

ГЛОБАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ EAGLE КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ПРИЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ

© 2019 г. В. В. Клименко¹, М. В. Клименко^{1*}, Ф. С. Бессараб¹, Т. В. Суходолов^{1,2,3},
Ю. Н. Кореньков¹, Б. Функе, Е. В. Розанов^{1,2,3}

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

²Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, World Radiation Center, Davos, Switzerland

³Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

⁴Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC, Granada, Spain

*E-mail: maksim.klimenko@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.2019;

после доработки 09.03.2019;

принята в печать 20.03.2019

В данной статье представлены основные этапы разработки новой, не имеющей аналогов в Европе модели всей атмосферы EAGLE. Исследованы пути согласования моделей нижней, средней и верхней атмосферы в рамках модели EAGLE. Результаты модели EAGLE подтверждают, что четырехпиковая долготная вариация и вечерний всплеск восточного электрического поля на экваторе являются следствиями атмосферно-ионосферного взаимодействия. Показано, что модель EAGLE может стать важным инструментом исследования влияния атмосферы на электрическое поле в приэкваториальной ионосфере.

Ключевые слова: атмосфера, ионосфера, модель нижней и верхней атмосферы, электрическое поле, долготная вариация.

DOI: 10.1134/S0207401X19070070

1. ВВЕДЕНИЕ

Состояние средней и верхней атмосферы (концентрации нейтральных и заряженных частиц, температура и скорость ветра) оказывает существенное влияние на движение и торможение спутников, а также на условия прохождения радиосигналов, знание которых важно для бесперебойной работы систем связи воздушных и морских судов, загоризонтной радиолокации и глобальных навигационных систем. Существующие в настоящее время эмпирические модели средней и верхней атмосферы, построенные по данным наблюдений и используемые для решения различных прикладных задач, описывают среднее состояние системы и недостаточно точно описывают параметры среды в периоды быстрых изменений космической погоды, связанных с гелиосферными, атмосферными, метеорологическими и магнитосферными возмущениями. Это относится и к наиболее часто используемому международным справочным моделям ионосферы — IRI, атмосферы — CIRA и MSIS [1–3]. В связи с этим создание взаимосвязанной и самосогласованной модели нижней, средней и верхней атмосферы является актуальным и приоритетным прикладным на-

правлением. Научную значимость создания такой модели трудно переоценить. Такая модель необходима для понимания различных аспектов сложного нелинейного взаимодействия нижних и верхних слоев атмосферы и причин пространственно-временной и, в частности, долготной изменчивости параметров всей атмосферы.

Проблемы внутренних связей в системе атмосфера–ионосфера были представлены в подробном обзоре [4], авторы которого предположили, что дальнейшие усилия ученых будут направлены на исследования: связей ионосферной изменчивости с метеорологическими возмущениями; физических механизмов, посредством которых солнечная активность и космическая погода влияют на вертикальные связи в атмосфере; воздействия этих процессов на климат. Такие проблемы могут быть решены только с помощью численных моделей, включающих все слои атмосферы и ионосферы от поверхности Земли до высоты 1000 км. Работа в этом направлении основывается на достижениях в областях моделирования процессов в нижней и верхней атмосфере, которые до недавнего времени развивались независимо. В моделях верхней атмосферы/ионосферы основное место

занимали радиационные, электродинамические и химические процессы, в то время как учет связей с нижними слоями атмосферы традиционно реализовывался в простых приближенных формах. К таким моделям можно отнести модель мезосферы, термосферы и ионосферы NCAR TIMEGCM [5], модель английского университетского колледжа Лондона UCL CMAT [6] и некоторые другие. В области моделирования нижней атмосферы основная тенденция состоит в увеличении числа рассматриваемых процессов и размера рассматриваемой области атмосферы. Например, модель CMAM [7] была построена на основе модели климата и общей циркуляции атмосферы путем включения в нее химических и некоторых специфических для верхней атмосферы процессов, что позволило поднять верхнюю границу в модели до 250 км. В этом же направлении развивались модели HAMMONIA [8] и WACCM [9]. В настоящий момент развиваются также несколько моделей, объединяющих атмосферу и ионосферу и способных помочь разрешить перечисленные выше проблемы предсказания поведения системы атмосфера/ионосфера. К таким моделям относятся разрабатываемые в США модели WAM (Whole Atmosphere Model) [10], IDEA (coupled whole-atmosphere/ionosphere model of Integrated Dynamics in Earth's Atmosphere) [11] и WACCMX (Whole Atmosphere Community Climate Model eXtended version) [12, 13]; канадская модель C-IAM (Canadian Ionosphere and Atmosphere Model) [14] и японская модель GAIA (Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy) [15].

