

УДК 550.338.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ НА ЭЛЕКТРОННУЮ КОНЦЕНТРАЦИЮ В ИОНОСФЕРЕ

© 2024 г. Академик РАН Г. А. Жеребцов, А. В. Тащилин, Н. П. Перевалова*, К. Г. Ратовский, И. В. Медведева

Поступило 18.03.2024 г

После доработки 10.04.2024 г.

Принято к публикации 15.04.2024 г.

На основе модифицированной численной модели ионосферы и плазмосферы, разработанной в ИСЗФ СО РАН, рассчитаны высотные профили электронной концентрации N_e для спокойного и возмущённого состояния термосферы для условий 25.01.2009 в географическом пункте с координатами 52.4° с.ш., 104.3° в.д. (г. Иркутск). Возмущённые условия задавались варьированием температуры нейтральных частиц T в термосфере. На высотах ниже 180 км и выше 250 км с ростом/уменьшением T происходит увеличение/уменьшение N_e . На высотах 180–250 км наблюдается обратная картина: рост/уменьшение T вызывает уменьшение/увеличение N_e . Противоположный характер изменения профиля N_e связан с влиянием отношения концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота $[O]/[N_2]$ на высотах области F. Получены количественные оценки изменения N_e на разных высотах при изменении температуры нейтральных частиц. Установлено, что изменение T на 1 К приводит к изменению N_e на 0.2–0.3%. Результаты моделирования сопоставлены с наблюдениями максимума электронной концентрации NmF2, полученными на иркутском ионозонде во время внезапного стратосферного потепления в январе 2009 г.

Ключевые слова: модель ионосферы и плазмосферы, ионосферные возмущения, внезапное стратосферное потепление

DOI: 10.31857/S2686739724080145

Актуальность количественной оценки вкладов метеорологической активности в изменчивость ионосферных параметров обусловлена необходимостью прогнозирования поведения ионосферных характеристик во время динамических возмущений в нижележащих атмосферных слоях. Моделирование влияния изменения параметров нейтральной атмосферы на ионосферные характеристики также необходимо для оценки изменения электронной концентрации вследствие долговременных трендов изменения температуры в верхней атмосфере. В настоящей работе описан метод моделирования изменения электронной концентрации ионосферы при изменении температуры в верхней атмосфере на основе модифицированной численной модели ионосферы и плазмосферы, разработанной в ИСЗФ СО РАН. Осуществлён анализ

возмущений высотных профилей электронной концентрации. Результаты моделирования сопоставлены с наблюдениями максимума электронной концентрации NmF2, полученными на иркутском ионозонде во время внезапного стратосферного потепления в январе 2009 г.

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Численная модель ионосферы и плазмосферы, разработанная в ИСЗФ СО РАН [1, 2] является нестационарной, трёхмерной и позволяет рассчитывать крупномасштабную структуру ионосферы на высотах более 120 км. В ней учитываются процессы образования и потерь электронов и ионов в химических реакциях, амбиполярная диффузия плазмы вдоль геомагнитных силовых линий, горизонтальный термосферный ветер. Входными параметрами численной модели ионосферы и плазмосферы являются данные эмпирической модели нейтральной атмосферы

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения
Российской Академии наук, Иркутск, Россия
*E-mail: pereval@iszf.irk.ru

