

ЗАПАЗДЫВАНИЕ ОТКЛИКА ГЛОБАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ И ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НА РАЗЛИЧНЫХ ВЫСОТАХ НА 27-ДНЕВНЫЕ ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2021 г. М. В. Клименко^{1*}, В. В. Клименко¹, К. Г. Ратовский², А. С. Ясюкевич¹

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия

²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: maksim.klimenko@mail.ru

Поступила в редакцию 03.10.2020;

после доработки 28.10.2020;

принята в печать 20.11.2020

Мы исследовали влияние 27-дневных вариаций солнечной активности, связанных с вращением Солнца вокруг своей оси, на систему термосфера–ионосфера на разных широтах и высотах, воспользовавшись результатами расчетов модели верхней атмосферы Земли. На основе результатов модельных расчетов были проанализированы связанные процессы в системе термосфера–ионосфера в период с 20 июня по 21 июля 2014 года. Существует отчетливая реакция дневной концентрации электронов N_e в ионосфере на 27-дневные вариации потока солнечного излучения (индекс $F_{10.7}$). Используя сравнительный и корреляционный анализы, мы выявили задержку вариаций рассчитанных в модели дневных значений электронной концентрации N_e на разных высотах, в том числе в максимуме F2-слоя ионосферы (N_mF2), полного электронного содержания и глобального электронного содержания относительно изменений $F_{10.7}$. Показано, что основной возможной причиной задержки являются изменения отношения O/N_2 . Выявленное двухдневное запаздывание глобального электронного содержания согласуется с результатами, полученными ранее по данным наблюдений. Обсуждается высотная структура запаздывания N_e относительно $F_{10.7}$. Результаты расчетов над ионосферными станциями Северного полушария показали, что максимальное запаздывание вариаций N_e относительно $F_{10.7}$ получается в высоких и низких широтах, а меньшее – на субавроральных и средних широтах. Показано, что запаздывание вариаций полного электронного содержания относительно $F_{10.7}$ всегда меньше, чем в случае N_mF2 .

Ключевые слова: ионосфера, солнечная активность, нейтральный состав термосферы, глобальное электронное содержание.

DOI: 10.31857/S0207401X21050058

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионизированная часть верхней атмосферы Земли, сильно влияющая на распространение радиоволн, получила название ионосфера. Ионосфера формируется в результате ионизации нейтральных частиц в верхних слоях атмосферы ультрафиолетовым и рентгеновским солнечным излучением. Наиболее важными и используемыми ионосферными параметрами являются: 1) критическая частота F2-слоя, f_oF2 , которая может быть найдена из ионограмм вертикального зондирования ионосферы; аналогом f_oF2 является электронная концентрация в максимуме F2-слоя, N_mF2 ; 2) полное электронное содержание (ПЭС), данные по которому получают с помощью наземных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем; 3) глобальное электронное содержание

(ГЭС), которое находится путем интегрирования значений ПЭС по всем широтам и долготам [1–3]. Слой F2 существует почти всегда, на всех широтах и долготах, в любой сезон и любое время суток. Временные изменения f_oF2 на разных широтах содержат суточные, сезонные и солнечно-циклические вариации. Согласно [4], морфология временной изменчивости f_oF2 в среднеширотной ионосфере содержит увеличение f_oF2 с ростом солнечной активности. Основная часть вариаций электронной концентрации N_e (~70–74%) связана с солнечным циклом и сезонными вариациями [5]. Анализ суточных вариаций f_oF2 на средних широтах показал хорошую корреляцию между наблюдаемыми среднесуточными и дневными значениями f_oF2 и суточными значениями индекса $F_{10.7}$ [6–11].

