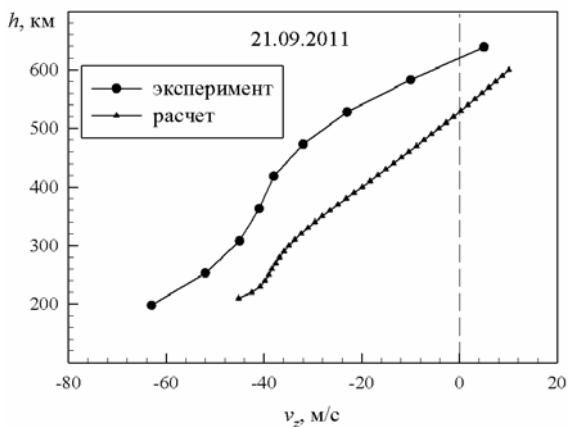


Рис. 2 – Высотные профили вертикальной составляющей скорости движения плазмы

Решение уравнения непрерывности дает значение вертикальной составляющей скорости увлечения нейтральным ветром -3 м/с на высоте F-области (300 км). Расчет же по модели HWM93 дает величину порядка -14 м/с. Разницу в расчётных и модельных значениях этой скорости можно отнести на счет несовершенства модели HWM93, которая постоянно совершенствуется. Различие в направлениях и величинах потоков на границе ионосфера-плазмосфера дает основание для дальнейшего исследования процессов переноса вещества в этой области в дневное время и, при необходимости, корректировки схемы расчета.

Выводы. Решение уравнения непрерывности с использованием экспериментальных данных позволяет оценить вертикальную составляющую скорости движения ионосферной плазмы, обусловленную термосферным ветром.

Список литературы: 1. Ратклифф Дж.А. Введение в физику ионосферы и магнитосферы. – М.: Мир, 1975. – 296 с. 2. Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 190 с. 3. Брюнелли Б.Е., Намгалдзе А.А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528 с. 4. Емельянов Л.Я., Скляров И.Б., Черняев С.В. Вопросы снижения влияния зондирующего сигнала на точность измерения скорости движения ионосферной плазмы // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. Тематический выпуск «Радиофизика и ионосфера». – Х.: НТУ «ХПИ». – 2002. – № 9. – С. 25-28. 5. Емельянов Л.Я. Обоснование характеристик радара для определения скорости дрейфа ионосферной плазмы методом некогерентного рассеяния // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. Тематический выпуск «Радиофизика и ионосфера». – Х.: НТУ «ХПИ». – 2004. – № 23. – С. 29-36. 6. Yemelyanov L. Ya., Dzyubanov D. A. The Peculiarities of Mid-Latitude Ionosphere Plasma Drift Velocity Determination // Telecommunications Radio Engineering. – 2007. – Vol. 66, № 14. – P. 1313-1327.

Поступила в редколлегию 29.04.2013