

ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМЫ ТЕРМОСФЕРА–ИОНОСФЕРА

¹М.В. Клименко, ¹В.В. Клименко, ¹Ф.С. Бессараб, ¹Ю.Н. Кореньков, ¹Т.В. Суходолов, ¹Е.В. Розанов,
¹И.Е. Захаренкова, ¹Н.В. Чирик, ¹Н.А. Коренькова, ¹Д.С. Котова, ¹В.Б. Оводенко, ²В.Л. Лисина, ³К.Г. Ратовский,
³А.С. Ясюкевич, ³Ю.В. Ясюкевич, ⁴А.Т. Карпачев, ⁵О.В. Мингалев, ⁵И.В. Мингалев

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Калининград, Россия
maksim.klimenko@mail.ru

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

⁴Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия

⁵Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

RECENT ADVANCES AND PROBLEMS IN MODELING OF THERMOSPHERE-IONOSPHERE SYSTEM

¹M.V. Klimenko, ¹V.V. Klimenko, ¹F.S. Bessarab, ¹Yu.N. Korenkov, ¹T.V. Sukhodolov, ¹E.V. Rozanov,
¹I.E. Zakharenkova, ¹N.V. Chirik, ¹N.A. Korenkova, ¹D.S. Kotova, ¹V.B. Ovodenko, ²V.L. Lisina, ³K.G. Ratovsky,
³A.S. Yasyukevich, ³Y.V. Yasyukevich, ⁴A.T. Karpachev, ⁵O.V. Mingalev, ⁵I.V. Mingalev

¹West Department of the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia
maksim.klimenko@mail.ru

²Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

³Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

⁴Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk, Russia

⁵Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

Аннотация. Представлен обзор существующих моделей термосферы и ионосферы. Приведены последние достижения и основные результаты за последнее десятилетие в области моделирования системы термосфера–ионосфера. Обсуждаются ближайшие перспективы и планы развития в области моделирования системы термосфера–ионосфера. Отдельно рассматриваются новые знания в области физики ионосферы, которые удалось получить с помощью Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) как в качестве отдельной модели, так и как части модели всей атмосферы EAGLE.

Ключевые слова: модель, космическая погода, система термосфера–ионосфера, атмосфера, магнитосферно-ионосферное взаимодействие.

Abstract. It is presented an overview of the existing thermosphere–ionosphere coupled models. The recent advances and main results of the last decade in the field of modeling the thermosphere–ionosphere system are presented. The immediate prospects and development plans in the field of modeling the thermosphere–ionosphere system are discussed. Separately, a new knowledge in ionospheric physics that were obtained in the last decade on the basis of the Global Self-consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere, and Protonosphere (GSM TIP) and EAGLE model would be present.

Keywords: model, space weather, thermosphere–ionosphere system, atmosphere, magnetosphere-ionosphere coupling.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование солнечно-земных связей является неотъемлемой частью бурно развивающегося в настоящее время нового направления прикладной науки — космической погоды, направленной на изучение и мониторинг состояния межпланетного и околоземного космического пространства. Изучение влияния процессов в нижней и средней атмосфере на поведение параметров верхней атмосферы является неотъемлемой частью космической погоды. Другим аспектом космической погоды является влияние на ионосферу Земли процессов на Солнце, передаваемых солнечной радиацией, солнечным ветром и межпланетным магнитным полем. При этом существенная часть процессов осуществляется посредством магнитосферно-ионосферных связей. Распределение различных параметров верхней атмосферы оказывает существенное влияние на движение и торможение спутников, а также на условия распространения радиоволн, что важно для работы систем связи воздушных и морских судов, глобальных навигационных систем (включая ГЛОНАСС), загоризонтной радиолокации и пеленгации. Основным

способом описания пространственно-временного распределения этих параметров при решении прикладных задач является использование моделей среды различного типа. В данной работе представлен обзор существующих моделей верхней атмосферы Земли и представлены основные достижения в области моделирования системы термосфера–ионосфера, полученные в последнее десятилетие. Также обсуждаются ближайшие планы и пути развития моделирования системы термосфера–ионосфера, в том числе в контексте создания модели охватывающей магнитосферно-атмосферно-ионосферные связи. Отдельным пунктом данного доклада является обзор последних достижений в области физики ионосферы, полученных с использованием Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП).

