

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-04>

УДК 550.34:550.510.533

ДОЛГОТНЫЕ ВАРИАЦИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

И.Г. Захаров, А.М. Цымбал

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4

E-mail: zakharov@karazin.ua

Поступила в редакцию 24 января 2019 г.

Актуальность. В последние годы стало ясно, что вопросы динамики верхней атмосферы и ионосферы следует рассматривать как неотъемлемую часть климатологии атмосферы в целом. Долготные особенности параметров ионосферы обусловлены в основном влиянием на ионосферу нижележащих слоев атмосферы, а также литосферы. Благодаря этому, их исследование является эффективным инструментом изучения климатологии атмосферы, что важно для прогноза среды обитания человека и решения ряда других прикладных задач.

Цель работы – анализ долготных вариаций полного электронного содержания (ПЭС) среднеширотной ионосферы и их возможной связи с процессами в нижней атмосфере, литосфере и геокосмосе.

Материалы и методы. Исследования проведены с использованием данных о ПЭС, полученным по измерениям сигналов навигационных спутников в январе 2018 года. Используются также данные о приземном атмосферном давлении на долготной цепочке метеорологических станций вблизи широты 40° N, а также данные о сейсмической активности и космической погоде. Используются метод множественного регрессионного анализа и другие статистические методы анализа.

Результаты. Установлены значительные долготные вариации ПЭС (в противофазе с вариациями приземного атмосферного давления), которые можно представить в виде суммы нескольких зональных мод. Рассмотрены особенности изменчивости амплитуды этих мод в зависимости от процессов в литосфере, тропосфере и геокосмосе. Установлены "критические" даты, вблизи которых взаимосвязь между процессами в различных земных оболочках значительно возрастает.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии на ионосферу нижележащих слоев атмосферы за счет распространения вверх планетарных волн, запускающих ряд вторичных процессов на высотах нижней термосферы. Активность указанных процессов коррелирует с разностью атмосферного давления в далеко разнесенных пунктах наблюдения, что указывает на возможность трансформации локальных атмосферных возмущений в общепланетарные.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полное электронное содержание, долготные эффекты, планетарные волны.

ДОВГОТНІ ВАРІАЦІЇ ПОВНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ВМІСТУ СЕРЕДНЬОШИРОТНОЇ ІОНОСФЕРИ

І.Г. Захаров, А.М. Цимбал

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, м. Харків, пл. Свободи, 4

Актуальність. В останні роки стало ясно, що питання динаміки верхньої атмосфери і іоносфери слід розглядати як невід'ємну частину кліматології атмосфери в цілому. Довготні особливості параметрів іоносфери обумовлені в основному впливом на іоносферу нижчих шарів атмосфери, а також літосфери. Завдяки цьому їх дослідження є ефективним інструментом вивчення кліматології атмосфери, що важливо для прогнозу стану довкілля і рішення низки інших прикладних задач.

Мета роботи – аналіз довготних варіацій повного електронного вмісту (ПЕВ) середньоширотної іоносфери і їх можливий зв'язок з процесами в нижній атмосфері, літосфері та геокосмосі.

Матеріали та методи. Дослідження проведені з використанням даних про ПЕВ, отриманих за вимірюваннями сигналів навігаційних супутників у січні 2018 року. Використано також дані про приземний атмосферний тиск на довготному ланцюжку метеорологічних станцій поблизу широти 40° N, а також дані про сейсмічну активність і космічну погоду. Використано метод множинного регресійного аналізу та інші статистичні методи аналізу.

Результати. Встановлено значні довготні варіації ПЕВ (у протифазі з варіаціями приземного атмосферного тиску), які можна представити у вигляді суми декількох зональних мод. Розглянуто особливості мінливості амплітуди цих мод в залежності від процесів у літосфері, тропосфері та геокосмосі. Встановлено "критичні" дати, поблизу яких взаємозв'язок між процесами в різних земних оболонках значно зростає.

Висновки. Отримані результати свідчать про значний вплив на іоносферу нижчих шарів атмосфери за рахунок поширення вгору планетарних хвиль, що запускають ряд вторинних процесів на висотах нижньої термосфери. Активність зазначених процесів корелює з різницею атмосферного тиску в далеко рознесених пунктах, що вказує на можливість трансформації локальних атмосферних збурень в загальнопланетарні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: повний електронний вміст, довготні ефекти, планетарні хвилі.

