

МОДЕЛЬ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

^{1,2}М.В. Клименко, ¹В.В. Клименко

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

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия
maksim.klimenko@mail.ru

THE UPPER ATMOSPHERE MODEL AS A TOOL FOR SPACE WEATHER INVESTIGATION

^{1,2}M.V. Klimenko, ¹V.V. Klimenko

¹West Department of the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia

²Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Аннотация. Представлен обзор существующих моделей ионосферы и приведены основные результаты за последнее десятилетие, полученные с использованием Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП). Обсуждаются ближайшие планы развития в области моделирования ионосферы.

Ключевые слова: модель, космическая погода, система ионосфера—плазмосфера, атмосфера.

Abstract. We review the existing ionospheric models and present the main results obtained in the last decade on the basis of the Global Self-consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere, and Protonosphere (GSM TIP). The nearest plans and perspectives of the ionosphere modeling development are discussed.

Key words: model, space whether, ionosphere—plasmasphere system, atmosphere.

Введение

Распределение различных параметров верхней атмосферы оказывает существенное влияние на движение и торможение спутников, а также на условия прохождения радиосигналов. Единственным способом описания пространственно-временного распределения этих параметров при решении прикладных задач является использование различного рода моделей среды. В данной работе представлен обзор существующих моделей верхней атмосферы Земли и приведены основные результаты, полученные в последнее десятилетие с использованием калининградской модели верхней атмосферы Земли.

Современные эмпирические модели

Любая эмпирическая модель строится на некотором наборе экспериментальных данных. При этом, качество модели зависит как от качества и объема экспериментального материала, так и от подхода к построению эмпирических зависимостей. Эмпирическая справочная модель ионосферы IRI (International Reference Ionosphere) [Bilitza et al., 2017] описывает климатическое поведение ионосферы и успешно используется при решении научных и прикладных задач на протяжении более 40 лет. Исследования показывают, что модель IRI в среднем дает хорошие результаты по воспроизведению ионосферных параметров в спокойных условиях на средних широтах [Klimenko et al., 2015b]. Наиболее значимые последние модифика-

ции модели IRI описывают поведение высоты максимума $F2$ слоя [Bilitza et al., 2017]. Для вычисления температуры и химического состава нейтральной атмосферы в качестве справочной модели широко используется модель MSIS. Последняя версия этой модели NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002] использует ракетные и спутниковые измерения, а также данные радаров некогерентного рассеяния. Существенный вклад в дальнейшую модификацию этой модели могут внести данные, полученные с помощью инструментов GUVI на спутнике TIMED. HWM (Horizontal Wind Model) представляет собой эмпирическую модель горизонтального нейтрального ветра в средней и верхней атмосфере. Модель использует данные спутников, радаров некогерентного рассеяния и оптических интерферометров Фабри-Перо. В последней модификации модели HWM14 [Drob et al., 2015] авторы убрали зависимость скорости горизонтального ветра от солнечной активности, которая практически не оказывала никакого влияния на результаты в предыдущих версиях модели. Важно отметить, что существующие в настоящее время эмпирические модели средней и верхней атмосферы, которые используются в качестве моделей среды при решении различных прикладных задач, являются климатическими и недостаточно точно описывают параметры среды в периоды различных возмущений. В связи с этим создание и модификация гибридных и взаимосвязанных самосогласованных моделей верхней атмосферы является наиболее актуальным и приоритетным прикладным и научным направлением в области космической погоды.

Прогресс в гибридном моделировании

Гибридные (ассимиляционные) модели верхней атмосферы можно разделить на два класса: 1) модели, основанные на эмпирических моделях; 2) модели, в основе которых лежат теоретические модели. Так, например, в модели IRTAM используются данные сети станций вертикального зондирования ионосферы и техника нелинейной компенсации ошибок для корректировки модели IRI [Galkin et al., 2012]. Таким образом, модель IRTAM позволяет перейти от описания ионосферы в терминах космического климата к космической погоде. Существуют также ассимиляционные процедуры, использующие модель IRI и данные абсолютных значений полного электронного содержания (ПЭС) [Ovodenko et al., 2015]. Из семейства ассимиляционных моделей, построенных на основе теоретических моделей, можно выделить: 1) американскую модель GAIM [Schunk et al., 2004]; 2) российскую модель, разработанную в ЦАО [Solomentsev et al., 2012]. Эти модели позволяют получать глобальные трехмерные распределения электронной плотности в реальном времени с использованием поправок, получаемых по данным измерений. Концентрации, температуры и скорости заряженных частиц также корректируются при изменениях электронной концентрации, поскольку они связаны между собой самосогласованным образом. Основной трудностью в создании этих моделей является то, что корректировка ионосферных параметров должна быть учтена при корректировке параметров термосферы и электрических полей. Кроме того, следует учитывать, что массив данных, по которым можно осуществлять корректировку всех ассимиляционных моделей в реальном времени достаточно ограничен.