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. Основной проблемой при построении глобальной эмпирической модели любого параметра верхней атмосферы в большей или меньшей степени является недостаточный объем данных наблюдений. Эмпирическая справочная модель ионосферы IRI (International Reference Ionosphere) [Rawer et al., 1978; Bilitza et al., 2014] описывает климатическое состояние ионосферы и успешно используется при решении научных и прикладных задач на протяжении более 50 лет. Исследования показывают, что модель IRI в среднем дает хорошие результаты по воспроизведению ионосферных параметров в спокойных условиях на средних широтах. Опции URSI и CCIR модели IRI, предназначенные для расчета параметров максимума F2-слоя, основаны, главным образом, на экспериментальных данных станций наземного зондирования ионосферы и ограниченном объеме спутниковых данных [Jones, Gallet, 1962; Fox, McNamara, 1988]. Недавние исследования показали, что модель IRI неплохо описывает долготную вариацию электронной концентрации в F2-области среднеширотной ионосферы [Klimenko et al., 2015b], используя при этом эмпирическую модель геомагнитного поля IGRF (International Geomagnetic Reference Field). Наиболее значимые последние модификации модели IRI, как и основанных на ней моделей, описывают поведение высоты максимума F2-слоя и электронной плотности в E-области высокоширотной ионосферы [Bilitza et al., 2017, Бадин и др., 2013]. Также ведутся разработки эмпирических моделей широтно-долготного распределения электронной концентрации в высокоширотном регионе, который не самым лучшим образом представлен в модели IRI [Karapachev, 2016, Themens et al., 2017]. Они связаны в том числе со сложностями в воспроизведении моделями структуры главного ионосферного провала, модель которого необходимо будет дорабатывать.

Для вычисления температуры и химического состава нейтральной атмосферы в качестве справочной модели широко используется модель MSIS [Hedin et al., 1977]. Последняя версия этой модели NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002] использует ракетные и спутниковые измерения, а также данные радаров некогерентного рассеяния. Модель рассчитывает концентрации He, O, N₂, O₂, Ar, H, N, общую массовую плотность, нейтральную температуру в интервале высот от поверхности Земли до 1000 км. NRLMSISE00 позволяет рассчитать параметры нейтральной компоненты среды, пытаясь учесть изменения геомагнитной активности. Кроме того, модель NRLMSISE00 дает возможность вычислить концентрацию возбужденного атомарного кислорода. Существенный вклад в дальнейшую модификацию этой модели могут внести данные, полученные с помощью инструментов GUVI на спутнике TIMED. HWM (Horizontal Wind Model) [Hedin et al., 1988] представляет собой эмпирическую модель горизонтального нейтрального ветра в средней и верхней термосфере. Модель использует данные спутников,

радаров некогерентного рассеяния и оптических интерферометров Фабри-Перо. Для описания зональной и меридиональной компонент ветра используется ограниченный набор сферических гармоник. 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. При этом, было значительно модифицировано описание горизонтального ветра на высотах нижней термосферы, что позволило с помощью модели ионосферы воспроизвести наблюдаемые динамо электрические поля. 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 гелиосферных, атмосферных, метеорологических и магнитосферных возмущений [Pavlov, Pavlova, 2011; Klimenko et al., 2012a; Bessarab et al., 2015]. 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, предоставляемые GIRO (Global Ionospheric Radio Observatory) [Reinisch, Galkin, 2011], и техника нелинейной компенсации ошибок для корректировки коэффициентов CCIR модели IRI [Galkin et al., 2012]. Таким образом, IRTAM, используя преимущества эмпирической модели IRI, позволяет перейти от описания F-области ионосферы в терминах космического климата к ее описанию в терминах космической погоды. Существуют также ассимиляционные процедуры, использующие модель IRI и данные абсолютных значений полного электронного содержания (ПЭС) [Maltseva et al., 2012; Ovodenko et al., 2015]. Как показывают результаты последних исследований, эти процедуры требуют существенного пересмотра и доработки [Котова и др., 2018].

