

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПИСАНИЯ НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ МАГНИТНОЙ БУРИ ФЕВРАЛЯ 2022 Г.

И.К. Едемский, А.В. Тащилин

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
ilya@iszf.irk.ru

INFLUENCE OF DESCRIPTION OF THE NEUTRAL ATMOSPHERE ON MODELING RESULTS OF EFFECTS OF THE FEBRUARY 2022 MAGNETIC STORM

I.K. Edemskiy, A.V. Tashilin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ilya@iszf.irk.ru

Аннотация. Численная модель ионосферы и плазматосферы, разработанная в ИСЗФ СО РАН, позволяет определять температуру и состав ионосферных ионов. Между тем, необходимые для модельных расчетов параметры нейтральной атмосферы определяются по эмпирической модели MSIS, которая имеет известные недостатки при описании состояния атмосферы в возмущенные периоды. В настоящей работе мы делаем попытку уточнения результатов моделирования корректировкой входных параметров модели MSIS, так, чтобы она отражала состояние нейтральной атмосферы близкое к реальному.

Ключевые слова: GIPC, моделирование, ионосфера, MSIS

Abstract. The numerical model of the ionosphere and plasmasphere developed at ISTP SB RAS allows one to determine the temperature and composition of ionospheric ions. Meanwhile, the parameters of the neutral atmosphere required by the model are determined using the empirical MSIS model, which has been known for shortcomings in describing the state of the atmosphere during disturbed periods. In this work, we make an attempt to refine the modeling results by adjusting the input parameters of the MSIS model so that it reflects the actual state of the neutral atmosphere more accurately.

Keywords: GIPC, simulation, ionosphere, MSIS

ВВЕДЕНИЕ

Буря 2–4 февраля 2022 г., не являясь выдающимся геофизическим событием (14-ая по интенсивности за 2022 г.), запомнилась тем, что вызвала сход с орбиты 38 спутников системы StarLink. Анализу эффектов бури посвящено множество работ, в том числе представляющих результаты расчетов состояния ионосферы различными моделями [He et al., 2023]. В настоящей работе мы делаем попытку воспроизвести ионосферные эффекты, наблюдавшиеся другими авторами, в том числе на инструментах ИСЗФ СО РАН. Особенность бури, помимо прочего, заключается в значительных вариациях параметров нейтральной атмосферы, в частности, плотности, что и вызвало драматическое завершение запуска 80 спутников системы StarLink.

Разработанная в ИСЗФ СО РАН численная модель ионосферы и плазматосферы (GIPC) [Тащилин, Романова, 2013] основана на решении системы нестационарных уравнений баланса частиц и энергии тепловой плазмы в замкнутых геомагнитных силовых трубках, основания которых расположены на высоте 100 км. Состав ионосферной плазмы в модели включает электроны, атомные (O^+ , H^+ , N^+ , He^+) и молекулярные ионы (N_2^+ , O_2^+ , NO^+). Концентрации всех ионов (кроме N_2^+) рассчитываются с учетом процессов фотоионизации, рекомбинации и переноса вдоль геомагнитных силовых линий под действием амбиполярной диффузии и увлечения ионов горизонтальным нейтральным ветром. Расчет скоростей фотоионизации термосферных составляющих и энергетических спектров первичных фотоэлектронов основан на справочном спектре КУФ-излучения Солнца [Richards et al., 1994].

Описание пространственно-временных вариаций температуры и концентрации нейтральных компонентов O , O_2 , N_2 , H , N основано на данных эмпирической модели термосферы MSIS 2.1, скорости горизонтального ветра рассчитывались по модели HWM07.

Входными параметрами модели MSIS 2.1, определяющими состояние ОКП, выступают суточное и усредненное за 81 день значения индекса солнечной активности $F_{10.7}$ и среднесуточное значение планетарного индекса A_p . Модель позволяет учесть возмущенное состояние среды во время магнитных бурь установкой параметра SW(9) в -1 и в этом случае модель принимает 7 значений A_p : среднесуточный, 4 значения за последние 9 ч, 2 среднесуточных значения за последние два дня. Таким образом, в лучшем случае, модель MSIS 2.1 (как и использующая ее модель GIPC) может отражать изменения среды с характерным временем в три часа. Между тем, располагая данными измерений какого-либо из выходных параметров модели термосферы и минимизируя расхождения модели и измерений, можно наблюдать эффекты более коротких периодов.