NRLMSISE-00 [3]. Для моделирования изменений электронной концентрации в ионосфере при изменении параметров термосферы на высотах 100–700 км разработан [4] способ использования модели NRLMSISE-00 для расчёта вертикальной структуры основных параметров термосферы при изменении только экзосферной температуры T_n на заданную величину ΔT с помощью аналитической модели термосферы W-65 [5]. Для этого вначале по модели NRLMSISE-00 рассчитываются профили температуры нейтральных частиц $T(h)$ и концентраций $O(h)$, $O_2(h)$, $N_2(h)$. Затем для этих же условий рассчитывается профиль температуры по модели W-65, в предположении, что параметры термосферы на уровне 120 км соответствуют полученным значениям из модели NRLMSISE-00. Изменив в модели W-65 значение температуры экзосферы на величину ΔT ($T'_n = T_n + \Delta T$), получаем скорректированный профиль температуры нейтральных частиц $T'(h)$ на высотах $h \geq 120$ км. Используя полученный профиль $T'(h)$, по модели W-65 рассчитываются новые профили состава термосферы. Относительные изменения состава, полученные по модели W-65, полагаются одинаковыми с соответствующими изменениями состава в скорректированной модели NRLMSISE-00.

С помощью разработанного метода были рассчитаны высотные профили температуры и соответствующие им профили основных нейтральных составляющих O , N_2 и O_2 для условий состояния термосферы, соответствующих дате 25.01.2009 и географическому пункту с координатами 52.4° с.ш., 104.3° в.д. (г. Иркутск). Расчёты проведены для спокойного состояния термосферы ($\Delta T = 0$ К), а также для возмущённых условий, которые задавались варьированием экзосферной температуры $\Delta T = \pm 20, \pm 60, \pm 100$ К. После расчёта нейтральных составляющих термосферы на основе метода установления были рассчитаны стационарные вертикальные профили ионосферных параметров, включая температуры электронов и ионов, а также концентрации электронов N_e и ионов O^+ , O_2^+ , NO^+ , N_2^+ при заданных потоках заряженных частиц и тепла на верхней границе. Связь между сопряжёнными ионосферами не учитывалась. Такой подход позволил наиболее чётко выделить влияние нейтральной атмосферы на ионосферу в рассматриваемом регионе.

На рис. 1 показаны высотные профили электронной концентрации N_e , рассчитанные для спокойных и возмущённых состояний термосферы 25.01.2009. На рис. 2 а, б приведены

относительные отклонения электронной концентрации N_e от спокойного состояния (при $\Delta T = 0$) при увеличении и уменьшении температуры нейтральных частиц. Наиболее заметно изменения температуры отражаются в вариациях профиля N_e в области максимума F2-слоя и выше. На высотах ниже 180 км и выше 250 км с ростом/уменьшением температуры происходит увеличение/уменьшение N_e . На высотах 180–250 км (область F) наблюдается обратная картина: рост/уменьшение температуры вызывает уменьшение/увеличение N_e . Противоположный характер изменения профиля N_e связан с влиянием отношения концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота $[O]/[N_2]$ на высотах области F. Анализ изменения высотных профилей отношения концентраций $[O]/[N_2]$ показал (рис. 2 в, г), что с ростом/уменьшением температуры происходит уменьшение/увеличение отношения $[O]/[N_2]$ на всех рассмотренных высотах (120–400 км). Данное изменение связано с тем, что в термосфере высотный ход концентраций $[O]$ и $[N_2]$ приближённо определяется барометрической формулой с масштабной высотой, прямо пропорциональной температуре и обратно пропорциональной молекулярной массе. В результате отношение концентрации более лёгкого $[O]$ к более тяжёлому $[N_2]$ уменьшается с ростом температуры. Изменение (уменьшение/увеличение) отношения $[O]/[N_2]$ приводит к соответствующему (уменьшение/увеличение) изменению N_e на высотах 180–250 км. Это соответствует положениям теории формирования F-области ионосферы, согласно которым электронная концентрация в этой области практически линейно связана с отношением $[O]/[N_2]$ [1, 6]. Ниже 180 км и выше 250 км влияние отношения $[O]/[N_2]$ на N_e незначительно: в нижней части главную роль в формировании N_e играют фотохимические процессы с участием O_2 и N_2 , а во внешней ионосфере N_e определяется процессами переноса. Количественные оценки изменения N_e на разных высотах при изменении температуры нейтральных частиц приведены в табл. 1 (данные усреднены для возмущений $\Delta T = +20, +60, +100$ К и $\Delta T = -20, -60, -100$ К). Высоты 150 и 200 км примерно соответствуют максимумам изменения N_e на рис. 2 а, б. Уменьшение температуры на 1 К приводит к изменению N_e на $\sim 0.3\%$ на всех высотах (при этом на высоте 200 км N_e увеличивается, на высотах 150 и 300 км N_e уменьшается). Увеличение температуры на 1 К вызывает изменение N_e на $\sim 0.2\%$ на высотах 150 и 200 км, и на $\sim 0.3\%$ на высоте 300 км. Таким