LONGITUDINAL VARIATIONS OF THE TOTAL ELECTRONIC CONTENT OF THE MID-LATITUDE IONOSPHERE**I.G. Zakharov, A.M. Tsybal***V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine*

Background: In recent years, it has become clear that the issues of dynamics of the upper atmosphere and ionosphere should be considered as an integral part of the atmosphere climatology as a whole. The longitudinal features of the ionospheric parameters are mainly due to the effect on the ionosphere of the lower atmosphere layers, as well as the lithosphere. Thanks to this, their study is an effective tool for studying the atmosphere climatology, which is important for predicting the human environment and solving a number of other applied problems.

Objectives of the work is the analysis of longitudinal variations in the total electron content (TEC) of the mid-latitude ionosphere and their possible association with processes in lower atmosphere, lithosphere and geocosmos.

Materials and methods. The studies were carried out using data on TEC obtained from measurements of navigation satellite signals in January 2018. We also used data on surface atmospheric pressure at longitude chain of meteorological stations near latitude 40° N, as well as data on seismic activity and space weather. The method of multiple regression analysis and other statistical methods of analysis are used.

Results. Significant longitudinal variations in TEC (in antiphase with variations in surface atmospheric pressure) are established, which can be represented as the sum of several zonal modes. The features of amplitude variability of these modes depending on the processes in the lithosphere, troposphere and geocosmos are considered. "Critical" dates have been established, near which the relationship between processes in different earth shells increases significantly.

Conclusions. The results obtained indicate a significant effect on the ionosphere of lower layers of the atmosphere due to propagation of planetary waves upward, triggering a number of secondary processes at the heights of the lower thermosphere. The activity of these processes correlates with the difference in atmospheric pressure at widely spaced observation points, which indicates the possibility of the transformation of local atmospheric disturbances into planetary ones.

KEY WORDS: total electron content, longitudinal effects, planetary waves.

ВВЕДЕНИЕ

В большинстве моделей верхней атмосферы и ионосферы принимается, что изменение параметров атмосферы и ионосферы по долготе незначительны. Однако результаты измерений не подтверждают такое предположение. Определенный вклад в долготные различия на ионосферных высотах вносит несоответствие географического и геомагнитного полюсов планеты. Эти особенности очевидны для высокоширотной ионосферы и сохраняют свое значение на средних широтах [1].

Еще больших различий следует ожидать из-за существенной зависимости ветрового поля верхней атмосферы (как минимум ее нижней части) от долготы: незональность ветрового поля в нижней термосфере является принципиальной особенностью климатологии ветров на этих высотах [2]. Эта зависимость связана с региональными особенностями нижней атмосферы и зависимостью от долготы характеристик распространяющихся снизу планетарных волн, приливов и внутренних гравитационных волн [см., например, 2-4], способных проникать в нижнюю термосферу. В области F2 также установлены значительные долготные различия ионосферных параметров, несмотря на то, что проникновение на эти высоты наиболее важного типа волн – планетарных – затруднена [4-7]. Полагают, что на большие высоты эти неоднородности передаются за счет вторичных эффектов, изученных в настоящее время недостаточно [4-7]. В целом, ионосферная изменчивость, вызванная процессами в нижней атмосфере, может быть сопоставима с типичной изменчивостью, вызванной геомагнитными факторами [8]. Следовательно, есть все основания рассматривать вопросы динамики верхней атмосферы и ионосферы как неотъемлемую часть климатологии атмосферы в целом [9].

Теоретические исследования данного вопроса содержат неизбежные упрощения, которые приводят к различиям теории и эксперимента. В таких условиях представляется важным получение экспериментальных свидетельств взаимодействия разных слоев атмосферы. В качестве индикатора процессов в верхней атмосфере удобно использовать ионосферные данные, так как длительные наблюдения нейтральных параметров атмосферы на таких высотах затруднены. Дополнительные преимущества создаются при использовании данных о полном электронном содержании (ПЭС) ионосферы, полученных по измерениям сигналов навигационных спутников на наклонных трассах, что позволяет строить глобальные карты ПЭС не только над сушей, но и над акваторией без интерполяции.

Цель работы – анализ долготных вариаций ПЭС среднеширотной ионосферы и их возможной связи с процессами в нижней атмосфере, литосфере и геокосмосе.