В данной статье представлено развитие глобальной модели земной атмосферы (Entire Atmosphere Global Model (EAGLE)), объединяющей модели нижней, средней и верхней атмосферы HAMMONIA (Hamburg Model of the Neutral and Ionized Atmosphere) с глобальной самосогласованной моделью термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП), разработанной в Калининградском отделении ИЗМИРАН (Калининград, Россия). Одной из основных проблем при создании EAGLE стал выбор схемы согласования моделей в области перекрытия высотных сеток модели HAMMONIA и ГСМ ТИП. Для решения этой проблемы было создано несколько тестовых версий модели EAGLE с различными схемами согласования. В данной статье представлены результаты проведенного сравнения тестовых версий модели EAGLE с данными спутниковых измерений и воспроизведение ими основных морфологических особенностей поведения электрического поля на низких широтах. Эти исследования позволили выявить оптимальную версию способа согласования ГСМ ТИП и модели HAMMONIA в области их перекрытия. Кроме того, данная статья призвана показать возможности модели EAGLE для исследования влияния нижележащих слоев атмосферы

на формирование ионосферного электрического поля.

2. ОПИСАНИЕ ВЕРСИЙ МОДЕЛИ EAGLE

2.1. Модель HAMMONIA

Модель HAMMONIA [8] является переработанной версией модели общей циркуляции атмосферы ECHAM5 [16], в которой верхняя граница поднята до ~200–250 км. Модель HAMMONIA включает в себя также модуль описания химических процессов MOZART3. Для моделирования термосферных процессов в эту модель были добавлены расчеты: 1) радиационного нагрева за счет поглощения жесткого солнечного ультрафиолета, 2) выхолаживания за счет инфракрасного излучения с учетом нарушения локального термодинамического равновесия, 3) молекулярной диффузии, а также осуществлена параметризация ионного торможения. В химический модуль были включены процессы ионной химии, позволяющие учесть образование окислов азота под воздействием выпадающих энергичных частиц.

Система уравнений гидротермодинамики в модели решается спектральным методом с треугольным усечением T63, что примерно соответствует горизонтальному разрешению $2^\circ \times 2^\circ$ по широте и долготе. По вертикали модель содержит 119 уровней с толщиной высотных слоев от 600 м в верхней тропосфере до 3 км в мезосфере и до 8 км в термосфере. Минимальный шаг по времени равен 3 мин. Для использования модели в свободном режиме необходимо задать температуру поверхности океана, глобальное распределение морского льда, величин потоков с поверхности или поверхностную концентрацию парниковых и озоноразрушающих газов, спектральный поток солнечной радиации, скорости ионизации и ряд других параметров. Для моделирования конкретных событий (атмосферных явлений и проявлений космической погоды) предусмотрено использование ассимиляции метеорологических полей. Подробное описание модели можно найти в работе [8].

2.2. Модель ГСМ ТИП

Модель ГСМ ТИП основана на численном интегрировании системы квазигидродинамических уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для нейтральных и заряженных частиц холодной околоземной плазмы совместно с уравнением для электрического потенциала в интервале высот от 80 км до геоцентрического расстояния ~15 земных радиусов с учетом несовпадения географической и геомагнитной осей. С использованием этой модели рассчитываются глобальные распределения нейтральной температуры T_n , концентраций нейтральных компонент (O_2 , N_2 , O , NO , $N(^4S)$ и $N(^2D)$) и компонент вектора средне-

Таблица 1. Основные характеристики модели HAMMONIA и ГСМ ТИП

Параметры модели	HAMMONIA	ГСМ ТИП
Вертикальные координаты	σ -уровни давления	высоты
Разрешение по горизонтали	$1.9^\circ \times 1.9^\circ$	$5^\circ \times 5^\circ$
Система координат	географическая	геомагнитная
Шаг по времени	3 мин	1 мин
Область моделируемых высот	0–200 км	80–500 км 175 км–15 Re
Методы решения	спектральный	конечно-разностный
Распараллеливание	да	нет

