

*Д.А.ДЗЮБАНОВ*, канд. физ.-мат. наук, Институт ионосферы  
*И.Г.ЗАХАРОВ*, канд. физ.-мат. наук, ХНУ имени В.Н. Каразина  
*М.В.ЛЯШЕНКО*, м. н. с., Институт ионосферы (г. Харьков)

## РЕГРЕССИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОБЛАСТИ F2 ИОНОСФЕРЫ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ХАРЬКОВСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Досліджено залежність електронної концентрації у максимумі області F2 іоносфери ( $N_m$ ) в 12 годин місцевого часу від рівня сонячної активності (CA). Для кожного місяця розраховано коефіцієнти нелінійної регресії залежності  $N_m$  від CA. Далі коефіцієнти регресії використовувались для розрахунку сезонних варіацій  $N_m$ . Встановлено, що розраховані та отримані за експериментальними даними сезонні варіації  $N_m$  близькі між собою при будь-якому рівні CA. Розглянуто особливості сезонних варіацій  $N_m$  при різному рівні CA та їх можливі причини.

Dependence of the F-region electron density peak ( $N_m$ ) for 12 LT from the solar activity level is investigated. The regression's coefficients of dependence of the  $N_m$  from the solar activity for every month had calculated. Then regression's coefficients had used for calculation of seasonal variations of the  $N_m$ . Good agreement between calculated and an experimental seasonal variation of the  $N_m$  under any solar activity level is obtained. The features and possible reasons of the seasonal variations of the  $N_m$  for different solar activity level are considered.

**Введение.** В настоящее время одним из важных направлений исследования околоземной космической плазмы является построение моделей ионосферы. Однако, несмотря на прогресс в области моделирования состояния ионосферной плазмы, проблема построения новых моделей и усовершенствование уже существующих остается актуальной.

Как показано ранее [1-3], используемые в настоящее время на практике модели не всегда корректно отражают пространственно-временное распределение параметров ионосферы в конкретных геофизических условиях. Большинство современных моделей построены на массивах экспериментальных данных, полученных из сети ионосферных станций североамериканского региона. При сравнении с экспериментальными данными, полученными в восточном полушарии, в них наблюдаются существенные различия в распределении основных параметров ионосферы. Включение в ионосферные модели данных для регионов с более редкой сетью станций представляется одним из основных способов повышения точности современных ионосферных моделей. Данные харьковского радара НР как нельзя лучше подходят для этой цели, особенно с учетом того, что радар является единственным в Европе стабильным источником параметров среднеширотной ионосферы не только в ее максимуме, но и до высоты 1000 и более километров, где измерения с помощью ионозондов невозможны. Принимая во внимание [4, 5], что изменения

ионосферных параметров монотонны на дальностях  $\sim 1000$  км (за исключением высокоширотной ионосферы), данные радара могут быть использованы для создания региональной модели ионосферы. Эти модели, представляя самостоятельный интерес для решения прикладных задач в заданном регионе, могут оказаться полезными для корректировки глобальных моделей [6, 7].

Целью работы является установление зависимости электронной концентрации области F2 ионосферы от солнечной активности и расчет соответствующих коэффициентов регрессии по данным харьковского радара НР.

**Результаты и обсуждение.** На начальном этапе для оценки пригодности имеющихся данных НР для построения региональной модели использованы данные полуденных значений электронной концентрации  $N_m$  в максимуме области F2 ионосферы. Выбор данного параметра обусловлен следующим. Электронная концентрация в максимуме области F2 ионосферы является одним из основных параметров, определяющим характеристики распространения радиоволн. Кроме того, этот параметр является наиболее доступным параметром ионосферы, получаемым на обширной сети станций ионосферного зондирования, что создает условия для сравнения модельных расчетов с экспериментальными данными в исследуемом регионе.

Для описания зависимости ионосферных параметров от уровня солнечной активности (СА) использованы усредненные за солнечный оборот значения индекса  $F_{10,7}$  (здесь и далее знак усреднения опущен). Использование таких значений  $F_{10,7}$  обусловлено тем, что изменения индекса  $F_{10,7}$  и, тем более, интенсивности УФ [8] за один солнечный оборот значительно меньше его изменений в 11-летнем цикле СА, и не могло существенно повлиять на результаты расчетов.

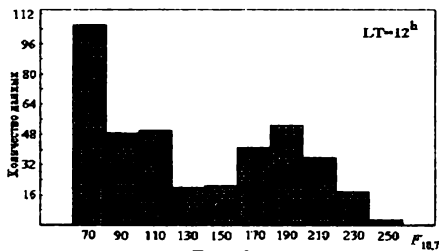


Рис. 1.