ДАнные И МЕТОды АНАЛИЗА

Для анализа долготных вариаций использованы глобальные карты ПЭС, которые строятся по измерениям сигналов навигационных спутников с узлами сетки с шагом 2,5° по широте, 5° по долготе и

1 час по времени. Данные картографирования в виде ежесуточных таблиц доступны на сайте <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>. В нашей работе для анализа долготных эффектов использованы данные за январь 2018 года на широте 40° N, которая в равной мере удалена как от авроральной, так и экваториальной зон ионосферы, имеющих существенные особенности в пространственном распределении ионосферных параметров. Ниже значения ПЭС приведены в общепринятых единицах $\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Для оценки процессов в нижней атмосфере использованы данные о приведенном к уровню моря атмосферном давлении (P_0) 13 метеорологических станций (сайт www.gismeteo.ru/diary) вблизи широты 40° N: Понта-Гарса ($25,4^\circ$ W), Валенсия ($0,4^\circ$ W), Лечче ($18,2^\circ$ E), Ларисса ($22,4^\circ$ E), Бурса ($29,1^\circ$ E), Баку ($49,9^\circ$ E), Ташкент ($69,2^\circ$ E), Пекин ($116,4^\circ$ E), Пхеньян ($125,8^\circ$ E), Акита ($140,1^\circ$ E), Боулдер ($105,5^\circ$ W), Канзас-Сити ($95,6^\circ$ W), Филадельфия ($75,2^\circ$ W). Для выделения влияний нижней атмосферы на ионосферу на фоне непрерывно влияющих факторов космической погоды, использованы данные о солнечной (плотность потока радиоизлучения Солнца $F_{10,7}$) и геомагнитной (индекс A_p) активностей с сайта <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/>. Роль литосферы рассматривалась с использованием такого понятия как глобальная сейсмическая активность (ГСА), которая оценивалась по максимальной за сутки магнитуде землетрясения (M_{max}). Данные о землетрясениях взяты на сайте <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Средние долготные вариации ПЭС демонстрируют четыре максимума (Рис. 1 – отрицательные значения соответствуют западной долготе), положение которых по долготе в течение месяца оставалось почти неизменным, но постепенно менялась их амплитуда. Размах колебаний долготных вариаций ПЭС составил почти 3 TECU, или 43 % от среднего значения ПЭС за период наблюдений. Еще более поразительным являются резкие долготные градиенты ПЭС. Максимальные изменения ПЭС, превышающие во многие дни 50 % от средних значений ПЭС в данные сутки, наблюдались в интервале от Азорских островов (25° W) до Европы (около 30° E). Подобные градиенты сопоставимы с суточными градиентами ПЭС на средних широтах. Значительные долготные градиенты параметров ионосферы (критическая частота области F2) фиксировались и ранее [см., например, 4].

Как известно, Азорским островам соответствует один из наиболее значительных и постоянно существующих максимумов атмосферного давления, что позволяет допустить связь приземного давления и процессов в ионосфере. Расчеты средних долготных вариаций P_0 по данным 13 станций показали их высокое сходство (в противофазе) с долготными вариациями ПЭС (Рис. 1), особенно на долготах от Азорских островов до Европы.

Установленные крупномасштабные особенности долготных вариаций ПЭС можно представить как сумму трех гармонических функций с периодами 2π , π и $\pi/2$. Учитывая стабильное положение максимумов ПЭС, представляется очевидным связать их с проявлением стационарных планетарных волн (СПВ) с несколькими зональными модами: $m = 1, 2$ и 4.

На Рис. 2 приведен пример долготных вариаций ПЭС для 27.01.2018 в круговых координатах, который дает наглядное представление об указанных модах: мода $m = 1$ характеризует степень смещения от центра исходного круга равных значений ПЭС, $m = 2$ – определяет его превращение в эллипс, $m = 4$ – наличие двух перекрещивающихся "эллипсов". По результатам множественного регрессионного анализа, амплитуды мод $m = 1, 2$ и 4 значительно превышают погрешность расчета, тогда как мода $m = 3$ во всех случаях близка к нулю. В Таблице приведены средние за январь значения амплитуд зональных мод ПЭС и примеры для двух дней, характеризующие степень изменчивости их амплитуды. Изменчивость амплитуды мод приводит к заметному изменению формы долготных вариаций ПЭС (см. ниже Рис. 5). В среднем, моды $m = 1, 2$ и 4 обеспечивают 32, 41 и 27 %, соответственно, вклада в долготные вариации ПЭС.