Численные модели ионосферы и верхней атмосферы Земли

В настоящее время существует целый ряд моделей ионосферы, разработанных в нашей стране под руководством Павлова А.В., ИЗМИРАН, Тащилина А.В., ИСЗФ СО РАН, Мингалева В.С., ПГИ КНЦ РАН, Уварова В.М., ААНИИ, и за рубежом: SUPIM, SAMI3. Следует отметить, что только в модели SAMI3 [Huba et al., 2000] решается система уравнений переноса массы, импульса и энергии. При этом, во всех этих моделях такие характеристики околоземной среды, как проводимость ионосферы, электрическое поле, состав, тепловой режим и динамика нейтральной атмосферы задаются на основании различных эмпирических моделей. В отличие от этих моделей, в таких моделях, как GCM TИП (Глобальная Самосогласованная Модель Термосферы, Ионосферы и Протоносферы) [Намгаладзе и др., 1990; Korenkov et al., 1998], UAM [Намгаладзе и др., 1996], CTIPe [Millward et al., 2001], TIME GCM [Richmond et al., 1992], GITM [Ridley et al., 2006], GAIA [Jin et al., 2012], состав, тепловой режим и динамика нейтральной атмосферы и ионосферы рассчитываются самосогласованным образом. Модели GAIA и TIME GCM включают в себя нижнюю и верхнюю атмосферу, однако, рассматривают ионо-

сферу в ограниченном интервале высот. При этом, в модели TIME GCM не учитывается горизонтальный перенос заряженной компоненты ионосферной плазмы. В модели GITM осуществляется решение системы гидродинамических уравнений для нейтральной компоненты, в том числе, уравнений для вертикальных скоростей всех нейтральных частиц, а для заряженных частиц реализована диффузионная постановка задачи с верхней границей на высоте 600 км. Отличительной особенностью моделей GCM TИП, UAM и CTIPe является самосогласованное описание параметров плазмосферы и электрического поля ионосферного и магнитосферного происхождения. С использованием модели GCM TИП были проведены исследования по следующим направлениям: ионосферно-плазмосферная климатология и аномалии; ионосферные эффекты геомагнитных бурь; ионосферные эффекты внезапных стратосферных потеплений; формирование $F3$ и G слоев в экваториальной ионосфере; ионосферные эффекты перед сильными землетрясениями; влияние ионосферных возмущений на распространение КВ-радиоволн. Среди основных научных результатов, полученных за последние 10 лет с использованием модели GCM TИП можно выделить следующие: 1. Показано [Клименко и др., 2015], что в восстановительную фазу бури на субавроральных и средних широтах днем формируются положительные возмущения электронной концентрации за счет увеличения отношения $n(O)/n(N_2)$; 2. Выделены эффекты возмущенного динамо электрического поля и проникновения поля магнитосферной конвекции к низким широтам во время геомагнитной бури [Klimenko and Klimenko, 2012]; 3. Показано, что причиной отрицательных ионосферных возмущений на авроральных и средних широтах во время внезапных стратосферных потеплений является уменьшение отношения $n(O)/n(N_2)$ вследствие нагрева верхней термосферы [Bessarab et al., 2012], тогда как изменения вертикального электромагнитного дрейфа плазмы являются ключевым механизмом формирования отклика низкоширотной ионосферы [Klimenko et al., 2015a]; 4. Наблюдающийся в спокойных условиях в ночное время и во время геомагнитных бурь $F3$ слой формируется неоднородным по высоте вертикальным электромагнитным дрейфом плазмы [Klimenko et al., 2011]; 5. Предсказано существование G слоя (на высотах ~ 1000 км) в ночное время над экватором, который формируется меридиональной компонентой термосферного ветра [Клименко, Клименко, 2012]; 6. Показано, что механизмами формирования аномалии моря Уэдделла (WSA) и Якутской аномалии (YA) являются: (а) горизонтальный перенос плазмы в высоких и субавроральных широтах за счет $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфа; (б) вертикальный перенос плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля под действием меридиональной компоненты термосферного ветра; (в) распределение нейтрального состава термосферы [Klimenko et al., 2015b]. В заключение следует отметить, что в настоящее время приоритетным направлением в моделировании околоземного космического пространства является создание самосогласованной модели

связанной системы атмосфера-ионосфера-магнитосфера, в которой решаются системы уравнений гидродинамики для параметров нейтральной атмосферы и уравнений переноса для заряженных частиц в ионосфере и плазмосфере, трехмерное уравнение Пуассона для электрического потенциала в ионосфере и система кинетических уравнений в магнитосфере.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №17-17-01060.