Спутники миссии SWARM, среди прочего, определяют вариации собственных негравитационных ускорений, из которых можно восстановить оценку плотности D атмосферы на высоте орбиты [van den Ijssel et al., 2023]. Используя эти данные в качестве опорных, мы варьировали входное среднесуточное значение индекса $F_{10.7}$ так, чтобы разность ΔD между данными модели MSIS и измеренной плотностью была минимальной. Значение, дающее минимум обозначим как $F_{10.7}^m$. Для устранения вариаций $F_{10.7}^m$, вызванных орбитальным движением спутника, мы используем скользящее

медианное окно в 21 отсчет. На рис. 1а показаны актуальное $F_{10.7}$ (зеленым), минимизирующее $F_{10.7}^m$ (синим) и медианное значения $\langle F_{10.7}^m \rangle$ (оранжевым) с шагом по времени в 15 мин. Можно заключить, что наилучшее согласование дают значения, меньшие в сравнении с истинной величиной $F_{10.7}$. Рис. 1б показывает отклонение ΔD в процентах при использовании истинных (зеленым) и медианных значений

(красным). Отклонение в последнем случае не превышает 25 %, что значительно лучше использования истинных значений, где ошибка в среднем составляет 50 %, достигая значений в 120–150 %. Таким образом, мы ожидаем, что использование медианного значения позволит не только промоделировать процессы с характерным временем в 15 мин, но и даст более точные значения ионосферных параметров.

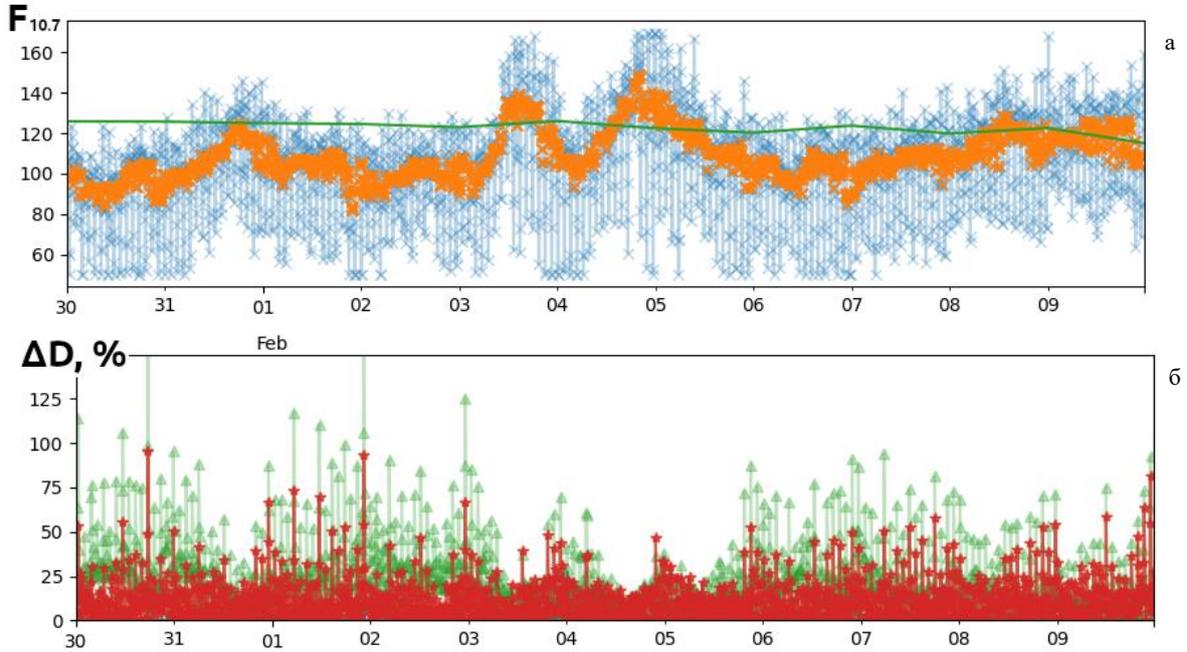


Рис. 1. а — Вариации значений $F_{10.7}^m$ обеспечивающие минимальное значение ΔD (синим) и медианного значения $\langle F_{10.7}^m \rangle$ (оранжевым) в сравнении с истинным значением $F_{10.7}$ (зеленым); б — нормированное отклонение ΔD при использовании истинных (зеленым) и медианных (красным) значений $F_{10.7}$