В отдельные дни амплитуда указанных мод, особенно $m = 1$ и 2, меняются в значительных пределах, при этом почти всегда в противофазе друг к другу (коэффициент корреляции $r = -0,59$; см. также Рис. 3). Видно, что обратная зависимость между этими модами

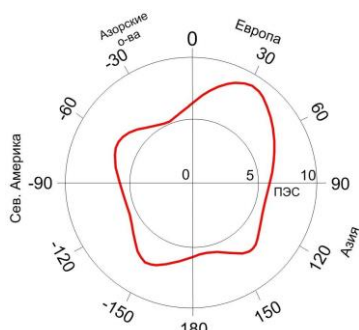


Рис. 2. Пример долготных вариаций ПЭС 27.01.2018 в круговых координатах.

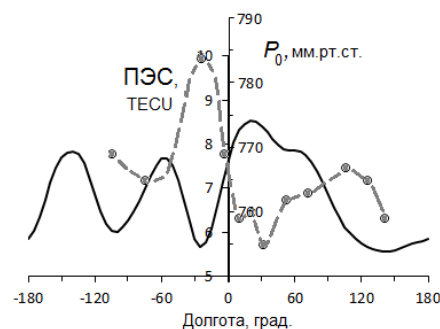


Рис. 1. Средние за месяц долготные вариации ПЭС (сплошная кривая) и атмосферного давления (пунктир) в январе 2018 г.

представлена двумя отдельными (с уровнем значимости $p < 0,05$) зависимостями:

$$A_{m=2} = 1,15 - 1,31A_{m=1} \quad (S_1); \quad A_{m=2} = 0,84 - 1,46A_{m=1} \quad (S_2),$$

при почти полном отсутствии промежуточных значений. Таким образом, имеются два состояния атмосферы S_1 и S_2 , переход между которыми происходит, в основном, за счет резкого изменения амплитуды моды $m = 1$. Как известно, такие переходы характерны для нелинейных систем.

Таблица. Амплитуды зональных мод ПЭС, TECU

Дата	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	Погр. расчета
11.01.2018	6,66	0,66	0,17	0,09	0,31	$\pm 0,09$
29.01.2018	6,94	0,07	0,76	0	0,39	$\pm 0,06$
Январь 2018	6,86	0,45	0,57	0,04	0,38	$\pm 0,06$

Рассмотрим возможную роль возмущений в литосфере, атмосфере, магнитосфере и геокосмосе в изменчивости установленных долготных вариаций ПЭС ото дня ко дню. На Рис. 4 показаны (сверху вниз) изменения ото дня ко дню геомагнитной активности (ГМА), ПЭС (в среднем и на долготе $150^\circ W$), амплитуда мод $m = 1$ и 2 (шкала направлена вниз), разность атмосферного давления, ΔP_{E-TO} , между Европой ($22^\circ E$) и западным побережьем Тихого океана ($140^\circ E$), а также ГСА (M_{max}) в январе 2018 г. Данные о солнечной активности (СА) не рассматривались ввиду незначительных вариаций $F_{10.7}$, характерных для минимума 11-летнего цикла СА. Несмотря на определенные тенденции, в целом, тесных связей между приведенными характеристиками не просматривается, что указывает на отсутствие доминирующего влияния одной из геосфер на другие. Изменения ГМА также были невелики: максимальные значения A_p не достигали уровня слабых геомагнитных бурь, однако, даже таких изменений ГМА оказалось достаточно, чтобы оказать влияние на ПЭС: связь изменений указанных величин характеризуется коэффициентом корреляции $r = +0,33$ ($p < 0,1$). Механизмом такого влияния могут быть изменения меридионального ветра в термосфере при увеличении ГМА, поднимающие ионосферные слои вдоль силовых линий в зону более низкой рекомбинации. Ранее [10] также была установлена связь геомагнитными и ионосферными характеристиками при низком уровне ГМА, а в работе [11] показано, что в минимуме СА переход от длительно существовавших (не менее 7 суток) спокойных условий к магнито-возмущенным (до $A_p \approx 15$) приводил к возмущениям электронной концентрации на высотах области F2 до 40 %, т.е. до уровня, характерного для средней геомагнитной возмущенности.

