

*Д.А. ДЗЮБАНОВ*, канд. физ.-мат. наук, зам. директора, Институт ионосферы НАН и МОН Украины

*М.В. ЛЯШЕНКО*, канд. физ.-мат. наук, учёный секретарь, Институт ионосферы НАН и МОН Украины

*А.Е. МИРОШНИКОВ*, м.н.с., Институт ионосферы НАН и МОН Украины

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИОННОГО ПЕРЕНОСА В СРЕДНЕСИРОТНОЙ ОБЛАСТИ F ИОНОСФЕРЫ

У статті розглядається моделювання вертикальної складової швидкості дифузійного переносу іоносферної плазми. Аналізується внесок кожної складової у виразі для дифузійної швидкості, які зумовлені впливом градієнтів електронної концентрації, температур заряджених частинок, а також сил гравітаційного тяжіння, при різних рівнях сонячної активності.

The article deals with simulation of the vertical component of the diffusion velocity of the ionospheric plasma. We analyze the contribution of each term in the expression for the diffusion velocity due to the influence of pressure gradients caused by a high-altitude change of the electron density, temperature of the charged particles, force of gravitational attraction and changes in the height of the atmosphere of the plasma, at different levels of solar activity.

**Введение.** Вариации электронной концентрации в F-области ионосферы определяется 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.

В самом общем случае, если считать, что с высотой изменяются все ионосферные параметры, включая концентрацию электронов, температуры электронов и ионов, среднюю массу ионов, вертикальную скорость переноса плазмы можно записать в виде [1]

$$V_z = -D_a \sin 2I \left[ \frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial z} + \frac{m_i g}{k(T_e + T_i)} + \frac{1}{T_e + T_i} \frac{\partial (T_e + T_i)}{\partial z} \right] + \quad (1)$$

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

где  $D_a = k(T_e + T_i)/m_i v_{in}$  – коэффициент амбиполярной диффузии,  $v_{in}$  – частота соударений ионов с нейтральными частицами,  $T_e$  и  $T_i$  – температура электронов и ионов;  $k$  – постоянная Больцмана,  $m_i$  – масса иона,  $g$  – ускорение свободного падения,  $I$  и  $D$  – углы наклона и склонения геомагнитного поля,  $B$  – индукция геомагнитного поля,  $E_y$  – зональная компонента электрического поля;  $k(T_e + T_i)/m_i g = 1/H_p$  – величина, обратная

высоте однородной атмосферы и характеризующая диффузионно-гравитационное распределение, к которому стремиться плазма.

В данном случае, основными ионами, которые диффундируют в F области через нейтральный газ, будем считать ионы атомарного кислорода, так как они являются преобладающими. Нейтральную атмосферу же будем считать состоящей из смеси атомарного кислорода с концентрацией  $N(O)$ , молекул кислорода и азота с концентрациями  $N(O_2)$  и  $N(N_2)$ , распределенных по барометрическому закону с температурой  $T_n$ . Частоты соударений ионов  $O^+$  с компонентами нейтрального газа определяем как [1]:

$$\begin{aligned}v(O^+, O) &= 3,35 \cdot 10^{-9} (T_i + T_n)^{1/2} N(O), \\v(O^+, O_2) &= 1,08 \cdot 10^{-9} N(O_2), \\v(O^+, N_2) &= 0,95 \cdot 10^{-9} N(N_2).\end{aligned}$$

**Постановка задачи.** Анализируя вклад каждого слагаемого в выражение для общей скорости переноса, видно, что первое слагаемое (диффузионная скорость) обусловлена влиянием градиентов давления, причиной которых являются высотные изменения электронной концентрации, температур заряженных частиц и изменения высоты однородной атмосферы плазмы. Все эти характеристики присущи определенным характеристикам верхней атмосферы непосредственно над данным регионом. С другой стороны, три последних слагаемых выражения (1) связаны с влиянием ветров и электрических полей и отражает воздействие крупномасштабных движений верхней атмосферы. Эти движения вызываются, в конечном счете, глобальной циркуляцией верхней атмосферы под воздействием нагрева Солнцем. При этом воздушные массы перетекают с дневной, нагретой стороны на ночную, более холодную. Такие движения воздушных масс объединяют последние слагаемые общим физическим источником. А именно, первопричиной возникновения электрических полей в динамо-области являются нейтральные ветры той же самой природы, что и на уровне термосферы, т.е. вызванные нагревом верхней атмосферы в подсолнечной точке и направленные таким же образом, как ветры в термосфере. Следует отметить, что, получив общий вклад последних слагаемых в общую скорость переноса, разделить влияние каждого из них затруднительно.

**Целью статьи** является представление результатов моделирования вертикальной составляющей диффузионной скорости ионосферной плазмы, а также анализ вклада каждого слагаемого в выражение для диффузионной скорости при различных уровнях солнечной активности (СА). Данные, полученные в статье, могут быть использованы в исследовании глобальной атмосферной циркуляции

**Моделирование.** Для более подробного исследования диффузионной составляющей, рассмотрим модельные расчеты этой величины, которые

показывают ее тенденции при различных уровнях СА.

Вертикальная компонента диффузионной скорости определяется выражением [1]

$$V_d = -D_d \sin^2[A + B + C] \quad (2)$$

где  $A = \frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial z}$ ,  $B = \frac{m_i g}{k(T_e + T_i)}$ ,  $C = \frac{1}{(T_e + T_i)} \frac{\partial(T_e + T_i)}{\partial z}$ .

Первое слагаемое  $A$  в квадратных скобках дает вклад в диффузионную скорость в виде нисходящего движения ниже максимума F-области и восходящего движения выше максимума. Два других слагаемых –  $B$  и  $C$ , как правило, соответствуют нисходящему движению плазмы. Для моделирования были выбраны три уровня СА – низкий, средний и высокий. Эти уровни характеризовались числами солнечных пятен  $W = 0, 100$  и  $200$ , соответственно. Расчеты проводились для дневных условий летнего сезона. Данные о параметрах ионосферы рассчитывались по Международной справочной модели ионосферы IRI-90 для координат радара ИР Института ионосферы ( $49,6^\circ$  с.ш.,  $36,3^\circ$  в.д.). Температура нейтральной атмосферы, а также концентрации атомарного кислорода, молекулярного кислорода и молекулярного азота находились с привлечением модели нейтральной атмосферы MSIS-86.

Для наглядности объяснения полученных результатов расчета скорости диффузии приведем результаты расчета коэффициента амбиполярной диффузии (рис. 1), а также вклад каждого из слагаемых ( $A, B, C$ ) в квадратных скобках в формуле (2) (рис. 2 – 4).

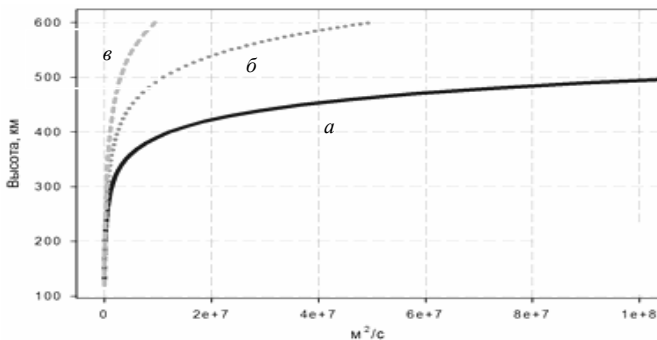


Рис. 1. Коэффициент амбиполярной диффузии для уровней СА: а)  $W = 0$ , б)  $W = 100$ , в)  $W = 200$

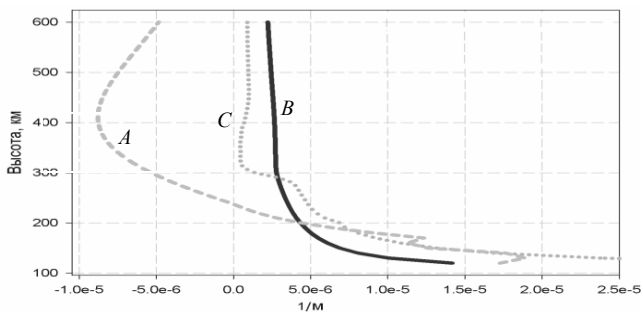


Рис. 2. Составляющие скорости диффузии при низкой СА ( $W = 0$ )

