

УДК: 535.71

## ПРИЛИВНЫЕ И ПЛАНЕТАРНЫЕ ВОЛНЫ В НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ В МОДЕЛИ EAGLE ДЛЯ УСЛОВИЙ ВНЕЗАПНОГО СТРАТОСФЕРНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ В ЯНВАРЕ 2009 г.

© 2019 г. П. А. Васильев<sup>1,2</sup>, Ф. С. Бессараб<sup>1,2</sup>, И. В. Карпов<sup>1,2</sup>, В. В. Клименко<sup>1</sup>, М. В. Клименко<sup>1</sup>, Т. В. Суходолов<sup>1,3,4</sup>, Е. В. Розанов<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Калининградский филиал Института земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн РАН  
Россия 236016, Калининград, ул. Пионерская, 61  
e-mail: bessarabf@gmail.com

<sup>2</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта  
Россия 236016, Калининград, ул. А. Невского, 14  
e-mail: ivkarpov@inbox.ru

<sup>3</sup>Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, World Radiation Center  
Dorfstrasse 33, 7260, Davos, Switzerland  
e-mail: timofei.sukhodolov@pmodwrc.ch

<sup>4</sup>Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich  
Universitätsstrasse 16, 8006 Zürich, Switzerland  
e-mail: eugene.rozanov@pmodwrc.ch

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

Принята к печати 28.11.2018 г.

В настоящей работе представлены результаты анализа планетарных и приливных вариаций в мезосфере, термосфере и ионосфере, полученных в расчетах для января 2009 г., произведенного с использованием двух версий модели EAGLE. Показано, что в период ВСП имеет место усиление планетарной и приливной волновой активности в нижней термосфере. Рассмотрены особенности изменений солнечно-мигрирующих и немигрирующих компонент приливных вариаций в параметрах термосферы, ионосферы и электрических полей. Воспроизведение вертикального электромагнитного дрейфа в период ВСП над станцией Jisamaга объясняется значительным усилением суточной и полусуточной приливной вариации.

**Ключевые слова:** мезосфера, термосфера, ионосфера, моделирование, электрическое поле, стратосферное потепление.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002-351555241-50>

### ВВЕДЕНИЕ

Резкие повышения температуры полярной стратосферы, получившие название внезапные стратосферные потепления (ВСП), представляют собой крупномасштабные динамические процессы, развивающиеся в зимнем полушарии. Экспериментальные исследования показывают, что в условиях ВСП существенные возмущения отмечаются не только в стратосфере, но и на высотах мезосферы, термосферы и ионосферы [1, 2]. Ионосферные эффекты, возникающие в условиях ВСП, носят планетарный характер и особенно ярко проявляются в экваториальной ионосфере, где возмущения ионосферных

параметров могут достигать 50% относительно спокойных дней. Экспериментальные и теоретические исследования возмущений различных параметров на ионосферных высотах, возникающих в периоды ВСП, важны для понимания физических процессов, посредством которых осуществляется связь нижней и верхней атмосферы. Очевидно, что исследования ионосферных проявлений ВСП необходимо проводить при совместном рассмотрении динамики стратосферы, мезосферы и термосферы.

Особый интерес представляет сильное потепление в январе 2009 г., пришедшееся на продолжительный период очень низкой солнеч-

ной ( $F_{10.7} \sim 70$ ) и геомагнитной ( $K_p < 3$ ) активности. Такая гелио-геофизическая обстановка позволила полагать, что наблюдавшиеся в этот период возмущения в ионосфере инициированы процессами, происходящими в нижних слоях атмосферы. На основе анализа наблюдений было выдвинуто предположение, что во время ВСП в окрестности геомагнитного экватора основной причиной возмущений ионосферных параметров, таких как критическая частота F2-слоя ( $f_oF2$ ) и полное электронное содержание (ПЭС), является усиление полусуточной составляющей в вариациях вертикальной скорости переноса ионов за счет электромагнитного дрейфа [1–7].

Это инициировало проведение исследований роли планетарных и приливных волн в формировании связей между различными слоями атмосферы. Последовавшие затем модельные исследования механизмов формирования ионосферных эффектов ВСП базировались на различных схемах усиления приливной активности в нижней термосфере. В этих исследованиях было достигнуто удовлетворительное согласие пространственных особенностей ионосферных возмущений, полученных в результатах модельных расчетов, с данными наблюдений [8–11]. Однако в большинстве модельных исследований не удалось воспроизвести величину ионосферных возмущений, которая по данным наблюдений достигала 50% относительно фоновых значений. Только в работах [12, 13] было получено количественное воспроизведение низкоширотных ионосферных возмущений во время ВСП 2009 г.

В настоящей работе представлены результаты анализа планетарных и приливных вариаций в мезосфере, термосфере и ионосфере, полученных в расчетах для января 2009 г. с использованием новой численной модели EAGLE [14]. Нами впервые предпринята попытка оценить изменения планетарных и приливных вариаций зонального электрического поля во время ВСП 2009 г., которое является основным механизмом формирования возмущений экваториальной аномалии.