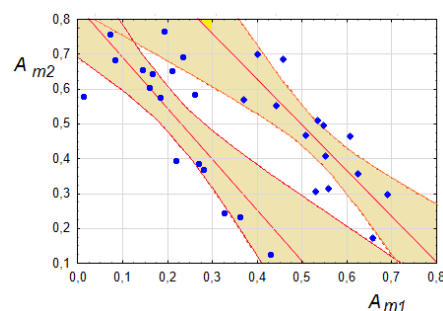


Рис. 3. Регрессионная зависимость амплитуд мод $m = 1$ и $m = 2$. Выделены интервалы погрешности расчета ($p < 0,05$).

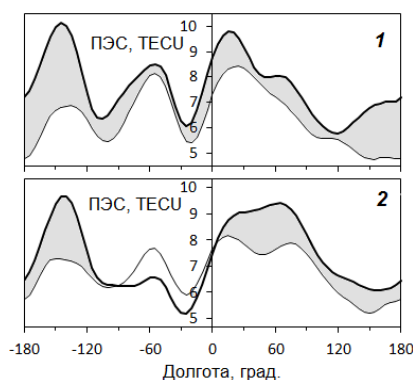
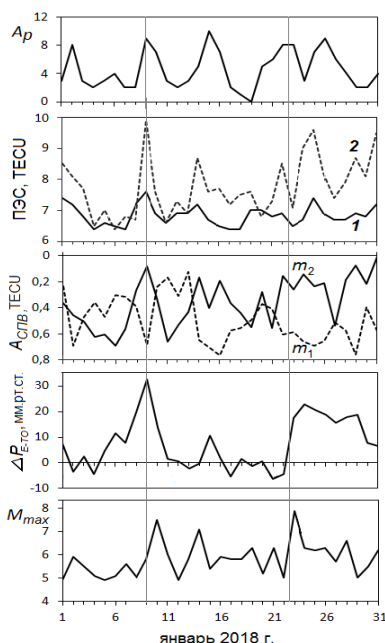


Рис. 4 (слева). Временные вариации ГМА, ПЭС (1 – средние по долготе, 2 – на долготе $145^\circ W$, зональных мод ПЭС, разности давления между Европой и Азией и ГСА.

Рис. 5 (справа). Изменения ПЭС вблизи критических дат (вертикальные линии на рис. 4): 1 – 9 и 11 января, 2 – 21 и 25 января.

Несмотря на упомянутое выше отсутствие очевидных связей между рассматриваемыми

показателями, в отдельные дни с резкими изменениями их значений связь представляется более наглядной. На Рис. 4 такие резкие изменения легче всего заметить в ГСА. Видно, что 9-10 и 22-23 января (назовем эти даты критическими – см. вертикальные линии) уровень ГСА резко увеличился, после чего постепенно уменьшался на протяжении нескольких дней. Первый рост ГСА проявился наиболее сильным землетрясением (ЗТ) с магнитудой $M = 7,5$ (координаты эпицентра $17,5^\circ \text{ N}; 83,5^\circ \text{ W}$), второй – ЗТ с $M = 7,9$ ($56,2^\circ \text{ N}; 149,2^\circ \text{ W}$). В значениях ПЭС и ГМА также заметны изменения вблизи указанных дат, хотя для ГМА они были сопоставимы с изменениями в другие дни. В ПЭС, кроме увеличения средних значений вблизи критических дат, происходило заметное изменение характера долготных вариаций ПЭС за счет его роста преимущественно над европейским и особенно американским континентами (Рис. 5), что привело к резкому увеличению зональной моды $m = 2$.

Вблизи критических дат наиболее значительные изменения – на 25 – 35 мм. рт. ст. – претерпели не абсолютные значения, а разность атмосферного давления, ΔP_{E-TO} , между Европой и тихоокеанским побережьем (Рис. 4), что непременно будет сопровождаться перемещением крупных воздушных масс. Таким образом, налицо значительная синхронизация процессов от литосферы до ионосферы и, возможно, до геокосмоса (в критические даты отмечается также рост A_p , хотя амплитуда максимумов в эти дни такая же, как в других максимумах A_p), по крайней мере, вблизи выделенных критических дат. При этом одновременно реализовывалась как локальная связь (сразу в нескольких геосферах процессы были более активными в западном полушарии), так и глобальная, когда изменения ПЭС оказывались максимально сходными на противоположных частях земного шара (на долготах максимумов моды $m = 2$), но могли различаться на более близких долготах.