Помимо 11-летней вариации солнечного цикла, существуют 27-дневные вариации солнечного потока, вызванные вращением Солнца вокруг своей оси. Многие работы посвящены изучению влияния 27-дневных вариаций солнечного потока на изменчивость ионосферы [11–14]. Временная задержка между вариациями параметров ионосферы и солнечного индекса $F_{10.7}$ была обнаружена в работах [13, 14]. Важным и не до конца решенным остается вопрос о наиболее эффективном индексе солнечной активности при описании наблюдаемых вариаций ионосферных параметров [11]. В недавних работах [15, 16] были представлены результаты анализа влияния отношения O/N_2 на задержку вариаций ионосферных параметров относительно изменений ультрафиолетового излучения Солнца и было показано, что вариации отношения O/N_2 являются основной причиной такой задержки. Кроме того, в работах [15–17] были показаны широтная, долготная и сезонная зависимости ионосферной задержки. Высотная структура задержки обсуждалась в работе [17]. Однако следует заметить, что впервые она была четко выделена по данным наблюдений и результатам модельных расчетов в работе [16]. В настоящей статье мы представляем результаты исследований задержки в изменении смоделированных дневных значений N_mF_2 , ПЭС, ГЭС и N_e на разных высотах на отдельных станциях относительно 27-дневного изменения $F_{10.7}$ в течение временного периода с 20 июня по 21 июля 2014 года.

2. ОПИСАНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ САМОСОГЛАСОВАННОЙ МОДЕЛИ ТЕРМОСФЕРЫ, ИОНОСФЕРЫ И ПРОТОНОСФЕРЫ

Расчеты параметров системы термосфера–ионосфера в выбранный период были выполнены с использованием глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП), основанной на решении дифференциальных уравнений квазигидродинамики, описывающих основные законы сохранения массы, импульса и энергии. Модель ГСМ ТИП была разработана в Западном отделении Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН [18, 19]. В модели рассчитываются следующие зависящие от времени глобальные трехмерные распределения: параметров нейтральной компоненты верхней атмосферы (температуры, состава и векторов скорости ветра) в высотном диапазоне от 80 до 526 км; параметров ионосферы (концентрации, температуры и векторов скорости атомарных и молекулярных ионов и электронов) в диапазоне высот от 80 км до 15 радиусов Земли; электрического потенциала ионосферного и магнитосферного происхождений. Геомагнитное поле в модели аппроксимируется

центральной диполем. Для решения системы моделирующих уравнений в модели используется пространственная сетка в геомагнитной системе координат с шагом 5° по широте, 15° по долготе и переменным шагом по вертикали, увеличивающимся с ростом высоты. Ранее на основе результатов модели ГСМ ТИП были исследованы высотные структуры следующих особенностей распределения электронной концентрации в ионосфере: аномалии моря Уэдделла [20], среднеширотной летней вечерней аномалии [21] и зимней аномалии [22]. В этой статье мы продолжили исследования высотной структуры ионосферы с использованием результатов модели ГСМ ТИП. Для исследования высотной структуры зависимости электронной концентрации от солнечной активности в выполненных расчетах по модели ГСМ ТИП учитывались вариации день ото дня уровня солнечной активности (индекс $F_{10.7}$).

Среднесуточные значения индекса солнечной активности $F_{10.7}$ используются в модели ГСМ ТИП для расчета функции ионизации на основе спектров солнечного излучения, согласно [23]. Следует отметить, что при этом в расчетах не учитывались возможные изменения в нижних слоях атмосферы, связанные с изменениями солнечной активности. Подобные исследования могут быть выполнены в будущем с использованием недавно разработанной модели всей атмосферы EAGLE [24–27], составной частью которой является модель ГСМ ТИП.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны вариации индекса $F_{10.7}$ потока солнечного радиоизлучения и рассчитанного в модели ГСМ ТИП временного хода ГЭС и его среднесуточных значений за рассматриваемый период с 171 по 203 день 2014 года (с 20 июня по 21 июля). Видно, что максимум во временном ходе среднесуточных значений ГЭС имеет задержку, равную ~ 1 сут, относительно максимума во временном ходе $F_{10.7}$ за рассматриваемый период. Кроме того, следует отметить отчетливо проявляющееся усиление амплитуд суточных вариаций ГЭС вблизи максимальных значений $F_{10.7}$.