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Модель EAGLE представляет собой объединение климатической модели HAMMONIA (Hamburg Model of the Neutral and Ionized Atmosphere) [15], которая описывает процессы, происходящие в атмосфере в высотном диапазоне от поверхности Земли до высот нижней

термосферы, и модели ГСМ ТИП (Глобальная Самосогласованная Модель Термосферы, Ионосферы и Протоносферы) [16, 17]. Модель HAMMONIA используется для расчетов взаимодействия атмосферной циркуляции с радиационными и химическими процессами для изучения состояния и изменчивости атмосферы. Модель HAMMONIA основана на модели общей циркуляции атмосферы ECHAM5, в которой верхняя граница поднята до  $\sim 250$  км и добавлен модуль химических процессов MOZART3 [18]. Для корректного описания термосферных процессов в модель были добавлены расчет радиационного нагрева за счет поглощения солнечного КУФ, охлаждение за счет ИК излучения  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_3$  с учетом нарушения локального термодинамического равновесия, молекулярная диффузия и параметризация ионного торможения. Система уравнений гидротермодинамики в модели решается спектральным методом, горизонтальное разрешение соответствует  $2^\circ \times 2^\circ$  по широте и долготе. Шаг по высоте неравномерный и составляет: 600 м в верхней тропосфере, до 3 км в мезосфере и 8 км в термосфере. Для моделирования конкретных событий (например, возмущений атмосферы, вызванных развитием ВСП) предусмотрено использование ассимиляции метеорологических полей. Модель HAMMONIA успешно использовалась для анализа влияния стратосферных потеплений на вертикальный перенос термосферных окислов азота [19] и состояние ионосферы [20]. Для расчета параметров верхней атмосферы в модели EAGLE используется модель ГСМ ТИП [16, 17], разработанная в Калининградском филиале (ранее — Западном отделении) ИЗМИРАН. Модель основана на численном интегрировании системы квази-гидродинамических 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  $\sim 15$  земных радиусов с учетом несовпадения географической и геомагнитной осей. В ГСМ ТИП рассчитываются: глобальные распределения нейтральной, ионной и электронной температур, концентрации нейтральных ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}(^4\text{S})$ ,  $\text{N}(^2\text{D})$ ) и заряженных ( $\text{O}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{NO}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{O}_2^+$ ) составляющих, компоненты вектора среднемассовой скорости нейтральной составляющей верхней атмосферы Земли и скоростей движения атомарных ( $\text{O}^+$ ,  $\text{H}^+$ ) ионов, а также двумерное распределение потенциала электрического поля ионосферного и магнитосферного происхожде-

ний. Уравнения модели записаны в сферической геомагнитной системе координат. Для их решения используются конечно-разностные методы на пространственной сетке с разрешением  $5^\circ$  по широте и  $5^\circ$  по долготе и переменным шагом по высоте с минимальным значением 3 км. Основными входными параметрами модели являются солнечное УФ и КУФ-излучение, энергия и поток энергии высыпавшихся авроральных электронов, разность потенциалов через полярные шапки и продольные токи второй зоны. Более подробное описание модели ГСМ ТИП можно найти в работах [16, 17, 21, 22].

Объединение двух моделей осуществлялось путем передачи с шагом в 3 мин результатов расчетов температуры, плотности, зонального и меридионального ветра, полученных в HAMMONIA в ГСМ ТИП. Так как HAMMONIA и ГСМ ТИП имеют общую пространственную область, возможны различные варианты «перекрытия» моделей при их объединении. В первой версии модели EAGLE (EAGLE-80) передача параметров из HAMMONIA в ГСМ ТИП осуществлялась только на нижней границе модели ГСМ ТИП на высоте 80 км [14]. Во второй версии модели (EAGLE-120) кроме передачи параметров на 80 км, температура и горизонтальные компоненты ветра в области высот 80–120 км рассчитывались по модели HAMMONIA, а остальные моделируемые параметры рассчитывались по модели ГСМ ТИП.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе были рассмотрены планетарные и приливные вариации температуры, возникающие в период ВСП-2009. Моделирование охватывало период со 2 по 31 января 2009 г. Стратосферное потепление началось 17 января, прошло максимум 23–24 января и закончилось в феврале. Разворот циркумполярного вихря произошел 22 января. Наблюдения показали [7], что во время этого потепления отмечалось усиление планетарной и приливной волновой активности. Результаты моделирования этой активности в модели EAGLE представлены далее.

### *1) Планетарные волны и приливы в термосферной температуре*

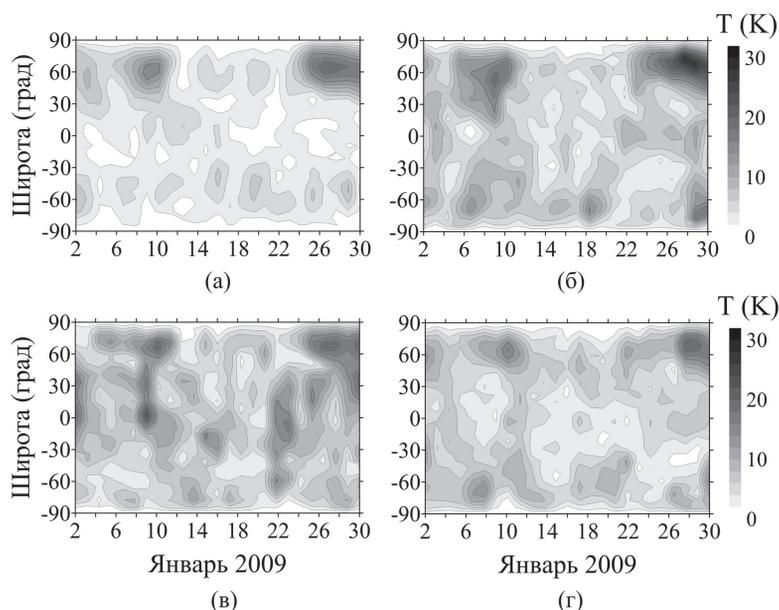
В работе был выполнен анализ спектральной структуры приливных и планетарных вариаций по методике, представленной в [11, 23]. В анализе планетарных вариаций моделируемых па-

раметров были выделены зонально осредненная среднесуточная составляющая (PW0), а также гармоники с зональными волновыми числами  $S = 1, 2$  (обозначенные нами как PW1 и PW2). Анализ спектральной структуры этих гармоник позволяет выделить стационарные и распространяющиеся планетарные волны, однако в представленном исследовании такой анализ не проводился.