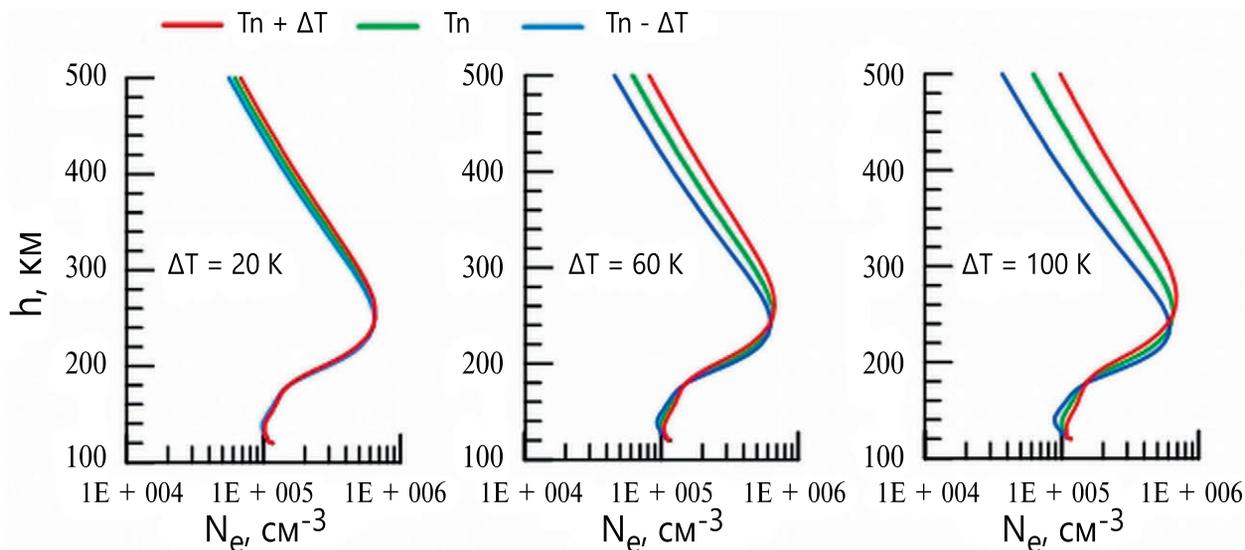


Рис. 1. Высотные профили электронной концентрации Ne, рассчитанные для состояний термосферы 25.01.2009: спокойное состояние (зелёные линии, $\Delta T = 0$), увеличенные (красные линии, $T_n + \Delta T$) и уменьшенные (синие линии, $T_n - \Delta T$) значения экзосферной температуры.