Дополнительно наличие связей между геосферами подтверждается корреляционным анализом. Изменения ПЭС, кроме отмеченной выше связи с ГМА, характеризуются слабой положительной связью ($r = 0,1 - 0,3$) с атмосферным давлением на станциях европейского и американского континентов, и такой же по величине, но отрицательной связью – с атмосферным давлением над Азией. В то же время, установлена достоверная связь между ПЭС и разностью атмосферного давления ΔP_{E-TO} между Европой и западным побережьем Тихого океана. Отметим, что различие нагрева атмосферы над сушей и морем рассматривается как один из факторов зарождения и интенсификации СПВ [12]. Мода $m = 1$ уменьшается при увеличении ПЭС ($r = -0,47$) и ΔP_{E-TO} ($r = -0,46$), мода $m = 2$ при этом увеличивается. Мода $m = 2$ также пропорциональна A_p ($r = +0,45$). Мода $m = 4$ слабо меняется при изменении ПЭС и ΔP_{E-TO} , но имеет достоверную связь с максимальной магнитудой ЗМ M_{max} ($r = -0,45$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные расчеты и анализ указывают на наличие определенных связей между геосферами. Сложнее решить вопрос о роли влияющего фактора, обусловившего наблюдаемую синхронизацию процессов в геосферах вблизи указанных критических дат. Принимая во внимание резкие изменения одновременно или накануне роста ГСА разности давлений ΔP_{E-TO} над участками земной поверхности, разнесенными на несколько тысяч километров, а также полученные ранее результаты о роли перемещения крупных воздушных масс в инициации подготовленных ЗТ (см., например, [10, 13, 14]), можно утверждать, что и в данном случае такая связь не случайна. Следует подчеркнуть, что речь идет не просто об изменении давления на земную поверхность при перемещении воздушных масс над очагом готовящегося ЗТ [13, 14], а о глобальном процессе. В этом случае, возможно, механизм инициации ЗТ может быть связан с изменениями параметров скорости вращения Земли, обусловленные перемещением воздушных масс. Правдоподобность данного механизма подтверждается наличием хорошо известной зависимости параметров вращения Земли от сезонных перемещений воздушных масс.

Устойчивый характер долготных вариаций ПЭС в виде суммы трех основных зональных мод не оставляет сомнений в значительном влиянии СПВ на ионосферу. При этом связь ПЭС с разностью давления ΔP_{E-TO} более сильная, чем с давлением на любой из станций, в том числе между P_0 на некоторой метеостанции и ПЭС над ней ($r < 0,25$). Таким образом, первоначально локальные изменения атмосферного давления способны приводить к глобальным изменениям одновременно в нескольких геосферах, при этом СПВ выступают как один из важных элементов такой глобализации.

Как известно, формирующийся зимой страто-мезосферный циклонический вихрь с переносом воздуха с запада на восток (см., например, [15]), является благоприятным для проникновения СПВ на высоты нижней термосферы. Проникновение СПВ на большие высоты затруднено из-за преобладания на этих высотах процессов молекулярной диффузии (вместо турбулентности ниже термосферы), поэтому нейтральный газ в термосфере и ионосфере формально не вовлечен в общий процесс атмосферной циркуляции [4-9, 15]. В связи с этим рассматривают дополнительные механизмы, обеспечивающие влияние СПВ на ионосферу. В частности, показано, что опускание молекулярного газа из нижней термосферы в область активной циклонической циркуляции в мезосфере и стратосфере приводит к

увеличению отношения концентраций основных газовых составляющих $[O^+]/[N_2]$ на высотах термосферы и, следовательно, к увеличению электронной концентрации и уменьшению высоты максимума ионизации [15]. Над областью высокого давления в антициклоне изменения противоположны. Принимая во внимание выраженную противофазность в изменении атмосферного давления и ПЭС, можно утверждать, что полученные результаты подтверждают реальность предложенного ранее [см., например, 4] механизма влияния планетарных волн на область F2 ионосферы.