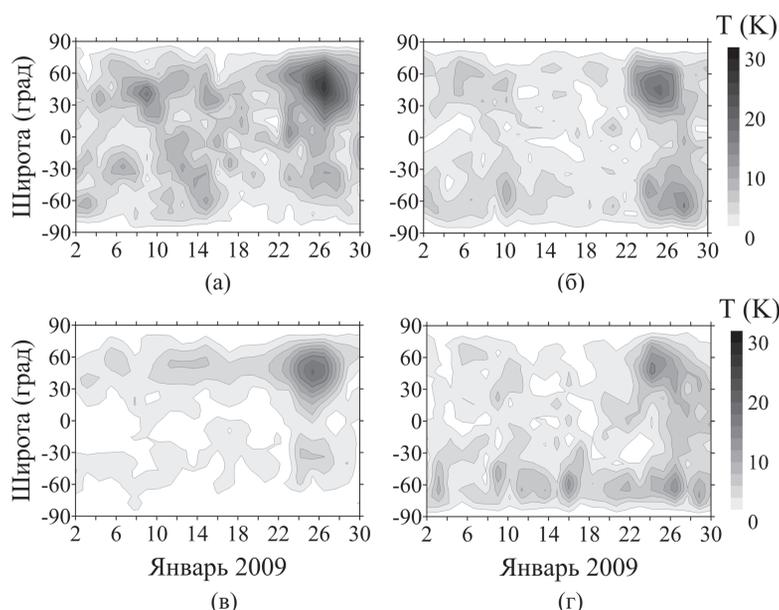
Планетарные вариации в средних и высоких широтах северного полушария имеют четко выраженное усиление в период максимума потепления в обеих версиях модели. Амплитуда PW1 на высоте 103 км больше в EAGLE-120, а на высоте 121 км — больше в версии EAGLE-80. В распределении амплитуды планетарной волны PW2 на высоте 103 км в EAGLE-120 возникает локальный максимум в южном полушарии, который располагается симметрично относительно подобного максимума в северном полушарии (рис. 2б, г). В EAGLE-80 соответствующий максимум отсутствует. Значения амплитуды PW2 в модели EAGLE-120 меньше, чем в модели EAGLE-80 на обеих высотах (103 и 121 км) (рис. 2а, в).

Следует учитывать, что в версии модели EAGLE-120 планетарная волновая активность на высотах 80–120 км обусловлена результатами моделирования в HAMMONIA, в то время как для модели EAGLE-80 волновые процессы в этой области рассчитываются термосферным блоком ГСМ ТИП на основании условий, полученных из HAMMONIA на нижней границе. Результаты расчетов по обеим версиям модели показали усиление активности в нижней термосфере во время и на протяжении нескольких суток после прохождения максимума ВСП 23–24 января. В главную фазу ВСП в модели EAGLE-80 не наблюдается ослабления планетарных волн в области 100–120 км, в то время как в версии EAGLE-120 при увеличении высоты от 100 до 120 км отмечается ослабление планетарных волн. Снижение активности планетарных волн с увеличением высоты отмечалось в наблюдениях и в модельных исследованиях [4, 6, 11, 24]. Таким образом, модель EAGLE-120 качественно лучше описывает динамику планетарных волн в нижней термосфере, отражая снижение амплитуд возмущений с высотой.

Рассмотрим далее приливные вариации нейтральной температуры (рис. 3–5). В широтной структуре суточной солнечно-мигрирующей приливной волны (DW1) можно отметить наличие максимумов в экваториальной области, однако однозначную связь между изменением волновой



**Рис. 1.** Амплитуда планетарной волны с зональным волновым числом 1 (PW1) в температуре на высотах 103 км (а, б) и 121 км (в, г) в моделях EAGLE-80 (а, в) и EAGLE-120 (б, г).

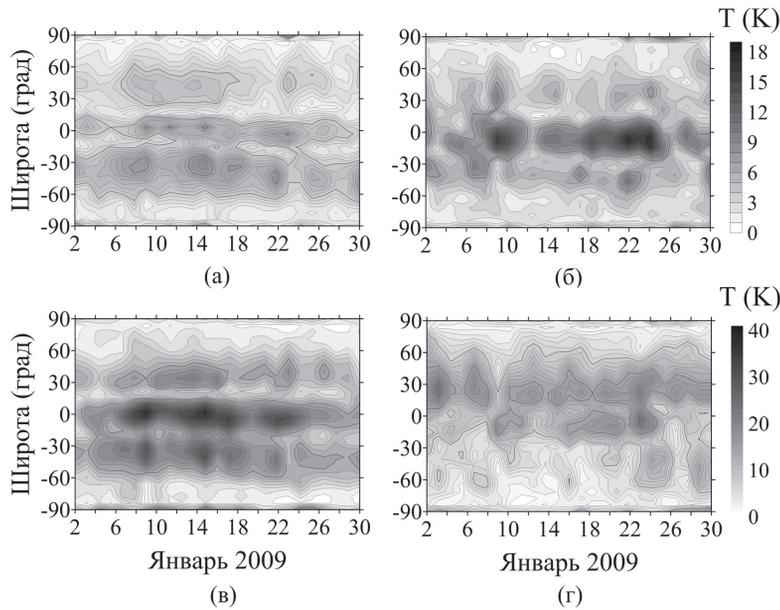


**Рис. 2.** Амплитуда планетарной волны с зональным волновым числом 2 (PW2) в температуре на высотах 103 км (а, б) и 121 км (в, г) в моделях EAGLE-80 (а, в) и EAGLE-120 (б, г).