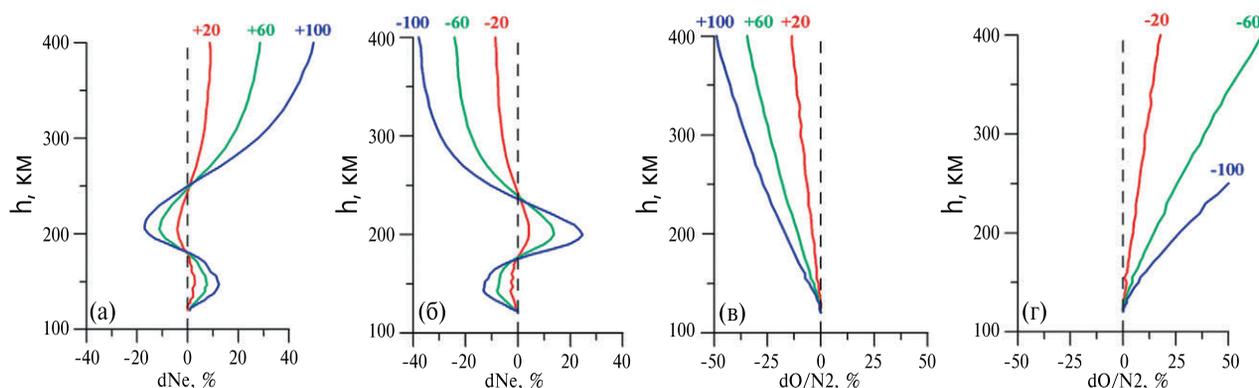


Рис. 2. Относительные отклонения электронной концентрации Ne (а, б) и отношения концентраций $[O]/[N_2]$ (в, г) от спокойного состояния ($\Delta T = 0$) при увеличении ($\Delta T = +20, +60, +100$ К) (а, в) и уменьшении ($\Delta T = -20, -60, -100$ К) (б, г) экзосферной температуры для условий 25.01.2009.

образом, изменение температуры нейтральных частиц в термосфере на 1 К приводит к изменению электронной концентрации на 0.2–0.3%. Характер изменения Ne (увеличение или уменьшение) может быть различным на разных высотах и определяется физико-химическими процессами, доминирующими на данной высоте.

Модификация численной модели ионосферы и плазмосферы, разработанной в ИСЗФ СО РАН, позволяет осуществлять простую оценку изменения Ne вследствие изменения температуры верхней атмосферы. В отличие от физических моделей ионосферы [1, 2, 7, 8], учитывающих

весь комплекс явлений в системе магнитосфера–ионосфера–атмосфера, данный метод позволяет выделить вклад, обусловленный именно изменениями температуры. В частности, может быть оценено изменение Ne вследствие долговременных трендов изменения температуры в верхней атмосфере. Согласно результатам работы [9] по данным радара некогерентного рассеяния в Миллстоун–Хилл тренд изменения температуры экзосферы составляет ~18 К за десятилетие. По полученным нами модельным оценкам ожидаемый тренд в Ne должен составлять ~3.6–5.4% за десятилетие. Данная оценка согласуется с трендом Ne, выявленным по данным этого же

Таблица. 1. Усредненные изменения температуры нейтральных частиц и электронной концентрации Ne на разных высотах

h, км	dT, К	dNe, %	dNe/dT, %/К	dT, К	dNe, %	dNe/dT, %/К
150	+36.6	+7.1	0.19	-29.5	-8.0	0.27
200	+55.9	-10.5	-0.19	-54.7	+14.2	-0.26
300	+59.7	+16.9	0.28	-59.7	-17.7	0.30

радар [10], однако на порядок величины превышает тренды, полученные рядом других авторов [11].

ОБСУЖДЕНИЕ И СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАБЛЮДЕНИЙ

Дата для моделирования была выбрана исходя из того, что в январе 2009 г. над северным полушарием наблюдалось самое сильное за весь период наблюдений зимнее внезапное стратосферное потепление (ВСП). Дата 25.01.2009 соответствует началу реверса зонального ветра. Таким образом, результаты моделирования могут быть сопоставлены с результатами наблюдений во время упомянутого события.