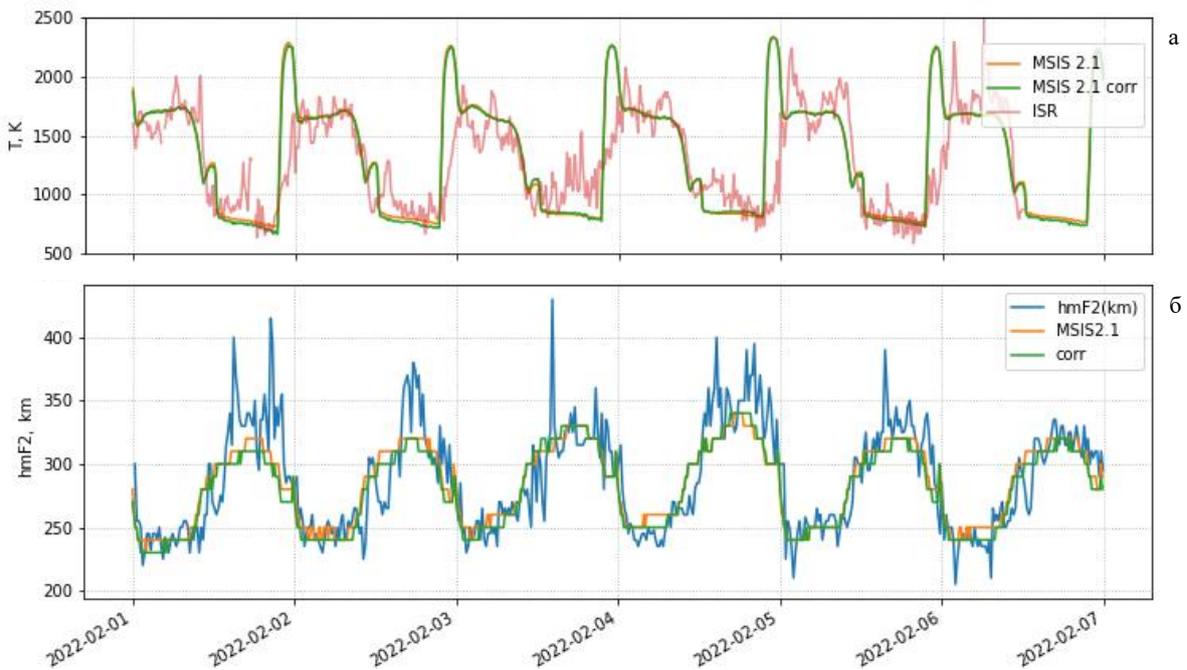


Рис. 2. Вариации электронной температуры на высоте 250 км (а, красным) и высоты максимума слоя F_2 (б, синим) по данным ИРНР в сравнении с одноименными параметрами по модели GIPC (MSIS 2.1) без коррекции $F_{10.7}$ (оранжевым) и с коррекцией (зеленым)

Мы выполнили моделирование параметров ионосферы для периода 1–7 февраля 2022 г. с использованием модели MSIS 2.1 с учетом возмущенной среды (SW (9) = -1) в двух режимах: применяя действительные значения и скорректированные значения F_{107} . На рис. 2 приведены вариации во времени электронной температуры на высоте 250 км (вверху) и высоты максимума слоя $F2$ (внизу) по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) и по результатам моделирования. Можно заключить, что вне зависимости от поправки F_{107} модель с использованием MSIS2.1 корректно воспроизводит суточный ход и восстанавливает предрассветный пик температуры (смещенный по времени, но согласующийся по амплитуде (для 5–6 февраля)). Высота максимума слоя $F2$ в возмущенный период оказываются ниже, чем предсказывает модель. Введение поправки дает более хорошее согласование высоты с наблюдениями в ночное время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

He J., Astafyeva E., Yue X., Pedatella N.M. et al. Comparison of empirical and theoretical models of the thermospheric density enhancement during the 3–4 February 2022 geomagnetic storm // *Space Weather*. 2023. V. 21. e2023SW003521. DOI: 10.1029/2023SW003521.

Тацилин 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.

Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. EUVAC: A solar EUV Flux Model for aeronomic calculations // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 8981–8992. DOI:10.1029/94JA00518.

Van den Ijssel J., Doornbos E., Iorfida E. et al. Thermosphere densities derived from Swarm GPS observations // *Adv. Space Res.* 2020. V. 65, iss. 7. P. 1758–1771. DOI: 10.1016/j.asr.2020.01.004.