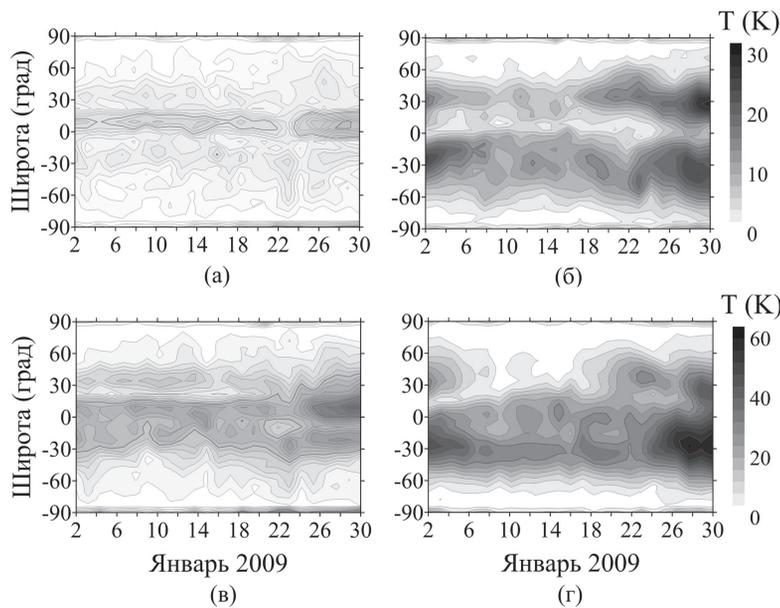
активности и развитием потепления отследить затруднительно. При этом если на высоте 103 км амплитуда DW1 в EAGLE-120 существенно превосходит значения, полученные в EAGLE-80, то на высоте 121 км наблюдается обратная ситуация (рис. 3). Такое снижение амплитуды суточной вариации с высотой и исчезновение выраженной структуры с экваториальным максимумом соответствует данным наблюдений [8].

Модель EAGLE-80 практически не генерирует полусуточную солнечно-мигрирующую

приливную волну (SW2), в то время как в EAGLE-120 она существенно зависит от прохождения потепления. Как на высоте 103 км, так и на высоте 121 км имеются явно выраженные максимумы после 25 января. Значения амплитуды вариации достигают 30 К на высоте 103 км и 60 К на высоте 121 км, что несколько превосходит отмеченные в наблюдениях параметры. В то же время, широтная структура SW2 с двумя симметричными относительно эквато-



**Рис. 3.** Амплитуда суточной солнечно-мигрирующей приливной волны (DW1) в температуре на высотах 103 км (а, б) и 121 км (в, г) в моделях EAGLE-80 (а, в) и EAGLE-120 (б, г).

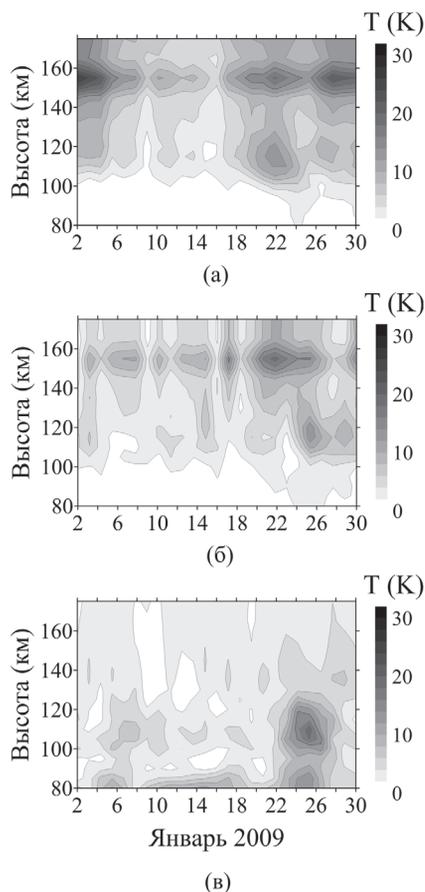


**Рис. 4.** Амплитуда полусуточной солнечно-мигрирующей приливной волны (SW2) в температуре на высотах 103 км (а, б) и 121 км (в, г) в моделях EAGLE-80 (а, в) и EAGLE-120 (б, г).

ра максимумами в низких широтах хорошо согласуется с данными наблюдений [8, 13].