Для количественной оценки связи среднесуточных значений ГЭС ($\langle \text{ГЭС} \rangle$) и амплитуд его суточных вариаций ($\sigma \text{ГЭС}$) с индексом солнечной активности $F_{10.7}$ были рассчитаны соответствующие кросскорреляционные функции. В качестве параметра, характеризующего $\sigma \text{ГЭС}$, рассматривались среднеквадратичные отклонения значений ГЭС для всех моментов УТ в течение одних суток от среднесуточных значений. На рис. 2 показаны кросскорреляционные функции между $\langle \text{ГЭС} \rangle$ и $F_{10.7}$ (слева) и между $\sigma \text{ГЭС}$ и $F_{10.7}$ (справа). Максимальные значения кросскорреляционных

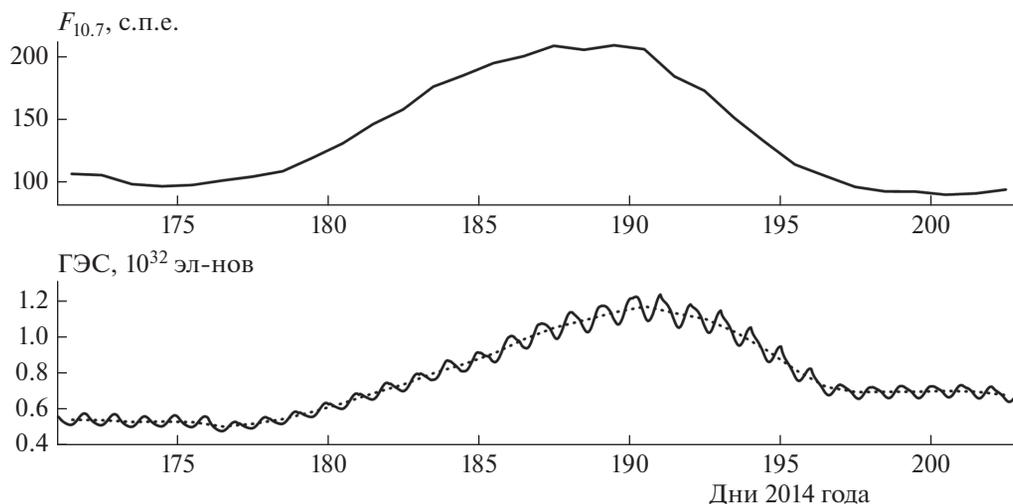


Рис. 1. Поток солнечного радиоизлучения с индексом $F_{10.7}$ в единицах с.п.е (1 с.п.е = 10^{-22} Вт/м² · Гц) —верху и рассчитанный в модели ГСМ ТИП временной ход глобального электронного содержания (сплошная кривая внизу) и его среднесуточных значений (точечная кривая) в период с 171 по 203 день 2014 года (с 20 июня по 21 июля).

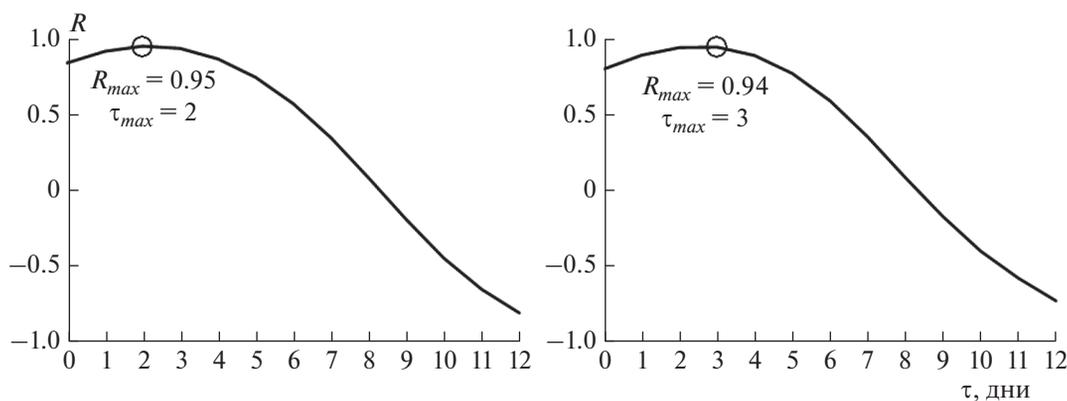


Рис. 2. Кросскорреляционные функции R между $\langle \text{ГЭС} \rangle$ и $F_{10.7}$ (слева) и между $\sigma \text{ГЭС}$ и $F_{10.7}$ (справа); R_{max} — максимальное значение кросскорреляционной функции и τ_{max} — соответствующее этому значению запаздывание.