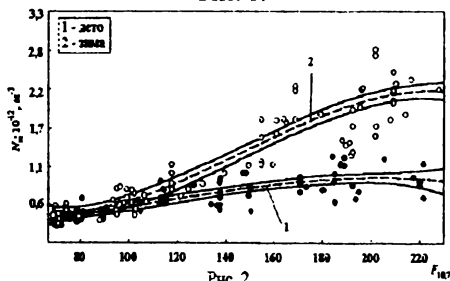


Рис. 2.

Как известно,  $N_m$  явно зависит от следующих параметров: сезона, СА и магнитной активности. Распределение данных по уровням СА заметно различалось (рис. 1). Максимальное число данных имеется для минимума и максимума СА, тогда как промежуточных значений  $F_{10,7}$  в полтора раза меньше. Нужно отметить, что такая закономерность является общей для существующих параметров СА, и устранить ее, увеличивая ряд экспериментальных данных, нельзя. Зависимость  $N_m$  от магнитной активности обусловлена использованием для расчетов не медианных, а измеренных (ежедневных)

ачений. Действительно, в большинстве случаев (примерно 2/3 от общего числа) наиболее высокие и наиболее низкие для данного уровня СА значения  $N_m$  приходились на периоды геомагнитных возмущений. Однако значительная часть отклонений  $N_m$  (примерно 1/3) приходилась на низкие значения магнитного индекса  $A_p$ . Их причиной могли быть волновые процессы, почти постоянно присутствующие в ионосфере. Поэтому, независимо от уровня магнитной активности, из исходного ряда были исключены те значения  $N_m$ , которые при данном уровне СА превышали уровень  $3\sigma$ , здесь  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение. Всего было исключено 28 значений, или примерно 6 % от исходного объема данных. Далее полагалось, что  $N_m$  зависит только от двух параметров – сезона и уровня СА. На рис. 2 представлен пример регрессионных зависимостей  $N_m$  от СА для зимы и лета. Коэффициенты регрессий определялись для каждого месяца отдельно. Ввиду существенной неоднородности данных по уровню СА нельзя гарантировать, что данная выборка в полной мере отражает свойства генеральной совокупности, поэтому для оценки достоверности, кроме стандартной оценки с использованием доверительных интервалов, использовали методы группировки и изменения длины ряда. В нашем случае метод группировки состоял в том, что тип зависимости  $N_m$  от СА для каждого месяца должен соответствовать выбранному для всего объема данных, а сезонные вариации коэффициентов регрессии должны быть сопоставимыми по характеру и относительной величине с известными сезонными вариациями исследуемого параметра. Также использовался контроль результатов расчетов по независимой переменной: кроме соответствия коэффициентов регрессий  $N_m$  от СА заданному уровню достоверности (уровень значимости  $p < 0,05$ ), рассчитанные по ним значения  $N_m$  должны отображать известные особенности сезонных вариаций этого параметра, хотя явно сезон при расчетах не учитывался.

Зависимость  $N_m$  искали в виде:

$$N_m = a + b F_{10,7} + c F_{10,7}^2 + d F_{10,7}^3$$

Основываясь на результатах предыдущих исследований [9, 10] и предварительных оценках для рассматриваемого ряда, слагаемые выше третьего порядка не рассматривались. При использовании для расчетов всех данных, коэффициенты регрессии для полиномов от 1-го до 3-го порядков были достоверны ( $p < 0,001$ ,  $p < 0,05$  и  $p < 0,01$ , соответственно). Среднеквадратическая погрешность восстановления исходного ряда была почти одной и той же, независимо от порядка полинома, однако характерные особенности зависимости  $N_m$  от СА, прежде всего ограничение роста  $N_m$  при высоком уровне СА, отображалось только при использовании полинома третьего порядка. Учет нелинейных членов регрессии позволил адекватно описать вариации  $N_m$  для всех сезонов. Необходимость их учета указывает на то, что состояние ионо-

сферы, особенно дневной, в значительной мере определяется не только интенсивностью ионизирующего излучения, но и другими процессами. Наиболее значительными, особенно зимой [11], являются процессы переноса, обусловленные перестройкой глобальной термосферной циркуляции при изменении СА. Летом могут оказаться существенными изменения химического состава (увеличение относительного вклада тяжелых молекул), а также увеличение скорости рекомбинации электронов, вызванное возбуждением колебательных уровней  $N_2^+$

Среднеквадратическая погрешность расчета  $N_m$  составила  $2,3 \cdot 10^{11} \text{ м}^3$ , или 22,7%. Учитывая, что сравнение проводилось с реальными измерениями, а не с медианными значениями, как это делается обычно, полученную точность можно оценить как высокую.