Анализ спектра полусуточных приливных вариаций показал, что в субавроральных и средних широтах значительный вклад вносит немигрирующая волна с зональным волновым числом  $S = 4$  (SW4). Следует отметить, что в широтно-временном распределении этой немигрирующей волны отсутствуют протяженные максимумы, однако в отдельных регионах

ее амплитуда достигает значений, сопоставимых с амплитудой мигрирующей вариации. Вероятным механизмом возникновения этой немигрирующей волны является взаимодействие полусуточной волны SW2 с планетарной волной PW2. Так, на  $60^\circ$  с. ш. в вертикальной структуре SW2 виден локальный максимум в области высот 105–120 км в период с 19 по 24 января, в то время как в немигрирующей волне SW4 аналогичный максимум виден с 24 по 26 января, что



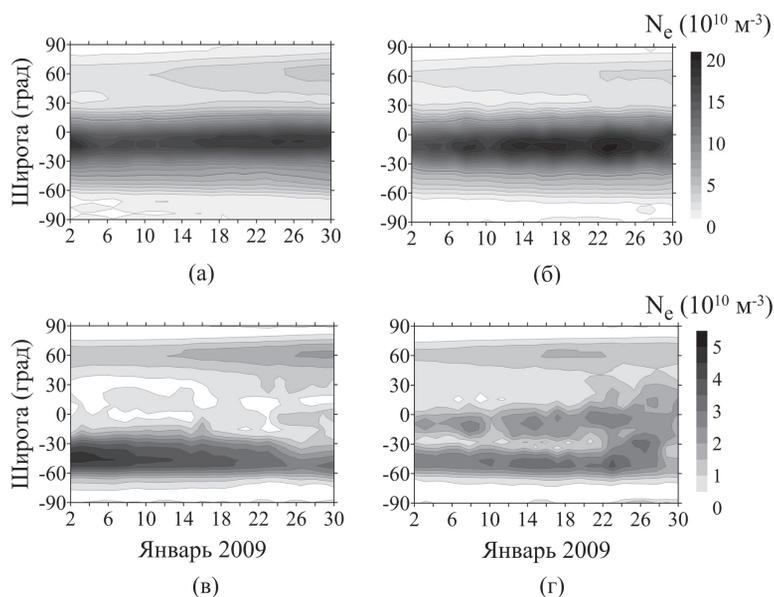
**Рис. 5.** Солнечно-мигрирующая SW2 (а) и немигрирующая SW4 (б) приливные волны и планетарная волна PW2 (в) в температуре для  $60^\circ$  с. ш.

соответствует максимуму PW2 (рис. 5). Вместе с тем, максимумы амплитуды SW4 на высоте  $\sim 150$  км соответствуют максимумам амплитуды в SW2.

## 2) Волновые вариации в электронной концентрации и в зональном электрическом поле

Также нами были рассмотрены изменения солнечно-мигрирующие суточных и полусуточных составляющих вариаций электронной концентрации на высоте 345 км (рис. 6). Атмосферно-ионосферное взаимодействие во время ВСП в последние годы изучается достаточно интенсивно. Особенным случаем является ВСП 2009 г., модельному воспроизведению низкоширотных ионосферных эффектов которого посвящен целый ряд работ [1, 8, 12, 14, 20, 25–27]. Лишь в нескольких работах была сделана попытка выделить приливные составляющие электронной концентрации на основании результатов модельных расчетов [8, 11] и данных наблюдений [4, 8, 28, 29].

Lin et al. [29] показали, что 80% изменений приливных вариаций электронной концентрации в F области ионосферы во время ВСП приходится на солнечно-мигрирующие компоненты. Поэтому в нашей работе мы рассмотрели изменения именно суточных и полусуточных солнечно-мигрирующих компонент вариаций электронной концентрации (рис. 6). Сравнение результатов модели EAGLE-80 и EAGLE-120 не выявляет значительной разницы в изменениях



**Рис. 6.** Суточная (а, б) и полусуточная (в, г) солнечно-мигрирующая приливная вариация электронной концентрации на высоте 345 км в моделях EAGLE-80 (а, в) и EAGLE-120 (б, г).

суточной солнечно-мигрирующей компоненты вариации электронной концентрации. В обоих случаях происходит небольшое увеличение амплитуды DW1 в приэкваториальной области во время главной фазы ВСП (23–24 января). Этот результат отличается от ранее представленных результатов [4, 8, 29], указывающих на незначительное ослабление суточной мигрирующей составляющей вариаций. Можно также отметить повышение амплитуды суточной солнечно-мигрирующей вариации в электронной концентрации в северном полушарии над областью стратосферного потепления, достигающее максимальных значений в период ВСП.

Динамика амплитуды полусуточной компоненты вариаций электронной концентрации существенно различается в разных версиях модели. В EAGLE-80 по мере развития потепления амплитуда вариаций этой компоненты электронной концентрации в южном полушарии на средних широтах плавно убывает, достигая локального минимума 26 января, тогда как в средних широтах северного полушария отмечается повышение амплитуды (рис. 6в). В случае EAGLE-120 имеет место небольшой рост амплитуды приливных компонент вариаций электронной концентрации в южном полушарии, максимум которых достигается также как и в северном полушарии вблизи максимума ВСП. Важно отметить наличие и усиление полусуточной приливной вариации в приэкваториальной области в версии модели EAGLE-120 (рис. 6г). Это говорит о том, что модель EAGLE-120 воспроизводит значительное усиление полусуточной компоненты вариаций электронной концентрации в приэкваториальной области в период ВСП 2009 г., отмечавшееся как в наблюдениях, так и в результатах моделирования [8, 29].