Список литературы

Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С. и др. Влияние геомагнитных бурь 26–30 сентября 2011 г. на ионосферу и распространение радиоволн КВ-диапазона. I. Ионосферные эффекты // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 5. С. 769–789.

Клименко М.В., Клименко В.В. Механизмы расщепления F2-слоя и формирования F3-и G-слоев в экваториальной ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52, № 3. С. 342–355.

Намгаладзе А.А., Мартыненко О.В., Намгаладзе А.Н. Глобальная модель верхней атмосферы с переменным шагом интегрирования по широте // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36, № 2. С. 89–95.

Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko M.V., et al. Modeling the effect of Sudden Stratospheric Warming within the thermosphere-ionosphere system // J. Atmosph. Solar-Terr. Phys. 2012. V. 90–91. P. 77–85. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.09.005.

Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., et al. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. 2017. V. 15. P. 418–429. DOI: 10.1002/2016SW001593.

Drob D.P., Emmert J.T., Meriwether J.W., et al. An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere // Earth and Space Sci. 2015. V. 2. P. 301–319. DOI: 10.1002/2014EA000089.

Galkin I.A., Reinisch B.W., Huang X., Bilitza D. Assimilation of GIRO data into a real-time IRI // Radio Sci. 2012. V. 47. RS0L07. DOI: 10.1029/2011RS004952.

Huba J.D., Joyce G., Fedder J.A. SAMI2 (Sami2 is Another Model of the Ionosphere): A New Low-latitude Ionosphere Model // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 23,035–23,053. DOI: 10.1029/2000JA000035.

Jin H., Miyoshi Y., Pancheva D., et al. Response of migrating tides to the stratospheric sudden warming in 2009 and their effects on the ionosphere studied by a whole atmosphere-ionosphere model GAIA with COSMIC and TIMED/SABER observations // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A10323. DOI: 10.1029/2012JA017650.

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., et al. 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 Phys. 2015a. V. 120. P. 7873–7888. DOI: 10.1002/2014JA020861.

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T., et al. Spatial features of Weddell Sea and Yakutsk Anomalies in foF2 diurnal variations during high solar activity periods: Interkosmos-19 satellite and ground-based ionosonde observations, IRI reproduction and GSM TIP model simulation // Adv. Space Res. 2015b. V. 55, no. 8. P. 2020–2032. DOI: 10.1016/j.asr.2014.12.032.

Klimenko M.V., Klimenko V.V. Disturbance dynamo, prompt penetration electric field and overshielding in the Earth's ionosphere during geomagnetic storm // J. Atmosph. Solar-Terr. Phys. 2012. V. 90–91. P. 146–155. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.02.018.

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., et al. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005 // Radio Sci. 2011. V. 46. RS0D03. DOI: 10.1029/2010RS004590.

Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Förster M., et al. Calculated and observed ionospheric parameters for a Magion 2 passage and EISCAT data on July 31, 1990 // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, N A7. P. 14697–14710. DOI: 10.1029/98JA00210.

Millward G.H., Müller-Wodarg I.C.F., Aylward A.D., et al. An investigation into the influence of tidal forcing on F region equatorial vertical ion drift using a global ionosphere-thermosphere model with coupled electrodynamics // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, N A11. P. 24733–24744. DOI: 10.1029/2000JA000342.

Ovodenko V.B., Trekin V.V., Korenkova N.A., Klimenko M.V. Investigating range error compensation in UHF radar through IRI-2007 real-time updating: Preliminary results // Adv. Space Res. 2015. V. 56, N 5. P. 900–906.

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, N A12. P. 1468–1483. DOI: 10.1029/2002JA009430.

Richmond A.D., Ridley E.C., Roble R.G. A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 6. P. 601–604.

Ridley A.J., Deng Y., Tóth G. The global ionosphere-thermosphere model // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2006. V. 68, N 8. P. 839–864. DOI: 10.1016/j.jastp.2006.01.008.

Schunk R.W., Scherliess L., Sojka J.J., Thompson D. Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM) // Radio Sci. 2004. V. 39. RS1S02. DOI: 10.1029/2002RS002794.

Solomentsev D., Khattatov B., Codrescu M., Titov A., Yudin V., Khattatov V. Ionosphere state and parameter estimation using the ensemble square root filter and the global three-dimensional first-principle model // Space Weather. 2012. V. 10. S07004. DOI: 10.1029/2012SW000777.