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]; 3) тайваньскую модель [Chen et al., 2016]. Эти модели позволяют получать глобальные трехмерные распределения электронной плотности 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 посредством физических уравнений сохранения массы, импульса и энергии. Основной трудностью в создании этих моделей является то, что корректировка ионосферных параметров должна быть каким-то образом учтена при корректировке параметров термосферы и электрических полей, являющихся входными параметрами ионосферных моделей. Решение данной проблемы может позволить усовершенствовать существующие модели данного типа. Кроме того, следует учитывать, что массив данных, по которым можно осуществлять корректировку всех ассимиляционных моделей в реальном времени достаточно ограничен и непостоянен. Именно поэтому развитие и создание численных моделей околоземного пространства до сих пор является важной научной и прикладной задачей.

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

В настоящее время существует целый ряд численных моделей ионосферы, разработанных как в нашей стране под руководством: Павлова А.В. (ИЗМИРАН) [Pavlov, 2003], Тащилина А.В. (ИСЗФ СО РАН) [Тащилин, Романова, 2001, 2013], Мингалева В.С. (ПГИ КНЦ РАН) [Mingalev et al., 1988], Уварова В.М. (ААНИИ) [Уваров и др., 1992; Uvarov, Lukianova, 2015], так и за рубежом: SUPIM (Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model), Англия [Bailey et al., 1997], SAMI2-3 (Sami is Another Model of the Ionosphere), США [Huba et al., 2000] и TDIM (Time-Dependent Ionospheric Model), США [Schunk, 1988]. Следует отметить, что только лишь в модели SAMI3, в отличие от всех остальных моделей, упомянутых выше, решается система уравнений переноса массы, импульса и энергии, которая является системой дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа. При этом, во всех этих моделях, включая модель SAMI3, такие характеристики околоземной среды, как проводимость ионосферы, электрическое поле, состав, тепловой режим и динамика нейтральной атмосферы являются входными параметрами, т. е. задаются на основании различных эмпирических моделей.

В отличие от моделей ионосферы, в таких моделях, как ГСМ ТИП (Глобальная самосогласованная модель термосферы, ионосферы и протоносферы), Калининград [Намгаладзе и др., 1990; Korenkov et al., 1998; Клименко и др., 2006], UAM (Upper Atmosphere Model), Мурманск [Намгаладзе и др., 1996], STIPe (The Coupled Thermosphere Ionosphere Plasmasphere Electrodynamics model), США [Millward et al., 2001], TIME GCM (Thermosphere–Ionosphere–Mesosphere–Electrodynamics General Circulation Model), США [Richmond et al., 1992], GITM (Global Ionosphere–Thermosphere Model), США [Ridley et al., 2006], GAIA (Whole Atmosphere–Ionosphere Coupled Model), Япония [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, среднюю и верхнюю атмосферу, однако,

рассматривают ионосферу в ограниченном интервале высот, т. е. имеют верхнюю границу. При этом следует отметить, что в модели TIME GCM не учитывается горизонтальный перенос заряженной компоненты ионосферной плазмы, что делает ионосферный блок этой модели не совсем корректным. 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. Здесь следует отметить, что Отличительной особенностью моделей ГСМ ТИП, UAM и STIPe является самосогласованное описание параметров плазмосферы и электрического поля ионосферного и магнитосферного происхождения. Последние модификации модели ГСМ ТИП позволяют корректно описывать распределение электрического поля и других параметров ионосферы на экваториальных, средних и высоких широтах. С использованием модели ГСМ ТИП, разработанной в лаборатории моделирования ионосферных процессов ЗО ИЗМИРАН были проведены исследования по следующим направлениям: электродинамика ионосферы; ионосферно-плазмосферная климатология и аномалии; ионосферные эффекты геомагнитных бурь; ионосферные эффекты внезапных стратосферных потеплений; расслоения экваториального F2-слоя и формирование F3- и G-слоев в экваториальной ионосфере в спокойных условиях и во время геомагнитных возмущений; плазменные пузыри и температурный режим в окрестности их формирования; ионосферные эффекты перед сильными землетрясениями; ионосферные эффекты солнечных затмений и их влияние на электродинамику ионосферы; влияние ионосферных возмущений на распространение КВ-радиоволн. Среди основных научных результатов, полученных за последние 10 лет с использованием модели ГСМ ТИП можно выделить следующие:

1. Показано [Клименко и др., 2015; Ратовский и др., 2018], 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. 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 [Korenkov et al., 2012], тогда как изменения вертикального электромагнитного дрейфа плазмы являются ключевым механизмом формирования отклика низкоширотной ионосферы на внезапные стратосферные потепления [Klimenko et al., 2015a].