ВЫВОДЫ

1. Для условий минимума СА и зимнего сезона на средних широтах северного полушария установлены значительные долготные вариации ПЭС в противофазе с долготными вариациями приземного атмосферного давления. Максимумы и минимумы ПЭС в течение всего периода наблюдений проявлялись на одних и тех же долготах, но характеризовались значительными изменениями их амплитуды, что указывает на их связь со стационарными планетарными волнами.

2. Долготные вариации ПЭС описываются суммой трех зональных мод $m = 1, 2$ и 4 , которые обеспечивают, в среднем, 32, 41 и 27 % вклада в ПЭС. Амплитуда мод $m = 1$ и 2 ото дня ко дню изменяется в противофазе (коэффициент корреляции $r = -0,59$); период доминирования одной из гармоник составляет 4 – 5 суток, а моменты резкой смены амплитуды коррелируют с изменениями атмосферного давления (особенно с разностью давления в Европе и на побережье Тихого океана), изменениями ПЭС и ГСА. Мода $m = 4$ более стабильная по амплитуде и проявляет умеренную, но при этом достоверную связь с изменениями глобальной сейсмической активности ($r = -0,45$).


3. Полученные результаты подтверждают предложенный ранее механизм влияния планетарных волн на электронную концентрацию ионосферы за счет изменения отношений концентраций основных газовых составляющих $[O^+]/[N_2]$ на высотах нижней термосферы, где еще непосредственно проявляется тропо-страто-мезосферная циклоническая циркуляция.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Authors' ORCID ID

I.G. Zakharov  <http://orcid.org/0000-0002-3262-9984>.

A.M. Tsybal  <https://orcid.org/0000-0002-5274-8876>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zakharov, I.G., Tyrnov O.F. A Model of the Total Columnar Electron Content in the Ionosphere for the Latitudes 25 to 70°N // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. V. 53, No. 4–5. – P. 38 – 44.
2. Kazimirovsky E.S., Vergasova G.V. The non-zonal effect in the dynamical structure of the midlatitude MLT-region // Adv. Space Res. – 2001. – V. 27, No. 10. – P. 1673–1678.
3. Kazimirovsky E.S., Manson A.H., Meek C.E. Winds and waves in the middle atmosphere // J. Atmos. Terr. Phys. – 1988. – V. 50, No. 3. – P. 243–250.
4. Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Куркин В.И., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А.Е., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Коренькова Н.А., Лещенко В.С., Мелич Й. Пространственные вариации параметров ионосферы северного полушария над зимними струйными течениями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 4. – С. 204–215.
5. Laštovička J. Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2009. – V. 71, No. 14–15. – P. 1514–1528.
6. Prölss G.W., Werner S. Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms // J. Geophys. Res. – 2002. – V. 107, No. A2. – P. 1016. – DOI:10.1029/2001JA900126.
7. Rishbeth H. F-region links with the low atmosphere? // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2006. – V. 68. – P. 469–478.
8. Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2000. – V. 62. – P. 685–693.
9. Вергасова Г.В., Кокоуров В.Д., Казимировский Э.С. Динамика ионосферы как часть климатологии атмосферы // Научно-техническая библиотека SciTecLibrary. <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8002.html>.
10. Zakharov I. G., Chernogor L. F. Ionosphere as an Indicator of Processes in the Geospace, Troposphere, and Lithosphere // Geomagnetism and Aeronomy. – 2018. – V. 58, № 3. – P. 430 – 437.
11. Захаров И.Г., Тырнов О.Ф. Некоторые особенности суточных вариаций δf_oF_2 среднеширотной ионосферы. Геоматетизм и аэрономия. – 1992. – Т. 32, № 5. – С. 182–185.

-
12. Chen, W., Yang S., Huang R.-H. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon // *J. Geophys. Res.* – 2005. – V. 110, D14110. – doi:10.1029/2004JD005669.
 13. Гордиец Б.Ф., Марков М.Н., Шелепин Л.А. Солнечная активность и Земля.– М.: Знание, 1980.– 64 с.
 14. Боков В.Н. Изменчивость атмосферной циркуляции – инициатор сильных землетрясений // *Известия РГО РАН.* – 2003. – Т. 135, вып. 6. – С. 54–65.
 15. Prölss G.W., Werner S. Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms // *J. Geophys. Res.* – 2002. – V. 107, No. A2. – P. 1016. DOI:10.1029/2001JA900126.14.