

УДК 550.388.2

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ПО ДАННЫМ  
РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ В ХАРЬКОВЕ**

**М.В. Ляшенко**

**MODELLING OF DYNAMIC AND THERMAL PROCESSES PARAMETERS IN GEOSPACE PLASMA  
ACCORDING TO INCOHERENT SCATTER RADAR IN KHARKOV**

**M.V. Lyashenko**

Представлены результаты моделирования сезонно-суточных вариаций параметров динамических и тепловых процессов на фазе роста 24-го цикла солнечной активности.

Modeling results of season and diurnal variations of dynamic and thermal processes parameters during rising phase of 24th solar activity cycle are presented.

**Введение**

В настоящее время одной из важных проблем исследования геокосмоса является создание новых физических теорий и моделей среды, которые достоверно отражают поведение параметров геокосмической плазмы в разных гелиогеофизических условиях. Такие модели позволяют прогнозировать параметры геокосмоса в зависимости от состояния космической погоды и, в частности, от уровня солнечной активности (СА). Для создания наиболее целостной картины всего комплекса явлений, которые происходят в околоземной среде, требуется адекватное описание динамических и тепловых процессов.

Наиболее информативным наземным радиофизическим методом исследования вариаций параметров ионосферной плазмы является метод некогерентного рассеяния (НР). Харьковский радар НР является единственным в среднеширотной Европе инструментом, с помощью которого можно получать информацию об основных параметрах ионосферы и ее динамики [Таран, 2001].

Целью работы является представление результатов моделирования параметров физических процессов в ионосфере в спокойных условиях на фазе роста 24-го цикла СА.

**Результаты моделирования и обсуждение**

На рис. 1–7 представлены результаты моделирования высотно-временных вариаций параметров тепловых и динамических процессов в ионосфере, а также параметров плазмы, не измеряемых непосредственно в эксперименте на радаре НР. Моделирование выполнено для периодов, близких к весеннему и осеннему равноденствиям, летнему и зимнему солнцестояниям в 2009 г.

Теоретические соотношения, используемые для расчета параметров физических процессов в ионосфере, такие же, как в [Ляшенко и др., 2006; Дзюбанов и др., 2008]. В качестве исходных используются параметры ионосферы  $N$ ,  $T_e$ ,  $T_i$  и  $V_z$ , полученные на харьковском радаре НР. Расчет параметров нейтральной атмосферы выполнен по модели NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002].

Рассмотрим высотные профили частот соударений электронов с ионами. Как видно из рис. 1, для

всех сезонов максимум в высотном профиле  $\nu_{ei}$  в ночные часы располагается в диапазоне высот 250–270 км. Причем ночные значения  $\nu_{ei}$  превышают дневные практически во всем рассматриваемом диапазоне высот. Как известно,  $\nu_{ei}$  зависит от температуры электронов  $T_e$  и имеет сложную зависимость от концентрации частиц  $N$ . Как показал детальный анализ, основной вклад в суточные изменения  $\nu_{ei}$  вносят вариации  $N$ .

Расчеты показали (рис. 2), что частота соударений ионов с нейтралами  $\nu_{in}$  в дневные часы во всем рассматриваемом диапазоне высот превышает значения  $\nu_{in}$  в ночных условиях. Это связано с тем, что суммарная частота соударений ионов с нейтральными частицами прямо пропорциональна температуре нейтралов  $T_n$  и температуре ионов  $T_i$ , причем в ночных условиях  $T_n \approx T_i$ . Дневные и ночные значения  $T_n$  различаются не более чем на 15 %, тогда как  $T_i$  от дня к ночи испытывает заметные вариации. Максимальные значения температуры ионов в дневные часы примерно в 2 раза больше минимальных значений  $T_i$  в ночных условиях. Таким образом, основную роль в поведении  $\nu_{in}$  в течение суток играют вариации температуры ионов.

Рассмотрим высотные профили продольной составляющей тензора амбиполярной диффузии  $D_a$ . Как видно из рис. 3, в интервале высот 200–400 км ночные и дневные значения  $D_a$  практически совпадают. На высотах  $z > 500$  км дневные значения  $D_a$  превышают ночные.

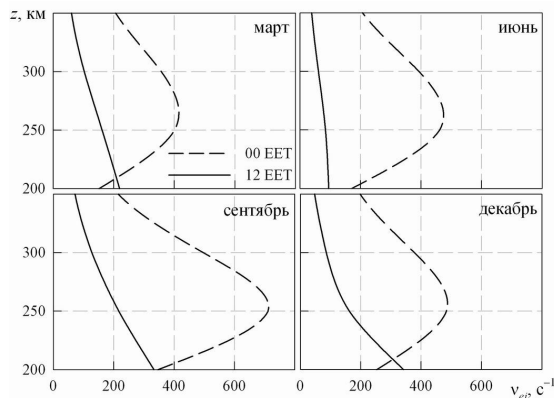


Рис. 1. Высотные профили частот соударений электронов с ионами  $\nu_{ei}$ .