На рис. 3 представлены зональные характеристики стратосферы на высотном уровне 10 гПа (~32 км): среднезональная (60–90° с.ш.) температура и среднезональный (60° с.ш.) зональный ветер. С середины января наблюдался резкий рост среднезональной температуры примерно на 50 К и ослабление среднезонального (60° с.ш., 10 гПа) ветра, в результате чего 25 января ветер изменил свое направление с западного на восточное, и ВСП приобрело признаки значительного (major). Реверс зонального ветра наблюдался в период 25.01–22.02.2009 (рис. 3, верхняя панель) Во время ВСП-2009 регистрировались возмущения атмосферных параметров в большом диапазоне высот в различных широтно-долготных секторах [12–14]. В тоже время выбранный день принадлежал длительному геомагнитно-спокойному периоду и характеризовался следующими значениями индексов активности: $Dst \approx 10$ нТ, $Kp \approx 1.0$, $Ap \approx 4$, $F10.7 \approx 68$, $V_{SW} \approx 100$ м/с, $Bz \approx 2.5$ нТ.

Для сопоставления результатов моделирования с наблюдениями использовались данные о максимуме электронной концентрации NmF2, полученные на иркутском ионозонде во время ВСП в январе 2009 г. Были рассчитаны скользящие 27-дневные медианные значения NmF2 ($NmF2_{Med}$), представляющие собой медианное значение NmF2 на интервале ± 13 дней для каждого дня и фиксированного

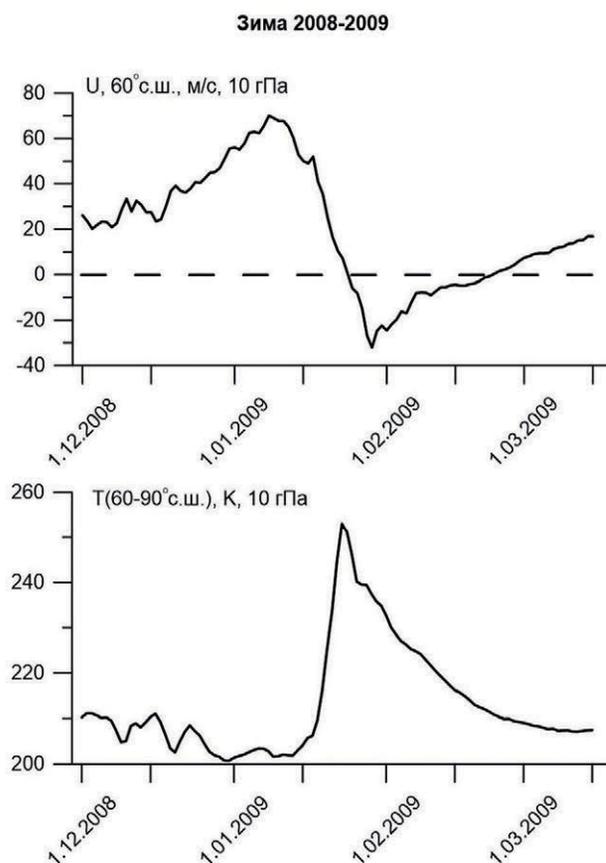


Рис. 3. Зональные характеристики стратосферы над Северным полушарием на высотном уровне 10 гПа (около 32 км), 01.12.2008–15.03.2009, по данным реанализа MERRA-2: нижняя панель – среднезональная (60–90° с.ш.) температура; верхняя панель – среднезональный (60° с.ш.) зональный ветер.

момента местного времени LT. Возмущения рассчитывались как относительные (процентные) отклонения наблюдаемых NmF2 от $NmF2_{Med}$: $\Delta NmF2(\%) = 100\% \cdot (NmF2 - NmF2_{Med}) / NmF2_{Med}$. На рис. 4 показаны вариации NmF2, $NmF2_{Med}$ и $\Delta NmF2$ в период 22–31.01.2009. Из рис. 4 видно, что с 25 (начало реверса зонального ветра) по 30 января возмущения NmF2 преимущественно отрицательные, что может рассматриваться как отрицательный ионосферный отклик на ВСП. На интервале 25–30 января $\Delta NmF2$ меняются от -60 до +86% при среднем значении -14% и