3. Наблюдающийся в спокойных условиях в ночное время F3-слой, многократные расслоения и явление F-рассеяния во время геомагнитных бурь формируются неоднородным по высоте вертикальным электромагнитным дрейфом плазмы [Klimenko et al., 2011, 2012b].

4. Предсказано существование G-слоя (на высотах ~1000 км) в ночное время над экватором, который формируется меридиональной компонентой термосферного ветра [Клименко и Клименко, 2012].

5. Показано, что механизмами формирования аномалии моря Уэдделла (WSA) и Якутской аномалии (YA) являются: а) горизонтальный перенос плазмы в высоких и субавроральных широтах за счет $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ 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 одной из актуальных задач физики околоземной космической плазмы является создание корректной глобальной модели атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли с учетом самосогласованного описания магнитного и электрического полей. Это позволит учесть важнейшие физические процессы, и в принципе может дать возможность описания реального поведения околоземного космического пространства. Шаги в этом направлении уже делаются. В частности, в США консорциум из нескольких институтов работает над проектом IDEA (Объединенная динамика в атмосфере Земли). Основными целями данного проекта являются соединение атмосферной модели (WAM) с моделью ионосферы-плазмосферы-электродинамики (IPE) и изучение реакции ионосферы на воздействия, связанные с солнечной активностью и процессами в нижних слоях атмосферы. Предварительные результаты, полученные с использованием модели IDEA, были представлены в статье Wang et al. [2014]. Параллельно продолжается объединение моделей TIE-GCM и WACCM-X в обсерватории верхней атмосферы (NAO NCAR) [Pedatella et al., 2016]. Разработанная модель будет использоваться для изучения поведения термосферы и ионосферы и для поддержки космических миссий ICON и GOLD. Канадская модель ионосферы и атмосферы (C-IAM) также находится в стадии разработки. Модель представляет собой сочетание расширенной версии канадской модели средней атмосферы (CMAM) и модели верхних слоев атмосферы (UAM). Модель C-IAM и некоторые полученные с ее помощью результаты кратко представлены в статье Martynenko et al. [2014]. Модель EAGLE представляет собой объединение химико-климатической модели (ХКМ) HAMMONIA (MPI-MET, Гамбург, Германия) с моделью ГСМ ТИП (Калининград, Россия). С помощью модели EAGLE был проведен ряд научных исследований, позволивший интерпретировать некоторые особенности распределения параметров верхней атмосферы на основе атмосферно-ионосферного взаимодействия [Klimenko et al., 2019].

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 17-17-01060, № 17-77-20009 и РФФИ в рамках научного проекта № 18-55-52006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бадин В.И., Деминов М.Г., Деминов Р.Г., Шубин В.Н. Модель медианы критической частоты E-слоя для авроральной области // Солнечно-земная физика. 2013. Т. 22. С. 24–26.

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 аэронавигация. 2015. Т. 55, № 5. С. 769–789.

Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли — динамо поле и экваториальный электроджет // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46, № 4. С. 485–494.

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

Котова Д.С., Оводенко В.Б., Ясюкевич Ю.В. и др. Коррекция эмпирических ионосферных моделей IRI-Plas и NeQuick в высокоширотном регионе с использованием данных удаленных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Химическая физика. 2018. Т. 37, № 7. С. 87–92. DOI: [10.1134/S0207401X18070129](https://doi.org/10.1134/S0207401X18070129).

Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В. и др. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 1990. Т. 30, № 4. С. 612–619.

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

Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В. и др. Эффекты последствий геомагнитных бурь: статистический анализ и теоретическое объяснение // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 4. С. 32–42. DOI: [10.12737/stp-44201804](https://doi.org/10.12737/stp-44201804).