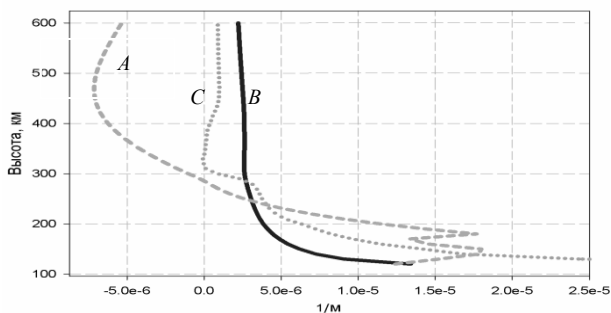


Рис. 3. Составляющие скорости диффузии при средней СА ( $W = 100$ )

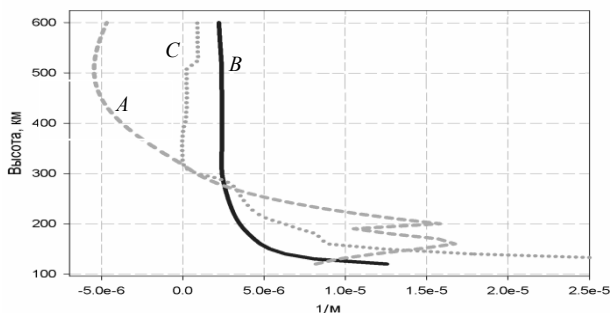


Рис. 4. Составляющие скорости диффузии при высокой СА ( $W = 200$ )

На рис. 5 приводится рассчитанная вертикальная компонента диффузионной скорости. Расчеты проведены для условий летнего полудня и трех уровней СА: низкого ( $W = 0$ , кривая *a*), среднего ( $W = 100$ , кривая *б*) и высокого ( $W = 200$ , кривая *в*).

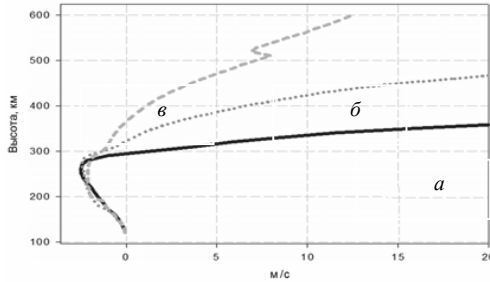


Рис. 5. Вертикальная компонента диффузионной скорости для разных уровней СА

**Выводы.** Как видно из графиков, коэффициент  $D_a$  быстро растет с высотой, что связано с уменьшением частоты соударений ионов  $O^+$  с компонентами нейтрального газа.

Расчеты показывают, что рассмотренные составляющие формулы (2) слабо зависят от уровня СА и имеют близкие по абсолютному значению величины. Производная концентрации дает вклад в диффузионную скорость в виде нисходящего движения ниже максимума F-области и восходящего движения выше максимума. Видно, что  $1/H_p$  и производная температуры направлены вверх и уменьшаются с высотой.

На суммарную скорость диффузионной составляющей скорости переноса ионосферной плазмы, рассчитанной по формуле (2) существенно влияет коэффициент амбиполярной диффузии, имеющий сильную зависимость от солнечной активности. Значение скорости диффузии тем больше, чем меньше  $W$  и имеет отрицательное значение на высотах ниже максимума ионизации и положительное – выше него.

“Изрезанность” рассчитанных характеристик объясняется операцией дифференцирования изначально не гладких входных данных, заданных моделями IRI-90 и MSIS-86. В реальных случаях ситуация может осложняться статистическим разбросом экспериментальных данных.

**Список литературы:** 1. *Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В.* Прогнозирование состояния ионосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 190 с. 2. *Дзюбанов Д.А., Островский Г.И., Михайлов А.В.* Долготные вариации атомного кислорода в термосфере, рассчитанные из ионосферных данных // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1984. – 24, № 1. – С. 69 – 72. 3. *Мирошников А.Е.* Исследование вертикального дрейфа в области F ионосферы методом некогерентного рассеяния // Международная научно-практическая конференция “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. тезисы докладов – Х.: НТУ ХПИ, 2009. 4. *Мирошников А.Е.* Моделирование вертикальной компоненты диффузионной скорости ионосферной плазмы // Конференция молодых учёных “Дистанционное радиозондирование ионосферы (ИОН-2010)” (Харьков, Украина, 6 – 9 апреля 2010 г.). – Сборник тезисов. – 2010. – С. 48.

Поступила в редколлегию 02.06.2010