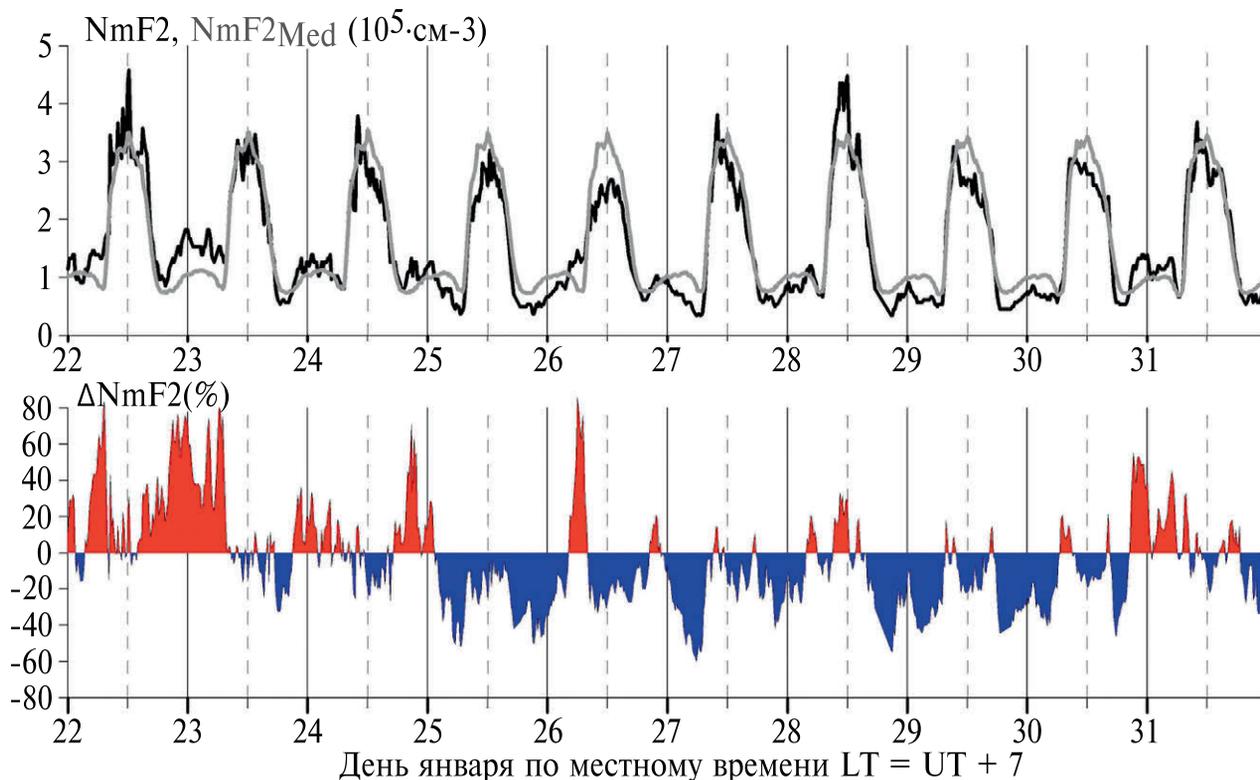


Рис. 4. Вариации $NmF2$, $NmF2_{Med}$ (верхняя панель) и $\Delta NmF2$ (нижняя панель) с 22 по 31 января 2009 г.

стандартном отклонении 22%. Быстрые изменения $\Delta NmF2$, по всей видимости, связаны с эффектами внутренних гравитационных волн и возмущений приливов, тогда как среднее значение ассоциируется с изменением температуры термосферы. Согласно модельным расчетам на высотах около 200 км увеличение температуры на 1 К вызывает уменьшение N_e примерно на 0.2%, таким образом, среднее $\Delta NmF2$, равное -14% , ассоциируется с разогревом термосферы примерно на 70 К.