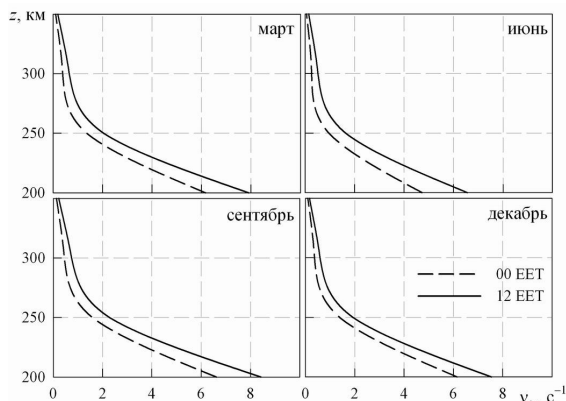


Рис. 2. Высотные профили частот соударений ионов с нейтралами  $\nu_{in}$ .

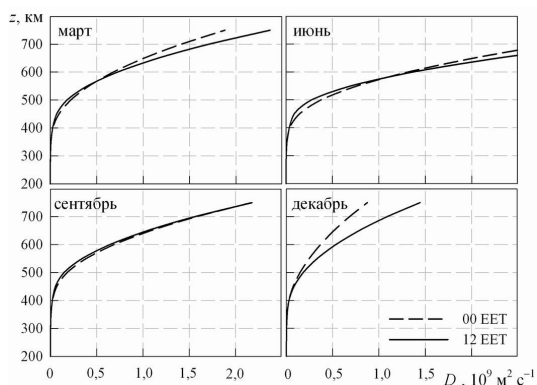


Рис. 3. Высотные профили коэффициента амбиполярной диффузии  $D_a$ .

Коэффициент амбиполярной диффузии пропорционален плазменной температуре  $T_p = T_e + T_i$  и обратно пропорционален частоте соударений  $\nu_{in}$ . В дневные и ночные часы существенные отличия в величинах  $\nu_{in}$  для нашего случая имеют место в диапазоне высот 200–300 км. С ростом высоты высотные профили  $\nu_{in}$  практически совпадают. Плазменная температура с ростом высоты увеличивается. Таким образом, можно допустить, что до высоты примерно 400 км вариации  $D_a$  определяются как вариациями частоты соударений ионов с нейтралами, так и вариациями температуры плазмы. На высотах  $z > 400$  км основную роль в высотном распределении  $D_a$ , в большей степени, играют температуры ионов и электронов.

Рассмотрим высотные зависимости продольной составляющей тензора теплопроводности электронного газа  $\kappa_e$  (рис. 4). Как известно, при наличии разности температур в среде от слоя с более высокой температурой к слою с более низкой температурой устанавливается тепловой поток. Скорость изменения этого потока определяется коэффициентом теплопроводности  $\kappa_e$ . Как видно из рис. 4, высотные профили  $\kappa_e$  в дневные и ночные часы существенно различаются. С ростом высоты, как дневные, так и ночные значения  $\kappa_e$  увеличиваются. В целом же суточные вариации  $\kappa_e$  определяются вариациями температуры электронов и частоты соударений электронов с ионами.

На рис. 5 представлены результаты расчета скорости переноса плазмы за счет амбиполярной диф-

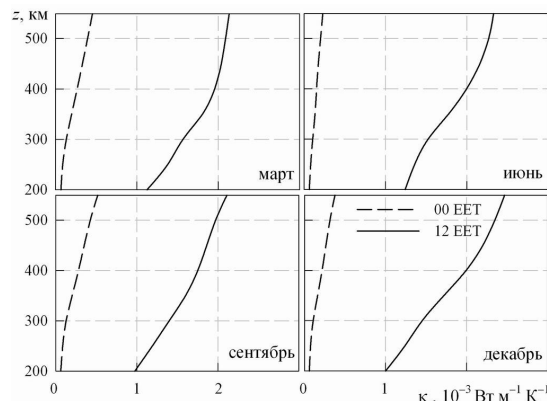


Рис. 4. Высотные профили продольной составляющей тензора теплопроводности электронного газа  $\kappa_e$ .

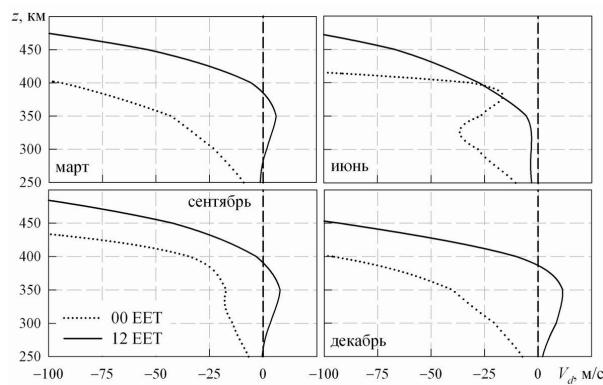


Рис. 5. Высотные профили скорости переноса заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии.