функций и соответствующие им задержки приведены на этом рисунке как R_{max} и τ_{max} соответственно. Из рисунка видно, что кросскорреляционная функция между $\langle \text{ГЭС} \rangle$ и $F_{10.7}$ достигает своего максимального значения, равного 0.95, с задержкой на 2 сут, тогда как кросскорреляционная функция между $\sigma \text{ГЭС}$ и $F_{10.7}$ достигает своего максимального значения, равного 0.94, с задержкой на 3 сут. Полученное по результатам моделирования двухдневное запаздывание 27-дневных вариаций ГЭС относительно вариаций $F_{10.7}$ согласуется с ранее полученными результатами статистической обработки данных наблюдений ГЭС [28].

На рис. 3 показаны вертикальные профили кросскорреляционных функций между электронной концентрацией N_e на разных высотах, рассчитанной по модели ГСМ ТИП над станциями

Тромсё ($\Phi = 67.2^\circ$, $\Lambda = 117.6^\circ$), Санкт-Петербург ($\Phi = 56.2^\circ$, $\Lambda = 117.9^\circ$), Иркутск ($\Phi = 40.9^\circ$, $\Lambda = 175.1^\circ$) и Хайнань ($\Phi = 8.0^\circ$, $\Lambda = 178.9^\circ$), и $F_{10.7}$ для рассматриваемого летнего периода 2014 года, а также вертикальные профили максимальных значений этих кросскорреляционных функций. Здесь Φ и Λ — геомагнитные широты и долготы станций. Следует отметить общие закономерности, присущие всем выбранным станциям: отсутствие запаздывания вариаций N_e относительно $F_{10.7}$ на высотах нижней ионосферы, его появление и увеличение максимальной задержки с ростом высоты, достигающей своего максимального значения вблизи высоты максимума F2-слоя ионосферы, и затем его падение с ростом высоты во внешней ионосфере до 2 сут в высоких, субавторальных и средних широтах и до 1 сут в низких широтах. Такая зависимость задержки от высоты