При изменении уровня СА меняется не только амплитуда, но и положение максимумов  $N_m$  по времени года. Для большей наглядности рассмотрим сезонный ход более детально. На рис. 3 приведен сезонный ход рассчитанных значений  $N_m$  при различных уровнях СА. Нужно отметить, что экспериментальные значения  $N_m$  имеют такой же сезонный ход; выбор представленных данных (расчет) определяется только простотой расчета для заданного уровня СА. Видно, что фаза сезонных вариаций  $N_m$  смещается на более раннее время

года; наиболее заметным смещение является для весеннего равноденственного максимума.

На рис. 4 представлен пример распределения погрешностей  $\Delta N = N_p - N$  для января и июня. Анализ погрешностей показал, что их распределение близко к нормальному – по критерию  $\chi^2$  уровень достоверности  $p < 0.01$ . Некоторое нарушение симметрии вызвано, прежде всего, погрешностью расчета  $N_m$  для магнитовозмущенных условий. Наличие в разностях между рассчитанными и измеренными значениями  $N_m$  эффектов магнитных бурь указывает на то, что в полученной модели, несмотря на использование не усредненных значений  $N_m$ , в значительной мере удалось исключить влияние магнитных бурь, так что рассчитанные значения соответствуют спокойным условиям (точнее, типичным условиям для данного месяца, т. е. для фонового уровня геомагнитной активности).

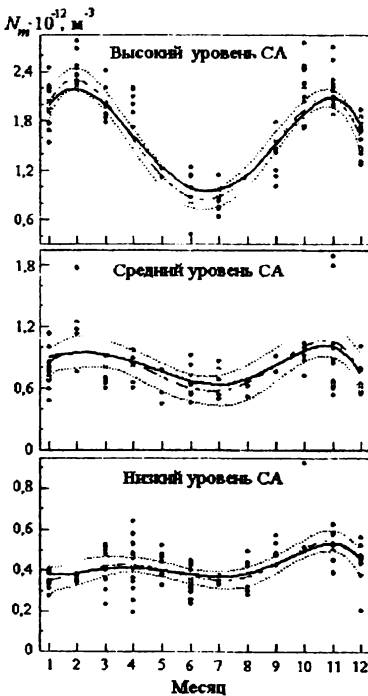


Рис. 3.

При более подробном рассмотрении сезонных вариаций  $N_m$  выяснились следующие закономерности. Хорошо известным фактом является смещение равноденственных максимумов к зимнему солнцестоянию (см. например, [12]) при увеличении СА вследствие расширения временного интервала, при котором реализуются условия для проявления эффекта сезонной аномалии. Однако, в рассмотренном случае смещение осеннего максимума не согласуется с данным процессом: наиболее заметной особенностью сезонных вариаций  $N_m$  является смещение равноденственных максимумов к началу года. Реальность такого смещения подтверждается тем, что смещается и положение минимумов. В результате, все основные фазы сезонных вариаций  $N_m$  смещаются примерно на 20 суток, весной смещение более значительное. Кроме того, аналогичное смещение равноденственных максимумов  $N_m$  ранее было установлено по многолетним данным ионозонда ст. Москва [13], т. е. ионозонда,

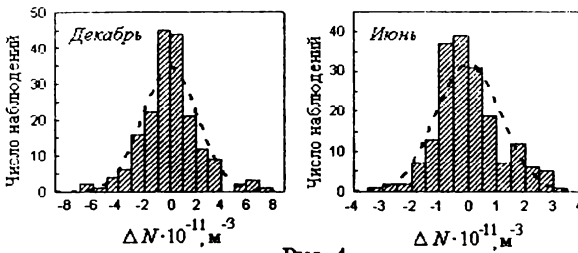


Рис. 4.

расположенного на той же долготе и всего на несколько градусов севернее, чем харьковский радар НР. Расчеты по модели IRI [10] показали, что данная модель не отражает отмеченные особенности сезонных вариаций  $N_m$ .