массовой скорости нейтральной составляющей верхней атмосферы Земли, концентраций, температур и скоростей движения атомарных (O^+ , H^+) и молекулярных ионов (N_2^+ , O_2^+ , NO^+), а также двумерное распределение потенциала электрического поля ионосферного и магнитосферного происхождений. Система уравнений модели решается конечно-разностными методами, при этом используется пространственная сетка 5° по широте и 5° по долготе в сферической геомагнитной системе координат с переменным шагом по высоте (минимальный шаг равен 3 км на высоте 80 км). Шаг интегрирования по времени равен 1 мин. Основными входными параметрами модели являются: интенсивности солнечного УФ- и крайнего УФ-излучений [17], энергия и поток энергии высыпавшихся авроральных электронов, разность потенциалов через полярные шапки и продольные токи второй зоны [18]. Более подробное описание модели ГСМ ТИП можно найти в работах [19, 20]. Ранее модель ГСМ ТИП использовалась для исследования отклика ионосферы на различные атмосферные возмущения с использованием задания граничных условий на высоте 80 км [21–24].

2.3. Способ согласования

На начальном этапе совместимость моделей тестировалась с использованием ГСМ ТИП в автономном режиме и граничных условий на высоте 80 км из модели HAMMONIA. Для анализа внутренней изменчивости ГСМ ТИП была проведена серия расчетов состояния ионосферы, различающихся только граничными условиями на высоте 80 км, полученными из нескольких независимых реализаций модели HAMMONIA. Небольшие изменения в начальных данных этой модели не привели к кардинальному изменению состояния верхней атмосферы через 2–3 модельных дня, что указывает на отсутствие необходимости использования ансамблевого подхода для исследований влияния интенсивных возмущений на состояние верхней атмосферы. Проведенные эксперименты продемонстрировали совместимость HAMMONIA и ГСМ ТИП и позволили перейти к созданию

единой модели EAGLE. Основными проблемами на этом этапе были: соединение распараллеленного кода модели HAMMONIA с однопроцессорным кодом ГСМ ТИП, выбор схемы согласования моделей в области перекрытия высотных сеток и двухсторонняя интерполяция модельных переменных. Для решения этих проблем были разработаны программный интерфейс вызова ГСМ ТИП с процессора ввода–вывода, используемого в модели HAMMONIA, и интерполяции необходимых переменных между различными модельными координатными системами. Важные особенности моделей HAMMONIA и ГСМ ТИП, которые необходимо было учитывать при их объединении, сведены в табл. 1. Из этой таблицы видно, что HAMMONIA и ГСМ ТИП различаются в основном системами координат, сетками и размером шагов по времени. Также видно, что модели частично “перекрываются” в области высот 80–200 км, что потребовало определиться с выбором оптимальной схемы согласования моделей HAMMONIA и ГСМ ТИП в высотных областях перекрытия.

Для исследования оптимального выбора схемы согласования моделей в области перекрывающихся высот нами были рассмотрены три тестовые версии модели EAGLE. В первой версии этой модели (EAGLE-80) передача параметров из HAMMONIA в ГСМ ТИП осуществлялась только на нижней границе последней модели – на высоте 80 км [24]. Во второй и третьей версиях модели (EAGLE-100 и EAGLE-120), кроме передачи параметров на высоте 80 км, температура и горизонтальные компоненты ветра в области высот 80–100 или 80–120 км рассчитывались по модели HAMMONIA, а остальные моделируемые параметры – по ГСМ ТИП.

Для проведения численных экспериментов нами был выбран месяц январь 2009 г. Этот период характеризовался низкой солнечной ($F_{10.7} \sim 70$) и геомагнитной ($K_p < 3$) активностью. Расчеты были выполнены для периода с 1 по 31 января 2009 г., включающего внезапное стратосферное потепление. День 15 января, для которого представлены результаты модельных расчетов, соответствует невозмущенным атмосферным и магнитосферным условиям. При расчетах использо-