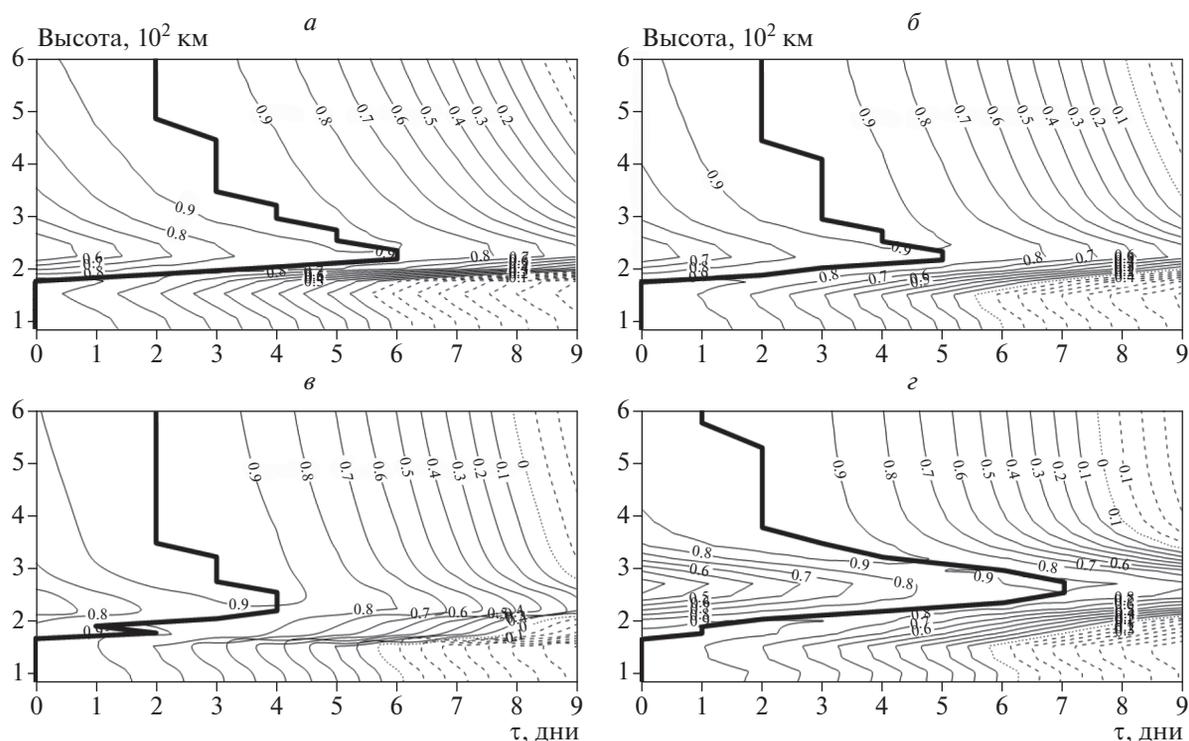


Рис. 3. Вертикальные профили кросскорреляционных функций между средненежными (10:00–14:00 LT) значениями электронной концентрации N_e , рассчитанной в модели ГСМ ТИП над станциями Тромсё (а), Санкт-Петербург (б), Иркутск (в) и Хайнань (з), и $F_{10.7}$ для летнего периода 2014 года. Сплошными жирными линиями показаны вертикальные профили максимальных значений кросскорреляционной функции.

объясняется следующим образом. На высотах нижней ионосферы существенную роль играют процессы ионизации за счет солнечного излучения, поэтому задержка отсутствует. С увеличением высоты возрастает роль процессов рекомбинации, диффузии и динамических процессов. В связи с этим происходит рост максимальной задержки вариаций N_e относительно $F_{10.7}$ до высоты максимума F2-слоя, где диффузионные процессы уравнивают процессы ионизации и рекомбинации. Выше максимума F2-слоя динамические процессы и диффузия начинают преобладать над всеми остальными, вследствие чего, по-видимому, и происходит уменьшение задержки во внешней ионосфере. Что касается широтной зависимости запаздывания, то для высокоширотной станции Тромсё максимальное запаздывание вариаций N_e относительно $F_{10.7}$ составляет 6 сут, на субавроральной станции Санкт-Петербург – 5 сут, на среднеширотной станции Иркутск – 4 сут и на низкоширотной станции Хайнань – 7 сут. Таким образом, максимальное запаздывание вариаций N_e относительно $F_{10.7}$ имеет два широтных максимума: в высоких и низких широтах. При переходе от высоких широт к субавроральным и средним широтам происходит последовательное уменьшение максималь-

ной задержки с последующим ее ростом на низких широтах.

Далее были рассмотрены два вопроса: 1) различия в запаздывании между N_mF2 и ПЭС относительно $F_{10.7}$; 2) механизм формирования запаздывания вариаций N_mF2 относительно $F_{10.7}$. Для этого были рассмотрены вариации средненежных значений различных параметров на среднеширотной станции Иркутск. На рис. 4 показаны кросскорреляционные функции между рассчитанными по модели ГСМ ТИП над Иркутском средненежными значениями (10:00–14:00 LT) ПЭС и N_mF2 (слева), а также O/N_2 относительно $F_{10.7}$ (справа). Видно, что максимальное значение кросскорреляционной функции для N_mF2 составляет 0.95 при его задержке на 3 сут относительно вариаций $F_{10.7}$, для ПЭС – 0.97 при его задержке на 2 сут и для O/N_2 – 0.94 при его задержке на 5 сут. Заметим, что расчет отношения O/N_2 мы проводили, основываясь на методике расчета GUVI [29]. Видно, что задержки ПЭС и N_mF2 над Иркутском лежат в интервале от 0 (отсутствие задержки) до 5 сут (задержка вариаций O/N_2 относительно $F_{10.7}$). Это объясняется тем, что из-за большей плотности нейтральной атмосферы ее состав реагирует с большей задержкой на изменения солнечной ак-