Полученная оценка разогрева термосферы на 70 К существенно превышает расчёты разогрева термосферы во время ВСП-2009, полученные на основе Глобальной Самосоглашенной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) [7] и модели Whole Atmosphere Model (WAM) [8]. Расчёты ГСМ ТИП дали оценку в пределах 20 К, а модель WAM показала потепление на 5%, что приблизительно соответствует 35 К. Такое расхождение может быть связано с двумя причинами. Первая причина связана с корректностью оценки разогрева термосферы во время ВСП по моделям ГСМ ТИП и WAM. В частности, в работе [8] выявлено противоречие между модельной оценкой температуры и данными атмосферного торможения

космических аппаратов. В предположении корректности оценок по моделям ГСМ ТИП и WAM, вторая причина может заключаться в том, что разогрев термосферы не является единственной причиной отрицательного возмущения $NmF2$. Согласно результатам работы [7] ВСП вызывает изменение глобальной термосферной циркуляции, а возмущения скорости нейтрального ветра могут достигать ~ 50 м/с. Изменение термосферной циркуляции сопровождается горизонтальным переносом молекулярного азота N_2 , что может являться дополнительным источником отрицательного возмущения $NmF2$. Если верна оценка разогрева термосферы по модели ГСМ ТИП (20 К), то вклад в $\Delta NmF2 = -14\%$ от разогрева термосферы составляет $\sim -4\%$, а вклад от горизонтального переноса $\sim -10\%$. Если верна аналогичная оценка по модели WAM (35 К), то вклады разогрева термосферы и горизонтального переноса приблизительно равны и составляют $\sim -7\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе модифицированной численной модели ионосферы и плазмосферы, разработанной в ИСЗФ СО РАН, осуществлено моделирование

влияния изменения параметров нейтральной атмосферы на электронную концентрацию в ионосфере.

Выявлено, что на высотах ниже 180 км и выше 250 км с ростом/уменьшением температуры нейтральной атмосферы T происходит увеличение/уменьшение электронной концентрации N_e . На высотах 180–250 км наблюдается обратная картина: рост/уменьшение T вызывает уменьшение/увеличение N_e . Противоположный характер изменения профиля N_e связан с влиянием отношения концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота $[O]/[N_2]$ на высотах области F.

Получены количественные оценки изменения N_e на разных высотах при изменении температуры нейтральной атмосферы. Установлено, что изменение T на 1 К приводит к изменению N_e на 0.2–0.3%.