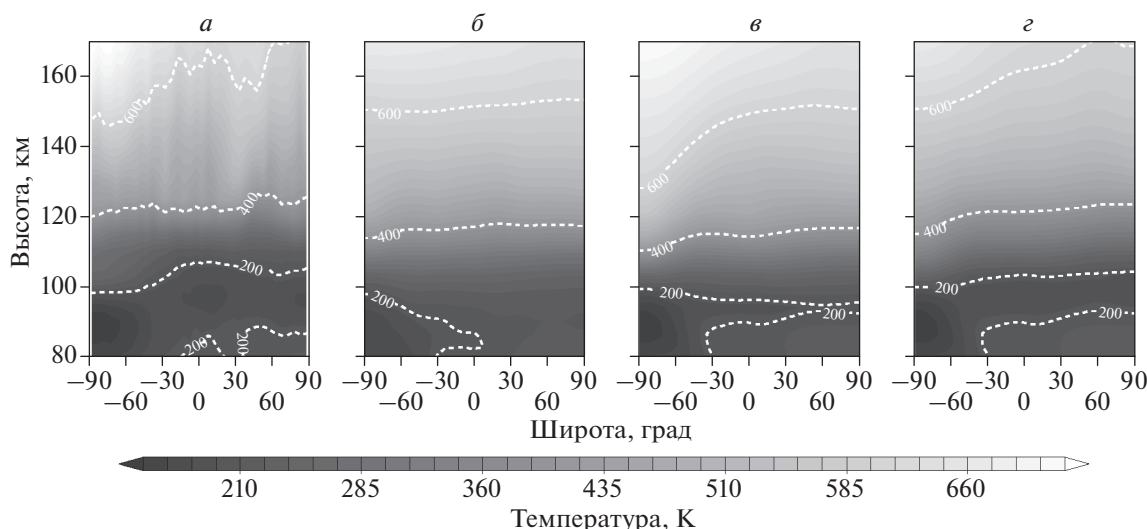


Рис. 1. Широтно-высотное распределение среднезональной среднемесячной нейтральной температуры в январе 2009 года, полученное по данным наблюдений со спутника MIPAS (а) и рассчитанное с помощью трех версий модели EAGLE — EAGLE-80, EAGLE-100, EAGLE-120 (б, в, з). Белыми штриховыми линиями обозначены изотермы 200, 400 и 600 К.

вался “стандартный” волновой форсинг модели HAMMONIA и ассимилировались наблюдаемые распределения ветров и температуры с уровней давления от 850 до 1 гПа.

Дополнительно нами были проведены расчеты с использованием ГСМ ТИП при задании постоянных граничных условий на высоте 80 км. Это позволило выявить различия в описании ионосферных электрических полей между версиями модели EAGLE и ГСМ ТИП. Расчеты по модели EAGLE и ГСМ ТИП проводились при задании постоянной разности потенциалов через полярные шапки и продольных токов второй зоны без учета изменения солнечной и геомагнитной активности в рассматриваемый период. Следует отметить, что это приближение абсолютно адекватно для периода минимума солнечной и геомагнитной активности в январе 2009 года.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Ниже представлены результаты расчетов в трех тестовых вариантах модели EAGLE. На рис. 1 показана вертикальная структура среднезональной среднемесячной нейтральной температуры в январе 2009 года в области высот верхней мезосферы и нижней термосферы. Одной из характерных черт этого региона является наличие холодной летней мезопаузы [25]. Из результатов расчетов по модели EAGLE-80 (рис. 1б) виден недостаток охлаждения на высотах мезопаузы, что также приводит к перестройке температурной стратификации нижней термосферы, делая ее более теплой и меридионально однородной. Это связано с отсутствием в ГСМ ТИП параметризации распространения и разрушения гравитационных волн, которая необходима для создания локаль-

ного вихря на высотах в области 90–100 км в летних высоких широтах. Модель EAGLE-80 просто объединяет стратосферный и термосферный вихри. При этом полностью теряется эта очень важная динамическая особенность рассматриваемого региона. В версии EAGLE-100 (рис. 1в) мезосферный вихрь образуется, но нереалистично вытягивается вверх, согласно ГСМ ТИП, приводя к перегреву летней нижней термосферы. Результаты расчетов по EAGLE-120 показывают наилучшее согласование с данными со спутника MIPAS в диапазоне высот 80–175 км (рис. 1з). В этой версии динамика рассчитывается непрерывно от поверхности до высоты 120 км по модели HAMMONIA, и таким образом практически полностью описываются эффекты воздействия гравитационных волн на средний поток.