Тащилин А.В., Романова Е.Б. Роль электромагнитного дрейфа в формировании полярной полости // Геомагнетизм и аэронавигация. 2001. Т. 41, № 2. С. 218–223.

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.

Уваров В.М., Барашков П.Д., Захарова А.П. Модель полярной ионосферы с учетом влияния межпланетной среды. 1. Эффект азимутальной компоненты ММП // Геомагнетизм и аэронавигация. 1992. Т. 32, № 3. С. 70–77.

Bailey G.J., Balan N., Su Y.Z. The Sheffield University plasmasphere ionosphere model — a review // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59, N 13. P. 1541–1552. DOI: [10.1016/S1364-6826\(96\)00155-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00155-1).

Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., et al. E-region ionospheric storm on May 1–3, 2010: GSM TIP model representation and suggestions for IRI improvement // Adv. Space Res. 2015. V. 55, N 8. P. 2124–2130. DOI: [10.1016/j.asr.2014.08.003](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.08.003).

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](https://doi.org/10.1002/2016SW001593).

Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., et al. The International Reference Ionosphere 2012 — a model of international collaboration // J. Space Weather Space Clim. 2014. V. 4, N A07. DOI: [10.1051/swsc/2014004](https://doi.org/10.1051/swsc/2014004).

Chen C.H., Lin C.H., Matsuo T., et al. Ionospheric data assimilation with thermosphere-ionosphere-electrodynamics general circulation model and GPS-TEC during geomagnetic storm conditions // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121. P. 5708–5722. DOI: [10.1002/2015JA021787](https://doi.org/10.1002/2015JA021787).