Как было показано [1, 2, 12, 27] основным механизмом формирования значительных низкоширотных ионосферных возмущений во время ВСП 2009 г. является вертикальный ExB дрейф плазмы, приводящий к усилению экваториальной аномалии утром и ее ослаблению после полудня. Лишь в нескольких работах были показаны удачные попытки воспроизвести наблюдающиеся возмущения вертикального ExB дрейфа плазмы над радаром некогерентного рассеяния в Jicamarca в период ВСП 2009 г. [12, 20, 25]. При этом было показано, что во время ВСП 2009 г. привычная суточная вариация ExB дрейфа на экваторе претерпевает значительные изменения: суточный максимум вертикального вверх дрейфа смещает-

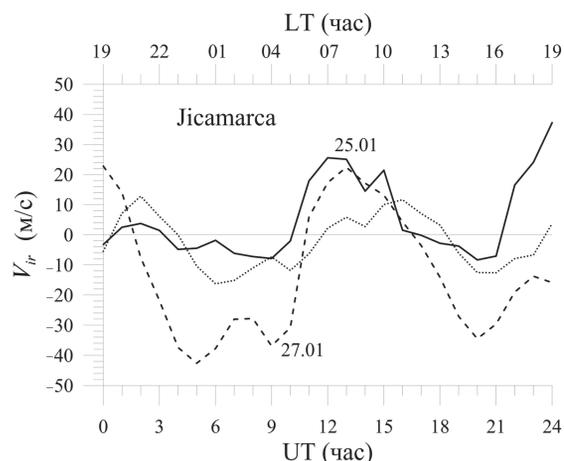
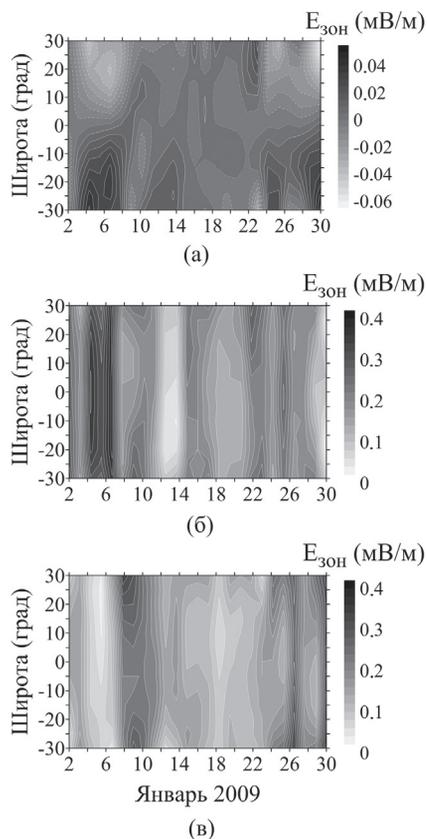


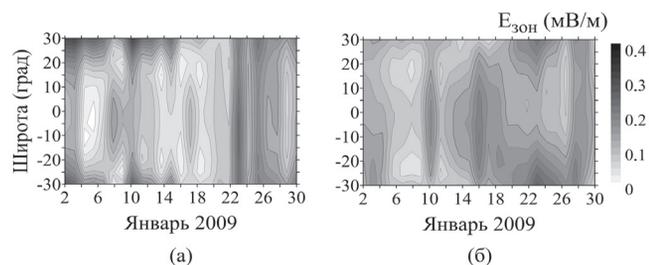
Рис. 7. Поведение вертикальной компоненты скорости электромагнитного дрейфа плазмы  $V_{zr}$  в окрестности геомагнитного экватора над станцией Jicamarca (Peru) ( $12^\circ$  ю. ш.,  $76.9^\circ$  з. д.), рассчитанное в модели EAGLE-120 на высотах F2 слоя ионосферы для спокойных условий в январе 2009 г. (пунктирная кривая) и во время внезапного стратосферного потепления 25 (сплошная кривая) и 27 (штриховая кривая) января 2009 г.

ся в утренний сектор, а максимум вертикального вниз дрейфа наблюдается после полудня.

С применением модели EAGLE-120 удалось воспроизвести фазу и порядок величины возмущений ExB дрейфа над Jicamarca во время ВСП 2009 (рис. 7). В связи с этим была впервые предпринята попытка исследовать приливные и планетарные возмущения зонального электрического поля во время ВСП 2009 г., полученные на основе модели EAGLE-120. Были рассмотрены возмущения планетарных волн в зональном электрическом поле (рис. 8). Значения средне-суточной зонально осредненной составляющей зонального электрического поля (PW0) испытывают небольшие колебания в пределах 0.05 мВ/м и остаются значительно меньше, чем амплитуды гармоник, определяемые планетарными волнами. Имеются небольшие увеличения амплитуды планетарной волны PW1 в период потепления 21–23 и 25–27 января 2009 г., которые, однако, гораздо меньше, чем максимум амплитуды этой волны, формирующейся 4–7 января. Увеличение амплитуды планетарной волны PW2 также отмечается в период ВСП 25–27 января (~0.3 мВ/м), с меньшим по сравнению с основным максимумом этой волны, проявляющегося 8–11 января. Таким образом, выделение эффектов ВСП в планетарных волнах зонального электрического поля является достаточно спорным, хотя все же стоит отметить, что в пе-



**Рис. 8.** Межсуточные вариации планетарных волн с волновыми числами PW0 (а), PW1 (б) и PW2 (в) в зональной компоненте электрического поля, полученные в модели EAGLE-120 на высоте 175 км.



**Рис. 9.** Межсуточные вариации суточной (а) и полусуточной (б) вариаций в зональной компоненте электрического поля, полученные в модели EAGLE-120 на высоте 175 км.

риод 25–27 января амплитуды планетарных PW1 и PW2 имеют максимумы  $\sim 0.2$ – $0.3$  мВ/м.

Межсуточные вариации проявлений суточных и полусуточных приливов в зональном электрическом поле достаточно четко указывают на связанное с ВСП усиление обеих компонент. Так, суточная компонента прилива усиливается в приэкваториальной области во время ВСП в те же дни, что и PW1, то есть 22–24 и 25–27 января 2009 г., на величину  $\sim 0.2$  мВ/м, что сравнимо с планетарными изменениями зонального электрического поля.