Согласно существующим представлениям [26, 27], приэкваториальное электрическое поле является суперпозицией динамо электрического поля, генерируемого в токопроводящем слое нижней ионосферы на высотах в диапазоне 80–150 км термосферным ветром, и электрического поля магнитосферной конвекции. В спокойных условиях основной вклад в электрическое поле на экваторе и на низких широтах вносит динамо-поле. Амплитуда и направление динамо электрического поля зависят как от внутренних процессов, происходящих в термосфере, так и главным образом от приходящих снизу приливных волн, формирующихся в нижележащей атмосфере [28–30]. На рис. 2 показаны рассчитанные в моделях ГСМ ТИП, EAGLE-80, EAGLE-100 и EAGLE-120 долготная и LT-вариации зональной компоненты электрического поля в низкоширотном регионе.

Согласно изложенному в работах [31, 32], основными морфологическими характеристиками

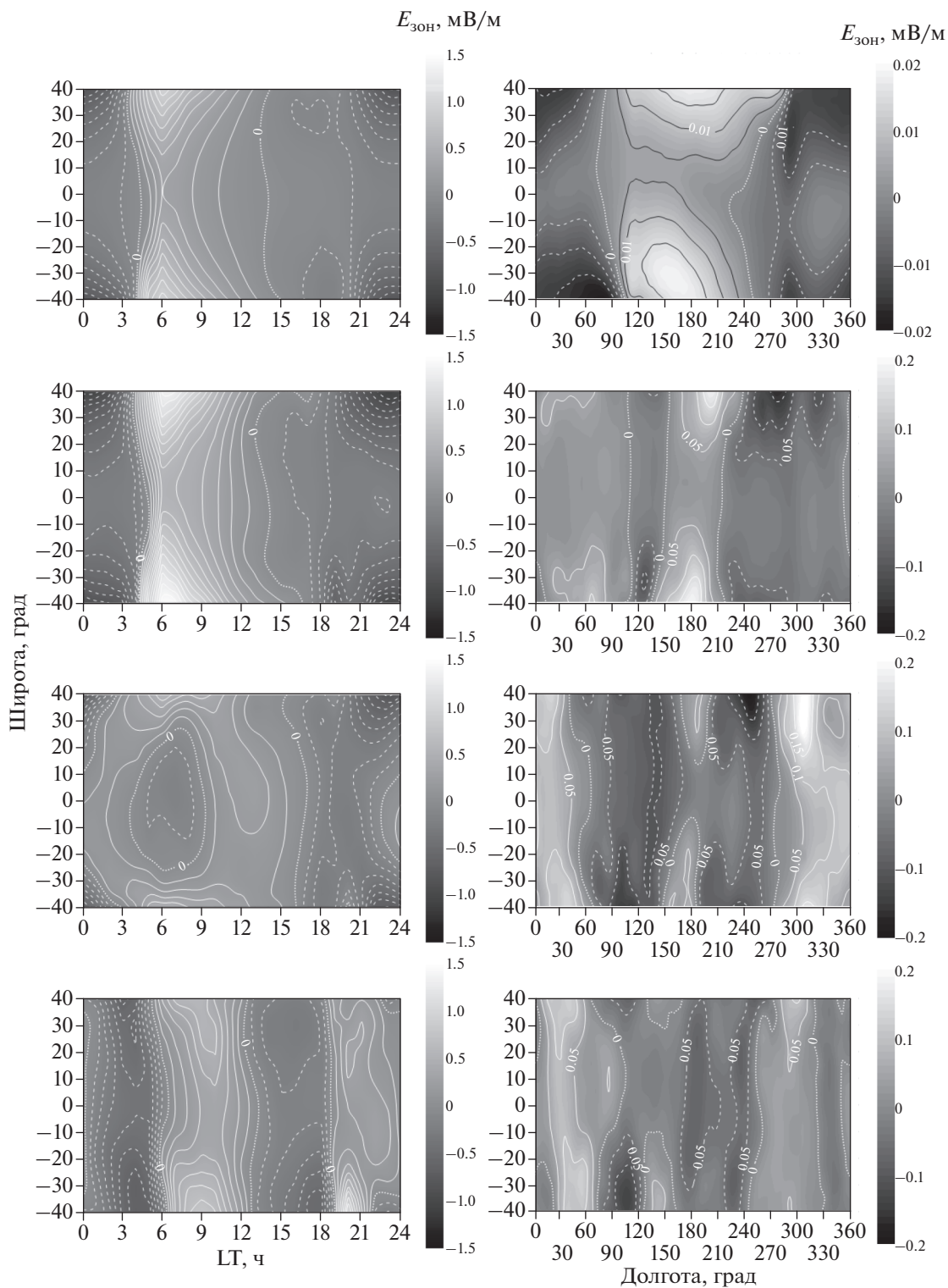


Рис. 2. LT- (левая панель) и долготная (правая панель) вариации зональной компоненты электрического поля 15.01.2009 на различных широтах в интервале от 40° ю.ш. до 40° с.ш., рассчитанные в ГСМ ТИП, моделях EAGLE-80, EAGLE-100 и EAGLE-120 (панели сверху вниз). Изолинии с отрицательными значениями поля показаны штриховыми линиями, с положительными — сплошными, с нулевыми — точечными. Шаг между изолиниями был выбран равным 0.1 мВ/м для всех LT-вариаций, 0.05 мВ/м — для долготных вариаций, рассчитанных в различных вариантах модели EAGLE, и 0.005 мВ/м — для долготных вариаций, рассчитанных в ГСМ ТИП.

ЛТ-вариации зональной компоненты электрического поля на низких широтах являются следующие особенности: 1) зональное электрическое поле имеет восточное направление днем и западное направление ночью; 2) в вечернем секторе местного времени происходит всплеск восточного электрического поля перед сменой его направления на западное. Результаты расчетов ЛТ-вариации зональной компоненты электрического поля, полученные в различных вариантах модели EAGLE и ГСМ ТИП (рис. 2), позволяют сделать следующие выводы. Модель EAGLE-80 воспроизводит практически такую же ЛТ-вариацию зональной компоненты электрического поля, как и модель ГСМ ТИП с гладкой нижней границей. При этом амплитуда суточных изменений зонального электрического поля в модели EAGLE-80 увеличилась примерно в 2 раза по сравнению с ГСМ ТИП. Это происходит за счет изменения нижних граничных условий, что, как показывает анализ результатов наших расчетов, приводит к усилению амплитуды скорости термосферного ветра в токопроводящем слое ионосферы. Следует отметить, что в модели EAGLE-80, так же как и в модели ГСМ ТИП, ЛТ-вариация зонального электрического поля характеризуется наличием восточного поля в дневные предполуденные часы и западного поля во все остальное время. То есть в расчетах по модели EAGLE-80 не воспроизводится всплеск восточного электрического поля на экваторе. Использование модели EAGLE-100 приводит к результатам расчетов, воспроизводящим на экваторе восточное электрическое поле в ночные часы (22–04 LT), западное поле в утренние (04–10 LT) и вечерние (17–22 LT) часы и восточное поле в более поздние дневные часы (до 17 LT) по сравнению с EAGLE-80 за счет изменения структуры ветра в диапазоне высот 80–100 км. При этом происходит значительное ослабление амплитуды зонального электрического поля. Использование модели EAGLE-120 приводит к результатам расчетов, указывающим на формирование на экваторе и на низких широтах зонального электрического поля, ЛТ-вариация которого наилучшим образом воспроизводит наблюдаемые основные морфологические особенности. Прежде всего, следует отметить, что модель EAGLE-120 воспроизводит вечерний всплеск восточного электрического поля, который отсутствует как в моделях EAGLE-80 и EAGLE-100, так и в ГСМ ТИП. Кроме того, величина дневного восточного электрического поля и амплитуда полусуточной вариации зонального электрического поля в расчетах по модели EAGLE-120 превышают все остальные представленные результаты.