Таким образом, выявленная закономерность сезонного хода  $N_m$  не вызывает сомнения. Для ее объяснения обратимся к работам, в которых исследовали причины появления равноденственных максимумов электронной концентрации в области F2 [14]. Показано, что их появление определяется вкладом двух основных процессов: перестройкой фоновой (без учета периодов магнитных бурь) термосферной циркуляции при изменении уровня магнитной активности и дополнительным нагревом термосферы за счет подъема на ионосферные высоты и диссипации планетарных и приливных волн; роль второго процесса преобладает.

**Выводы.** Показано, что данные харьковского радара НР целесообразно использовать для повышения точности моделирования параметров ионосферы над центральной Европой. Отсутствие ежедневных измерений несколько усложняет процедуру моделирования, но при использовании методов развѐдочного анализа данных и дополнительного контроля за результатами расчетов – не препятствует получению надежных результатов. Примененные методики могут быть полезными и при решении других задач геофизики.

Выявлены закономерности сезонных вариаций электронной концентрации области F2, существенные для оценки роли физических процессов, опре-

деляемых взаимодействием различных слоев атмосферы и особенностями глобальной атмосферной циркуляции.

Установлено смещение сезонных максимумов  $A_m$  над Харьковом к началу года при повышении уровня СА. Данная закономерность аналогична установленной ранее для ст. Москва и может быть обусловлена подъемом на ионосферные высоты и последующей диссипацией планетарных и приливных волн и зависимостью этого процесса от уровня СА.

Высказано предположение, что вклад перестройки глобальной циркуляции в эти процессы на высотах максимума области F2 существенно меньше, что не исключает усиление роли этого процесса на больших высотах.

Авторы благодарят проф. Черногора Л.Ф. за ценные советы и замечания в ходе выполнения работы, а также Емельянова Л.Я., Склярова И.Б., Черняка Ю.В., Кононенко А.Ф. за проведение экспериментов.

**Список литературы:** 1. Дзюбанов Д.А., Захаров И.Г., Ляшенко М.В. Вариации электронной концентрации ионосферы в спокойных условиях по данным харьковского радара НР // Вестник НТУ «ХПИ». Сб. научн. тр. Тематический выпуск «Радиофизика и ионосфера». 2003, т. 4, № 7, С. 31 - 34. 2. Григоренко Е.И., Дзюбанов Д.А., Лысенко В.Н., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Магнитная, ионосферная и атмосферная бури большой интенсивности в сентябре 1998 г. Сравнение результатов и моделирование // Космічна наука і технологія. 2003, т. 9, № 4, С. 49 - 66. 3. Захаров И.Г., Ляшенко М.В. Сравнение экспериментальных и модельных значений полного электронного содержания в ионосфере над Восточной Европой // Радиофизика и радиоастрономия. 2003, т. 8, № 3, С. 280 - 286. 4. Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы, Ленинград. 1980, 190 с. 5. Soicher H., Klobuchar J.A., Goodman J.M. Ionospheric effects on radio systems // Radio Sci. 1985, 20, № 3, p. 259. 6. Kailiang D., Jinming M. Comparison of total electron content calculated using the IRI with observations in China. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1994, 3, p. 417 - 422. 7. Коченова Н.А., Гонсалес Х.С., Лазо Б., Лоус Л., Мелендес Б., Хиль Х. Модельные представления суточных изменений летнего слоя F2 над Кубой // Геомагнетизм и аэрономия 1990, т. 30, № 4, С. 620 - 623. 8. Красинец М.В., Нусинов А.А. Зависимость  $F_{10,7}$  от индексов солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 1991, т.31, № 4, С. 741 - 742. 9. Ching B.K., Chiu Y.T. A phenomenological model of global ionosphere electron density in the E-, F1- and F2-regions // J. Atmos. Terr. Phys. 1973, 35, № 9, p. 1615 - 1630. 10. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Sci. 2001, 36, № 2, p. 261 - 275. 11. Sethia G.C., Bayley G.J., Moffett R.J., Hargreaves J.K. A modeling of the effects of neutral air winds on electron content at mid-latitudes in winter // Planet. Space Sci. 1984, 32, № 5, p. 535 - 542. 12. Брунелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М., 1988, 528 с. 13. Захаров И.Г., Тырнов О.Ф. Влияние фазы солнечной активности на сезонные изменения электронной концентрации области F2 ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1986, т.26. № 5, С.847 - 849. 14. Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K.J.F., Ulich T. Semiannual and annual variations in the height of the ionospheric F2-peak // Ann. Geophysicae. 2000. 18, p. 285 - 299.

Поступила в редколлегию 18.04.04