Полусуточная приливная компонента зонального электрического поля также усиливается во время ВСП. Это усиление происходит 21–26 января в низких широтах обоих полушарий до  $0.3$  мВ/м, а на экваторе эта приливная компонента усиливается только после 26 января. Следует отметить некую схожесть в поведении суточных и полусуточных компонент прилива в зональном электрическом поле и в нейтральной температуре на высоте 103 км. По величине приливных вариаций в зональном электрическом поле во время ВСП можно сделать вывод, что именно они приводят к значительным возмущениям ионосферного дрейфа вблизи экватора (рис. 9).

## ВЫВОДЫ

В результате проведенного анализа можно утверждать, что модель EAGLE воспроизводит наблюдаемое повышение активности приливных и планетарных вариаций в период ВСП. Хорошо прослеживается связанное с потеплением усиление полусуточной солнечно-мигрирующей вариации температуры, а также возникновение локальных максимумов в планетарных вариациях. В то же время, причины усиления планетарной волны PW2 на средних широтах южного полушария, полученного в модели EAGLE-120, до конца не ясны.

Спектральный анализ приливных вариаций показал существенный вклад в приливную картину немигрирующих волн в нижней термосфере. Вероятным механизмом их усиления является взаимодействие распространяющихся мезосферных приливных и планетарных волн.

Сравнение результатов расчетов в двух версиях модели EAGLE показало, что EAGLE-120 лучше воспроизводит особенности динамики термосферы и ионосферы в периоды ВСП.

В работе показано, что EAGLE-120 воспроизводит изменение суточной вариации вертикального  $E \times B$  дрейфа на экваториальной станции Jicamarca во время ВСП 2009 г. Основными источниками возмущений зонального электрического поля при этом являются суточная и полусуточная компоненты приливных вариаций.

**Источник финансирования.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 17-17-01060.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.-L., Coster A.J.* Unexpected connections between the stratosphere and ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2010a. 37. L10101. doi: 10.1029/2010GL043125
2. *Goncharenko L.P., Coster A.J., Chau J.L., Valadares C.E.* Impact of sudden stratospheric warmings on equatorial ionization anomaly // *J. Geophys. Res.* 2010b. 115. A00G07. doi: 10.1029/2010JA015400
3. *Sridharan et al.* Variabilities of mesospheric tides and equatorial electrojet strength during stratospheric warming events // *Annales Geophysicae.* 2009. 27(11). 4125–4130.
4. *Pancheva D., Mukhtarov P.* Stratospheric warmings: The atmosphere-ionosphere coupling paradigm // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2011. 73(13). 1697–1702. doi: 10.1016/j.jastp.2011.03.006
5. *Chau J.L., Goncharenko L.P., Fejer B.G., Liu, H.-L.* Equatorial and low latitude ionospheric effects during sudden stratospheric warming events // *Space Science Reviews.* 2011. 168. 385–417.
6. *Pancheva D., Miyoshi Y., Mukhtarov P., Jin H., Shinagawa H., Fujiwara H.* Global response of the ionosphere to atmospheric tides forced from below: Comparison between COSMIC measurements and simulations by Atmosphere-Ionosphere Coupled Model GAIA // *J. Geophys. Res.* 2012. 117. A07319. doi: 10.1029/2011JA017452
7. *Kishore P., Velicogna I., Venkat Ratnam M., Jiang J.H., Madhavi G.N.* Planetary waves in the upper stratosphere and lower mesosphere during 2009 Arctic major stratospheric warming // *Ann. Geophys.* 2012. 30. 1529–1538. doi: 10.5194/angeo-30-1529-2012
8. *Jin H., Miyoshi Y., Pancheva D., Mukhtarov P., Fujiwara H., Shinagawa H.* 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. 117. A10323. doi: 10.1029/2012JA017650
9. *Liu H.-L., Wang W., Richmond A.G., Roble R.* Ionospheric variability due to planetary waves and tides for solar minimum conditions // *Journal of Geophysical Research.* 2010. 115. A00G01. doi: 10.1029/2009JA015188
10. *Fuller-Rowell T., Wu F., Akmaev R., Fang T.-W., Araujo-Pradere E.* A whole atmosphere model simulation of the impact of a sudden stratospheric warming on thermosphere dynamics and electrodynamics // *Journal of Geophysical Research.* 2010. 115. A00G08. doi: 10.1029/2010JA015524
11. *Карнов И.В., Бессараб Ф.С., Борчевкина О.П., Артеменко К.А., Клопова А.И.* Моделирование влияния мезосферных ВГВ на планетарные и приливные волны в термосфере и ионосфере во время внезапного стратосферного потепления 2009 г. // *Геомagnetизм и аэрономия.* 2018. Т. 58. № 4. С. 526–539.
12. *Wang H., Akmaev R.A., Fang T.-W., Fuller-Rowell T.J., Wu F., Maruyama N., Iredell M.D.* First forecast of a sudden stratospheric warming with a coupled whole-atmosphere/ionosphere model IDEA // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2014. 119. 2079–2089. doi: 10.1002/2013JA019481
13. *Pedatella N. et al.* Analysis and Hindcast Experiments of the 2009 Sudden Stratospheric Warming in WACCMX+DART // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2018. 123. 3131–3153. doi: 10.1002/2017JA025107
14. *Клименко М.В., Бессараб Ф.С., Суходолов Т.В., Клименко В.В., Кореньков Ю.Н., Захаренкова И.Е., Чурик Н.В., Васильев П.А., Кулямин Д.В., Шмидт Х., Функе Б., Розанов Е.В.* Ионосферные эффекты внезапного стратосферного потепления 2009 года. Результаты расчетов, полученные с использованием первой версии модели EAGLE // *Химическая физика.* 2018. Т. 37. № 7. С. 70–80. doi: 10.1134/S0207401X18070105
15. *Schmidt H., Brasseur G.P., Charron M., Manzini E., Giorgetta M.A., Diehl T., Fomichev V.I., Kinnison D., Marsh D., Walters S.* The HAMMONIA Chemistry climate model: Sensitivity of the mesopause region to the 11-year solar cycle and CO<sub>2</sub> doubling // *J. Climate.* 2006. 16(19). 3903–3931.
16. *Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V. et al.* Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // *Pure and Applied Geophysics (PAGEOPH).* 1988. 127(2/3). P. 219–254.
17. *Korenkov Y.N., Klimenko V.V., Forster M., Bessarab F.S., Surotkin V.A.* Calculated and observed ionospheric parameters for Magion-2 passage above EISCAT on July 31 1990 // *J. Geophys. Res.* 1998. 103(A7). 14697–14710. doi: 10.1029/98JA00210
18. *Kinnison D.E., Brasseur G.P., Walters S. et al.* Sensitivity of chemical tracers to meteorological parameters in the MOZART-3 chemical transport model // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2007. 112. D20. doi: 10.1029/2006JD007879
19. *Meraner K., Schmidt H.* Transport of nitrogen oxides through the winter mesopause in HAMMONIA // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres.* 2016. 121. P. 2556–2570. doi: 10.1002/2015JD024136
20. *Pedatella N.M., Fang T.-W., Jin H., Sassi F., Schmidt H., Chau J. L., Siddiqui T.A., Goncharenko L.* Multimodel comparison of the ionosphere variability during the 2009 sudden stratosphere warming // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2016. 121. 7204–7225. doi: 10.1002/2016JA022859

21. Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В. и др. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. № 4. С. 612–619.
22. Клименко В.В., Клименко М.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли — 1. Постановка задачи // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46. № 4. С. 485–494.
23. Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Клименко М.В. Модельное исследование отклика термосферы на возмущения мезосферных приливов и планетарных волн в период внезапного стратосферного потепления // Химическая физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 49–58.
24. Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Froehlich K., Jacobi Ch. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 69. P. 2083–2101. doi: 10.1016/j.jastp.2007.05.014. 2007
25. Fuller-Rowell T., Wang H., Akmaev R., Wu F., Fang T.-W., Iredell M., Richmond A. Forecasting the dynamic and electrodynamic response to the January 2009 sudden stratospheric warming // Geophys. Res. Lett. 2011. 38. L13102. doi: 10.1029/2011GL047732
26. Bessarab F.S., Korenkov Y.N., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpov I.V., Rатовsky K.G., Chernigovskaya M.A. Modeling the effect of sudden stratospheric warming within the thermosphere-ionosphere system // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2012. 90–91. 77–85. doi: 10.1016/j.jastp.2012.09.005
27. 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. 120. 7873–7888, doi: 10.1002/2014JA020861
28. Pedatella N.M., Forbes J.M. Evidence for stratosphere sudden warming ionosphere coupling due to vertically propagating tides // Geophys. Res. Lett. 2010. 37. L11104. doi: 10.1029/2010GL043560
29. Lin J.T., Lin C.H., Chang L.C., Huang H.H., Liu J.Y., Chen A.B., Chen C.H., Liu C.H. Observational evidence of ionospheric migrating tide modification during the 2009 stratospheric sudden warming // Geophys. Res. Lett. 2012. 39. L02101. doi: 10.1029/2011GL050248

## Tidal and Planetary Waves in the Lower Thermosphere and Ionosphere Simulated with the EAGLE Model for January 2009 Sudden Stratospheric Warming Conditions

P. A. Vasiliev<sup>1,2</sup>, F. S. Bessarab<sup>1,2</sup>, I. V. Karpov<sup>1,2</sup>, V. V. Klimenko<sup>1</sup>, M. V. Klimenko<sup>1</sup>,  
T. V. Sukhodolov<sup>1,3,4</sup>, E. V. Rozanov<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,  
Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences,  
Pionerskyay 61, 236017, Kaliningrad, Russia  
e-mail: bessarabf@gmail.com

<sup>2</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University  
Nevskogo 14, 236016, Kaliningrad, Russia  
e-mail: ivkarpov@inbox.ru

<sup>3</sup>Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, World Radiation Center  
Dorfstrasse 33, 7260, Davos, Switzerland  
e-mail: timofei.sukhodolov@pmodwrc.ch

<sup>4</sup>Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH  
Zurich, Universitätsstrasse 16, 8006 Zürich, Switzerland  
e-mail: eugene.rozanov@pmodwrc.ch

Received: 07.09.2018

Accepted: 07.11.2018

This paper presents the analysis of planetary waves and tidal variability during January 2009 in the mesosphere, thermosphere, and ionosphere simulated with two versions of the EAGLE model. It is shown that sudden stratospheric warming (SSW) occurred in January 2009 leads to an increase in the planetary and tidal wave activity in the lower thermosphere. The features of the solar-migrating and non-migrating components of tidal variations in the thermosphere, ionosphere, and electric fields are considered. The reproduction of the vertical electromagnetic drift during the SSW period over the Jicamarca station is explained by a significant increase in the diurnal and semi-diurnal tidal activity.

**Keywords:** Mesosphere, thermosphere, ionosphere, modeling, electric field, stratospheric warming.