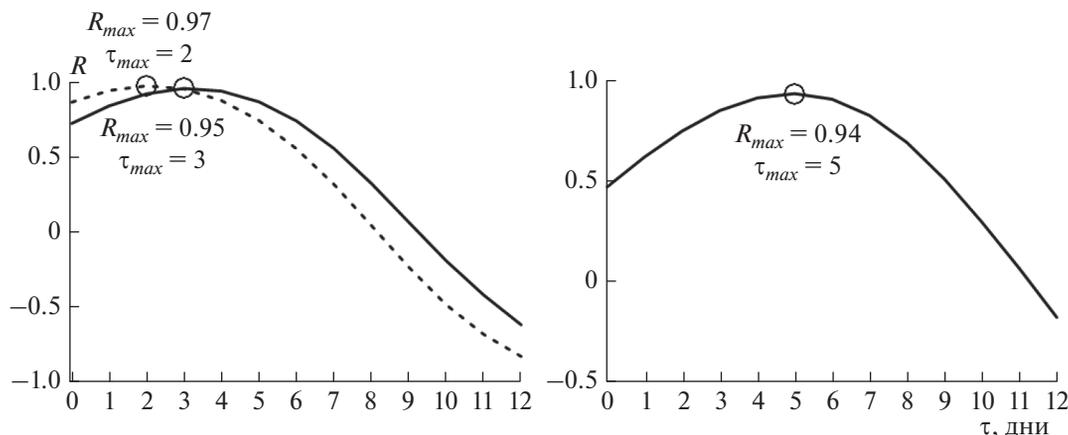


Рис. 4. Слева – кросскорреляционные функции R между рассчитанными над Иркутском среднедневными значениями ПЭС (штриховая кривая) и $N_m F_2$ (сплошная кривая), а также O/N_2 (справа) относительно $F_{10.7}$; R_{max} – максимальное значение кросскорреляционной функции и τ_{max} – соответствующая ему задержка.

тивности, чем менее плотная заряженная компонента верхней атмосферы, которая помимо процессов ионизации и рекомбинации подвержена влиянию динамических процессов (диффузия и перенос). И именно изменения нейтрального состава (отношения O/N_2) играют определяющую роль в формировании задержки N_e на высотах F-области относительно $F_{10.7}$. Такой же вывод был сделан ранее при исследовании в период января 2013 года [30]. Важно отметить, что задержка ПЭС меньше задержки $N_m F_2$. Что касается этого факта, то он объясняется тем, что ниже и выше высоты максимума F-области запаздывание вариаций N_e относительно $F_{10.7}$ значительно уменьшается (как показал рис. 3, до 0 дней в E-области и до 1 дня во внешней ионосфере). Возможной причиной такого поведения является то, что: 1) с увеличением высоты плотность нейтральной атмосферы падает и влияние задержки вариаций O/N_2 с ростом высоты уменьшается; 2) на меньших высотах время жизни электрон-ионных пар мало, что уменьшает значимость изменений нейтрального состава при рассмотрении процессов на больших (часовых) временных периодах. Описанные выше факты приводят к тому, что задержка вариаций ПЭС относительно $F_{10.7}$ меньше по сравнению с задержкой в случае в $N_m F_2$.

4. ВЫВОДЫ

На основании модельных расчетов показано следующее.

1. Модель ГСМ ТИП воспроизводит выявленное ранее научным коллективом под руководством Э.Л. Афраймовича двухдневное запаздывание вариаций глобального электронного содержания относительно $F_{10.7}$; при этом запаздывание амплитуды

суточных вариаций ГЭС относительно вариаций $F_{10.7}$ составляет 3 дня.

2. Основной возможной причиной формирования запаздывания электронной концентрации на высотах F-области относительно $F_{10.7}$ является изменение отношения O/N_2 .

3. Для ионосферных станций Северного полушария максимальное запаздывание вариаций N_e относительно $F_{10.7}$ формируется в высоких и низких широтах с меньшим запаздыванием в субавторальных и средних широтах.

4. Общими закономерностями, присущими всем станциям, являются отсутствие запаздывания вариаций электронной концентрации относительно $F_{10.7}$ на высотах нижней ионосферы, его появление и увеличение максимальной задержки с ростом высоты, достигающей своего максимального значения вблизи высоты максимума F2-слоя ионосферы, и затем ее падение с высотой во внешней ионосфере до 2 сут в высоких, субавторальных и средних широтах и до 1 сут на низких широтах. В связи с такой высотной структурой запаздывания задержка вариаций ПЭС относительно $F_{10.7}$ всегда меньше по сравнению с задержкой в случае $N_m F_2$.