Что касается долготной вариации зональной компоненты электрического поля, полученной в различных вариантах модели EAGLE, то в отличие от ГСМ ТИП, которая указывает на формирование одноволновой структуры, все варианты модели EAGLE в той или иной степени воспроиз-

водят четырехволновую структуру в долготной вариации зонального электрического поля. При этом наиболее четко она проявляется в результатах расчетов по модели EAGLE-120 в виде двух основных максимумов восточного электрического поля в африканском (30° в.д.) и американском (270° в.д. или 90° з.д.) долготных секторах и двух более слабых максимумов на 140° в.д. и 210° в.д. (150° з.д.) (тихоокеанский долготный сектор). Следует отметить, что самый сильный максимум формируется в африканском, а самый слабый — в тихоокеанском долготных секторах. Наилучшим образом четырехволновая структура в долготной вариации зонального электрического поля при этом просматривается в минимумах зонального поля, которые формируются на 120° в.д. — индонезийский долготный сектор, 180° в.д. — океанический долготный сектор, 240° в.д. (120° з.д.) — тихоокеанский долготный сектор и 340° в.д. (20° з.д.) — атлантический долготный сектор. Четырехволновая структура в долготной вариации ранее наблюдалась как в зональном электрическом поле (скорости вертикального дрейфа плазмы на высотах F-области ионосферы вблизи экватора) [33–35], так и в долготных вариациях критической частоты F2-слоя и полного электронного содержания [36], которые формируются главным образом за счет долготной вариации зонального электрического поля. В свою очередь, результаты расчетов, полученные с использованием модели EAGLE, подтверждают существующее в настоящий момент мнение [14, 33, 37] о том, что формирование четырехволновой структуры ионосферных параметров в окрестности экватора происходит вследствие процессов, протекающих в нижележащей атмосфере. Воспроизведение морфологических особенностей пространственно-временного распределения зонального электрического поля дает нам уверенность в том, что модель EAGLE наряду с разработанной в США моделью WACCM-X [38] может быть полезным инструментом для изучения сложной динамики и электродинамики в системе атмосфера–ионосфера.

4. ВЫВОДЫ

В данной статье представлено развитие новой модели околоземного пространства — модели EAGLE, включающей в себя расчет параметров нижней, средней и верхней атмосферы. Показано, что при объединении ГСМ ТИП и модели HAMMONIA в области их перекрытия оптимальным для модели EAGLE является использование результатов расчетов параметров нейтральной атмосферы по модели HAMMONIA в высотном диапазоне до 120 км. Модель EAGLE успешно воспроизводит: 1) широтно-высотное распределение температуры в верхней атмосфере; 2) суточную и долготную вариации зонального электрического поля на экваторе. Результаты модели EAGLE подтверждают, что

четырёхпиковая долготная вариация и вечерний всплеск восточного электрического поля на экваторе являются следствием атмосферно-ионосферного взаимодействия. Таким образом, модель EAGLE может быть полезным инструментом для изучения влияния атмосферной изменчивости на ионосферу.