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

- Fox M.W., McNamara L.F. Improved World-Wide Maps of Monthly Median f_oF_2 // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1988. V. 50, N 12. P. 1077–1086. DOI: [10.1016/0021-9169\(88\)90096-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(88)90096-7).
- Galkin I.A., Reinish B.W., Huang X., Bilitza D. Assimilation of GIRO data into a real-time IRI // *Radio Sci.* 2012. V. 47. RSOL07. DOI: [10.1029/2011RS004952](https://doi.org/10.1029/2011RS004952).
- Hedin A.E., Salah J.E., Evans J.V., et al. A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data MSIS. 1. N₂ density and temperature // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82, N 16. P. 2139–2147. DOI: [10.1029/JA082i016p02139](https://doi.org/10.1029/JA082i016p02139).
- Hedin A.E., Spencer N.W., Killeen T.L. Empirical Global Model of Upper Thermosphere Winds Based on Atmosphere and Dynamics Explorer Satellite Data // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 9959–9978.
- 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1029/2012JA017650).
- Jones W.B., Gallet R.M. The Representation of Diurnal and Geographic Variations of Ionospheric Data by Numerical Methods // *J. Res. National Bureau of Standards. Section D: Radio Propag.* 1962. V. 66D, N 4. P. 419–438.
- Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Pustovalova L.V. Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions // *J Atmos Solar-Terr. Phys.* 2016. V. 146. P. 149–159. DOI: [10.1016/j.jastp.2016.05.008](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.05.008).
- 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](https://doi.org/10.1002/2014JA020861).
- Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bessarab F.S., et al. The dependence of four-peak longitudinal structure of the tropical electric field on the processes in the lower atmosphere and geomagnetic field configuration // *Adv. Space Res.* 2019. DOI: [10.1016/j.asr.2019.06.029](https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.06.029). (В печати).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T., et al. Spatial features of Weddell Sea and Yakutsk Anomalies in f_oF_2 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, N 8. P. 2020–2032. DOI: [10.1016/j.asr.2014.12.032](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.12.032).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T. Formation mechanism of additional layers above regular F₂ layer in the near-equatorial ionosphere during quiet period // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012a. V. 90-91. P. 179–185. DOI: [10.1016/j.jastp.2012.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.02.011).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P. Numerical modeling of the global ionospheric effects of storm sequence on September 9–14, 2005 — comparison with IRI model // *Earth Planets Space.* 2012b. V. 64, N 6. P. 433–440.
- 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](https://doi.org/10.1029/2010RS004590).
- Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Klimenko, M.V., et al. The global thermospheric and ionospheric response to the 2008 minor sudden stratospheric warming event // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. A10309. DOI: [10.1029/2012JA018018](https://doi.org/10.1029/2012JA018018).
- 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](https://doi.org/10.1029/98JA00210).
- Maltseva O., Mozhaeva N., Poltavsky O., Zhbanks G. Use of TEC global maps and the IRI model to study ionospheric response to geomagnetic disturbances // *Adv. Space Res.* 2012. V. 49, N 6. P. 1076–1087. DOI: [10.1016/j.asr.2012.01.005](https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.01.005).
- Martynenko O.V., Fomichev V.I., Semeniuk K., et al. Physical mechanisms responsible for forming the 4-peak longitudinal structure of the 135.6 nm ionospheric emission: first results from the Canadian IAM // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. V. 120. P. 51–61. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.08.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.014).
- 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](https://doi.org/10.1029/2000JA000342).
- Mingalev V.S., Krivilev V.N., Yevlashina M.L., Mingaleva G.I., Numerical modeling of the high-latitude F-layer anomalies // *PAGEOPH.* 1988. V. 127, N 2. P. 323–334. DOI: [10.1007/BF00879815](https://doi.org/10.1007/BF00879815).
- 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.
- Pavlov A.V. New method in computer simulations of electron and ion densities and temperatures in the plasmasphere and low-latitude ionosphere // *Ann. Geophys.* 2003. V. 21, N 7. P. 1601–1628.
- Pavlov A.V., Pavlova N.M. Comparison of modeled electron densities and electron and ion temperatures with Arecibo observations during undisturbed and geomagnetic storm periods of 7–11 September 2005 // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A03301. DOI: [10.1029/2010JA016067](https://doi.org/10.1029/2010JA016067).
- Pedatella N.M., Fang T.-W., Jin H., et al. Multimodel comparison of the ionosphere variability during the 2009 sudden stratosphere warming // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016. V. 121. P. 7204–7225. DOI: [10.1002/2016JA022859](https://doi.org/10.1002/2016JA022859).
- 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](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).
- Rawer K., Bilitza D., Ramakrishnan S. Goals and Status of the International Reference Ionosphere // *Rev. Geophys.* 1978. V. 16. P. 177–181.
- Reinisch B.W., Galkin I.A. Global ionospheric radio observatory // *Earth, Planets and Space.* 2011. V. 63, N 4. P. 377–381.
- 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 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. V. 68, N 8. P. 839–864. DOI: [10.1016/j.jastp.2006.01.008](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.01.008).
- Schunk R.W. A mathematical model of the middle and high latitude ionosphere // *Pure Appl. Geophys.* 1988. V. 127. P. 255–303.
- 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](https://doi.org/10.1029/2002RS002794).
- Solomentsev D., Khattatov B., Codrescu M., et al. 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](https://doi.org/10.1029/2012SW000777).

*М.В. Клименко, В.В. Клименко, Ф.С. Бессараб, Ю.Н. Кореньков, Т.В. Суходолов, Е.В. Розанов,
И.Е. Захаренкова, Н.В. Чирик, Н.А. Коренькова, Д.С. Котова, В.Б. Оводенко, В.Л. Лисина, К.Г. Ратовский,
А.С. Ясюкевич, Ю.В. Ясюкевич, А.Т. Карпачев, О.В. Мингалев, И.В. Мингалев*

Themens D.R., Jayachandran P.T., Galkin I., Hall C. The Empirical Canadian High Arctic Ionospheric Model (E-CHAIM): N_mF2 and h_mF2 // J Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122, N 8. P. 9015–9031. DOI: [10.1002/2017JA024398](https://doi.org/10.1002/2017JA024398).

Uvarov V.M., Lukianova R.Yu. Numerical modeling of the polar F region ionosphere taking into account the solar wind conditions // Adv. Space Res. 2015. V. 56, N 11. P. 2563–2574. DOI: [10.1016/j.asr.2015.10.004](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.10.004).

Wang H., Akmaev R.A., Fang T.-W., et al. First forecast of a sudden stratospheric warming with a coupled whole-atmosphere/ionosphere model IDEA // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119. P. 2079–2089. DOI: [10.1002/2013JA019481](https://doi.org/10.1002/2013JA019481).