Авторы благодарны Центру данных о физике космоса НАСА (NASA's Space Physics Data Facility, SPDF) за использование солнечных индексов через веб-сайт <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-55-52006 МНТ_а и частично Министерством образования и науки Российской Федерации (программа фундаментальных исследований П.16).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В.* // ДАН. 2006. Т. 409. № 3. С. 399.
2. *Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. и др.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 2. С. 195.
3. *Ратовский К.Г., Клименко М.В., Ясюкевич Ю.В. и др.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 10. С. 57; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20100106>
4. *Фаткуллин М.Н.* // Итоги науки и техники. Сер. "Геомагнетизм и высокие слои атмосферы". Т. 4. М.: ВИНТИ, 1978. С. 6.
5. *Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V. et al.* // Radio Sci. 2005. V. 40. RS5009; <https://doi.org/10.1029/2004RS003179>
6. *Lei J., Liu L., Wan W. et al.* // Radio Sci. 2005. V. 40. RS2008; <https://doi.org/10.1029/2004RS003106>
7. *Liu L., Wan W., Ning B. et al.* // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A08304; <https://doi.org/10.1029/2006JA011598>
8. *Oinats A.V., Ratovsky K.G., Kotovich G.V.* // Adv. Space Res. 2006. V. 37. Issue 5. P. 1018; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.12.011>
9. *Ratovsky K.G., Medvedev A.V., Tolstikov M.V.* // Adv. Space Res. 2015. V. 55. Issue 8. P. 2041; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.08.001>
10. *Абдуллаев А.Р., Марков А.В., Клименко М.В. и др.* // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 12. С. 39; <https://doi.org/10.7868/S0207401X17120020>
11. *Чурик Н.В., Клименко М.В., Карпачев А.Т. и др.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 7. С. 93; <https://doi.org/10.1134/S199079311804005X>
12. *Akasofu S.I., Chapman S.* Solar-Terrestrial Physics. Oxford: Pergamon, 1972.
13. *Jakowski N., Fichtelmann B., Jungst A.* // J. Atmos. Terr. Phys. 1991. V. 53. № 11–12. P. 1125; [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(91\)90061-B](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90061-B)
14. *Oinats A.V., Ratovsky K.G., Kotovich G.V.* // Adv. Space Res. 2008. V. 42. P. 639; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.02.009>
15. *Ren D., Lei J., Wang W. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2018. V. 123. P. 7906; <https://doi.org/10.1029/2018JA025835>
16. *Klimenko M.V., Karpachev A.T., Ratovsky K.G. et al.* // Proc. 2019 Russian Open Conf. on Radio Wave Propagation (RWP). USA: IEEE, 2019. P. 117; <https://doi.org/10.1109/RWP.2019.8810245>
17. *Schmölter E., Berdermann J., Jakowski N. et al.* // Ann. Geophys. 2020. V. 38. P. 149; <https://doi.org/10.5194/angeo-38-149-2020>
18. *Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Forster M. et al.* // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № A7. P. 14697; <https://doi.org/10.1029/98JA00210>
19. *Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46. № 4. С. 485; <https://doi.org/10.1134/S0016793206040074>
20. *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T. et al.* // Adv. Space Res. 2015. V. 55. Issue 8. P. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.12.032>
21. *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G. et al.* // Adv. Space Res. 2015. V. 56. Issue 9. P. 1951; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.07.019>
22. *Клименко М.В., Клименко В.В., Захаренкова И.Е. и др.* // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 10. С. 83; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19070082>
23. *Нусинов А.А., Бруевич Е.А.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т. 24. С. 529.
24. *Клименко М.В., Бессараб Ф.С., Суходолов Т.В. и др.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 7. С. 70; <https://doi.org/10.1134/S0207401X18070105>
25. *Клименко В.В., Клименко М.В., Бессараб Ф.С. и др.* // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 7. С. 86; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19070070>
26. *Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bessarab F.S. et al.* // Adv. Space Res. 2019. V. 64. Issue 10. P. 1854; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.06.029>
27. *Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko M.V. et al.* // Adv. Space Res. 2021. V. 67. Issue 1. P. 133.
28. *Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V. et al.* // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 335; <https://doi.org/10.5194/angeo-26-335-2008>
29. *Christensen A.B., Paxton L.J., Avery S. et al.* // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № A12. P. 1451; <https://doi.org/10.1029/2003JA009918>
30. *Ясюкевич А.С., Клименко М.В., Куликов Ю.Ю. и др.* // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 4. С. 62; <https://doi.org/10.12737/szf-44201807>