В соответствии с модельной оценкой, среднее отрицательное возмущение максимума электронной концентрации NmF2, равное –14%, наблюдавшееся во время ВСП в январе 2009 г., ассоциируется с разогревом термосферы примерно на 70 К. Полученная оценка разогрева термосферы на 70 К существенно превышает расчёты разогрева термосферы во время ВСП-2009, полученные другими исследователями. Такое расхождение может быть связано с тем, что наблюдаемое отрицательное возмущение NmF2, может быть обусловлено не только разогревом термосферы, но и горизонтальным переносом молекулярного азота N_2 , что приводит к завышенной оценке потепления термосферы.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-17-00146, <https://rscf.ru/project/22-17-00146/>. Для анализа использовались экспериментальные данные Центра коллективного пользования “Ангара” <http://скр-гф.ру/скр/3056/>, полученные при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кринберг И. А., Тащилин А. В.* Ионосфера и плазма. М.: Наука, 1984. 189 с.
2. *Тащилин А. В., Романова Е. Б.* Численное моделирование диффузии ионосферной плазмы в дипольном геомагнитном поле при наличии поперечного дрейфа // Математическое моделирование. 2013. Т. 25. № 1. С. 3–17.
3. *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. № A12. P. 1468–1483.
4. *Tashchilin A., Leonovich L.* Estimation of variations in the thermosphere parameters during a magnetic storm from satellite measurements of thermospheric density / Proc. SPIE. 11916. 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. Art. № 119167S. <https://doi.org/10.1117/12.2603309>
5. *Walker J. C. G.* Analytic representation of upper atmosphere densities based on Jacchia’s static diffusion models // J. Atmos. Sci. 1965. V. 22. P. 462–463.
6. *Schunk R. W., Nagy A. F.* Ionospheres: Physics, Plasma physics, and Chemistry. Cambridge University Press, 2009. 628 p.
7. *Klimenko M. V., Klimenko V. V., Bessarab F. S., Korenkov Y. N., Liu H., Goncharenko L. P., Tolstikov M. V.* Study of the thermospheric and ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming using TIME-GCM and GSM TIP models: First results // J. Geophys. Res. Space Physics. 2015. V. 120. P. 7873–7888.
8. *Fuller-Rowell T., Akmaev R., Wu F., Fedrizzi M., Viebeck R. A., Wang H.* Did the January 2009 sudden stratospheric warming cool or warm the thermosphere? // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. № L18104.
9. *Oliver W. L., Holt J. M., Zhang S.-R., Goncharenko L. P.* Long-term trends in thermospheric neutral temperature and density above Millstone Hill // J. Geophys. Res. Space Physics. 2014. V. 119. P. 7940–7946.
10. *Zhang S.-R., Holt J. M., Kurdzo J.* Millstone Hill ISR observations of upper atmospheric long-term changes: Height dependency // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. № A00H05.
11. *Данилов А. Д., Константинова А. В.* Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация. 2020. Т. 60. № 4. С. 411–435.
12. *Medvedeva I. V., Beletsky A. B., Chernigovskaya M. A., Perminov V. I., Semenov A. I., Tatarnikov A. V.* Mesopause temperature variations during strong sudden stratospheric warmings in 2008–2010 // Optica Pura y Aplicada. 2011. V. 44. № 4. P. 701–705.
13. *Shepherd M. G., Cho Y.-M., Shepherd G. G., Ward W., Drummond J. R.* Mesospheric temperature and atomic oxygen response during the January 2009 major stratospheric warming // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. № A07318.
14. *Yuan T., Thurairajah B., She C.-Y., Chandran A., Collins R. L., Krueger D. A.* Wind and temperature response of midlatitude mesopause region to the 2009 Sudden Stratospheric Warming // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. № D09114.

MODELING THE INFLUENCE OF CHANGES IN NEUTRAL ATMOSPHERE PARAMETERS ON IONOSPHERIC ELECTRON DENSITY

Academician of the RAS **G. A. Zhrebtsov, A. V. Tashchilin, N. P. Perevalova[#],
K. G. Ratovsky, I. V. Medvedeva**

Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation
[#]*E-mail: pereval@iszf.irk.ru*

Based on the modified numerical model of the ionosphere and plasmasphere developed at ISTP SB RAS, we calculated the height profiles of the electron density N_e for the quiet and disturbed thermospheric conditions of January 25, 2009 at the geographical location of Irkutsk (52.4N, 104.3E). The disturbed conditions were simulated by varying the neutral temperature T in the thermosphere. At heights below 180 km and above 250 km, with an increase/decrease in T , an increase/decrease in N_e occurs. At 180–250 km, the opposite pattern is seen: an increase/decrease in T causes a decrease/increase in N_e . The opposite pattern of the change in the N_e profile is associated with the influence of the atomic oxygen to molecular nitrogen density ratio $[O]/[N_2]$ at heights of the F-region. Quantitative estimates of the change in N_e at different heights with changes in the neutral temperature were obtained. It has been established that a change in T by 1 K leads to a change in N_e by 0.2–0.3%. The modeling results were compared with observations of the peak electron density N_mF_2 obtained with the Irkutsk ionosonde during the sudden stratospheric warming in January 2009.

Keywords: ionosphere and plasmasphere model, ionospheric disturbances, sudden stratospheric warming