Работа была выполнена при финансовой поддержке грантом Российского научного фонда № 17-17-01060.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fleming, E.L., Chandra S., Barnett J.J., Corney M.* // Adv. Space Res. 1990. V. 10. № 12. P. 11; [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(90\)90386-e](https://doi.org/10.1016/0273-1177(90)90386-e)
2. *Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C.* // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № A12; <https://doi.org/10.1029/2002ja009430>
3. *Bilitza D., Reinisch B.W.* // Adv. Space Res. 2008. V. 42. № 4. P. 599; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.07.048>
4. *Yigit E., Koucká Knížová P., Georgieva K., Ward W.* // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2016. V. 141. P. 1; <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.02.011>
5. *Liu H.-L., Roble R.G.* // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № D23. P. 4695; <https://doi.org/10.1029/2001jd001533>
6. *Harris M.J., Arnold N.F., Aylward A.D.* // Ann. Geophys. 2002. V. 20. № 2. P. 225; <https://doi.org/10.5194/angeo-20-225-2002>
7. *Beagley S., Boone C.D., Fomichev V.I. et al.* // Atmos. Chem. and Phys. 2010. V. 10. P. 1133; <https://doi.org/10.5194/acp-10-1133-2010>
8. *Schmidt H., Brasseur G.P., Charron M. et al.* // J. Climate. 2006. V. 19. № 16. P. 3903; <https://doi.org/10.1175/jcli3829.1>
9. *McDonald S.E., Sassi F., Mannucci A.J.* // Space Weather. 2015. V. 13. № 16. P. 568; <https://doi.org/10.1002/2015Sw001223>
10. *Wang H., Fuller-Rowell T.J., Akmaev R.A. et al.* // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. № A12; <https://doi.org/10.1029/2011ja017081>
11. *Wang H., Akmaev R.A., Fang T.-W. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119. № 3. P. 2079; <https://doi.org/10.1002/2013Ja019481>
12. *Pedatella N.M., Fang T.-W., Jin H. et al.* // Ibid. 2016. V. 121. № 7. P. 7204; <https://doi.org/10.1002/2016JA022859>
13. *Pedatella N.M., Liu H.-L., Marsh D.R. et al.* // J. Geophys. Res. 2018. V. 123. P. 3131; <https://doi.org/10.1002/2017JA025107>
14. *Martynenko O.V., Fomichev V.I., Semeniuk K. et al.* // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2014. V. 120. P. 51; <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.014>
15. *Jin H., Miyoshi Y., Pancheva D. et al.* // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. P. A10323; <https://doi.org/10.1029/2012JA017650>
16. *Roeckner E., Brokopf R., Esch M. et al.* // J. Climate. 2006. V. 19. № 16. P. 3771; <https://doi.org/10.1175/JCLI3824.1>
17. *Кореньков Ю.Н., Бессараб Ф.С., Тимченко А.В., Розанов Е.В.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 7. С. 8.
18. *Клименко В.В., Лукьянова Р.Ю., Клименко М.В.* // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 9. С. 42; <https://doi.org/10.7868/S0207401X13090082>
19. *Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В. и др.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. № 4. С. 612.
20. *Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Förster M. et al.* // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № A7. P. 14697; <https://doi.org/10.1029/98JA00210>
21. *Карнов И.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н. и др.* // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 49.
22. *Карнов И.В., Кшевецкий С.П., Борчевкина О.П. и др.* // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 59; <https://doi.org/10.7868/S0207401X16010064>
23. *Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С. и др.* // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 41; <https://doi.org/10.7868/S0207401X16010106>
24. *Клименко М.В., Бессараб Ф.С., Суходолов Т.В. и др.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 7. С. 70; <https://doi.org/10.1134/S0207401X18070105>
25. *Björn L.G.* // Adv. Space Res. 1984. V. 4. № 4. P. 145.
26. *Денисенко В.В., Еркаев Н.В., Китаев А.В., Матвеев И.Т.* / Математическое моделирование магнитосферных процессов. Новосибирск: Наука, СО РАН. 1992.
27. *Richmond A.D.* // J. Atmos. Terr. Phys. 1995. V. 57. P. 1103; [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(94\)00126-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(94)00126-9)
28. *Forbes J.M., Garrett H.B.* // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. № 3. P. 173; <https://doi.org/10.5636/jgg.31.173>
29. *Richmond A.D., Roble R.G.* // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. № A11. P. 12365; <https://doi.org/10.1029/ja092ia11p12365>
30. *Fesen C.G., Crowley G., Roble R.G. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. № 13. P. 1851; <https://doi.org/10.1029/2000GL000061>
31. *Richmond A.D., Blanc M., Emery B.A. et al.* // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. № A9. P. 4658; <https://doi.org/10.1029/JA085iA09p04658>
32. *Fejer B.G., dePaula E.R., González S.A., Woodman R.F.* // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № A8. P. 13901; <https://doi.org/10.1029/91JA01171>
33. *England S.L., Maus S., Immel T.J., Mende S.B.* // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. № 21. P. L21105; <https://doi.org/10.1029/2006gl027465>
34. *Fang T.-W., Fuller-Rowell T., Akmaev R. et al.* // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. № A3. P. A03324; <https://doi.org/10.1029/2011JA017348>
35. *Alken P., Chulliat A., Maus S.* // Ibid. 2013. V. 118. № 3. P. 1298; <https://doi.org/10.1029/2012JA018314>
36. *Immel T.J., Sagawa E., England S.L. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2006. 33. L15108. № 15; <https://doi.org/10.1029/2006GL026161>
37. *Maute A., Richmond A.D., Roble R.G.* // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. № A6. P. A06312; <https://doi.org/10.1029/2011ja017502>
38. *Liu J., Liu H., Wang W. et al.* // J. Geophys. Res. 2018. V. 123. № 2. P. 1534. P. A06312; <https://doi.org/10.1002/2017ja025010>