фузии. Видно, что для всех сезонов в ночных условиях имеет место перенос заряженных частиц за счет диффузии с больших на меньшие высоты. В околополуденные часы для периодов равноденствий и зимой в диапазоне высот 200–400 км имеет место перенос плазмы, направленный вверх. Высота перехода от восходящего потока плазмы к нисходящему для равноденствий и зимнего солнцестояния составляет примерно 400 км. Для летнего солнцестояния наблюдается обратная ситуация. В рассматриваемом высотном диапазоне значения скорости переноса  $V_d < 0$ , что соответствует сбросу ионосферной плазмы вниз, на меньшие высоты. Также следует отметить, что начиная с высоты 400 км доминирующую роль в формировании высотного распределения  $N$  играет диффузия.

Далее рассмотрим вариации параметров тепловых процессов в геокосмической плазме. На рис. 6, 7 представлены высотные профили величины энергии, подводимой к электронам  $Q/N$ , и плотности потока тепла  $\Pi_T$ , переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу соответственно.

Высотно-временные вариации  $Q/N$  сложным образом зависят от концентрации частиц и температуры электронов и ионов. Как видно из рис. 6, наибольшие значения величины  $Q/N$  имеет на высотах 250–260 км. С ростом высоты величина энергии, подводимой к электронам, уменьшается. Расчеты показали, что величина  $Q/N$  подвержена сезонным вариациям. Так, в периоды равноденствий  $Q/N$  больше, чем в периоды солнцестояний, а в зимний период  $Q/N$  больше, чем в период летнего солнцестояния.

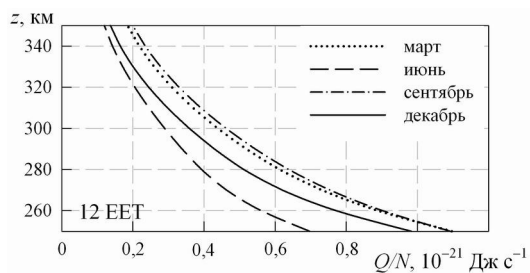


Рис. 6. Высотные профили величины энергии, подводимой к электронам.

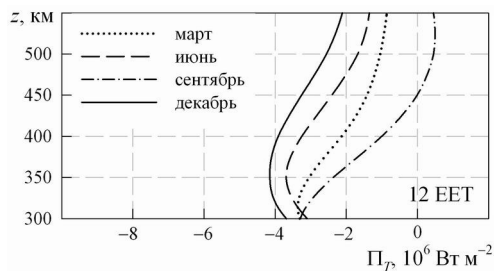


Рис. 7. Высотные профили плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу.

Сезонные различия, наблюдаемые в вариациях  $Q/N$ , можно объяснить эффектами полугодовой и сезонной аномалий. Поведение  $Q/N$ , по-видимому, в большей степени определяется вариациями  $N$  и  $N(O)$ , а в сезонных вариациях  $N$  и  $N(O)$ , в свою очередь, хорошо заметны эффекты полугодовой и сезонной аномалий. В пользу такого предположения может быть тот факт, что сезонные различия в  $Q/N$  с ростом высоты нивелируются.

На рис. 7 представлены высотные профили плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу. Как видно из рисунка, форма высотных профилей  $P_T$  в периоды равноденствий и солнцестояний различна. Наибольший по модулю поток тепла в летний и зимний период имеет место на высоте примерно 350 км. Для равноденственных периодов максимальные значения  $|P_T|$  наблюдаются на меньших высотах (примерно 300 км).

## Выводы

1. Выполнено моделирование параметров динамических и тепловых процессов в геокосмической плазме в периоды, близкие весеннему и осеннему равноденствиям, летнему и зимнему солнцестояниям на фазе роста 24-го цикла солнечной активности.

2. Выявлены суточные и сезонные вариации в поведении параметров физических процессов в геокосмической плазме для рассмотренных периодов.

3. Полученные результаты используются для развития региональной модели ионосферы (CERIM ИОН) по данным харьковского радара HP над Центральной Европой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дзюбанов Д.А., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Исследование и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы в период минимума 23-го цикла солнечной активности // *Космічна наука і технологія*. 2008. Т. 14, № 1. С. 44–56.

Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф., Черняк Ю.В. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период максимума солнечной активности // *Космічна наука і технологія*. 2006. Т. 12, № 4. С. 56–70.

Таран В.И. Исследования ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // *Геомагнетизм и аэронаука*. 2001. Т. 41, № 5. С. 659–666.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N. A12. P. SIA 15 1–16.

*Институт ионосферы НАН и МОН Украины, Харьков*