

УДК 550.338.2

РОЛЬ МАГНИТОСФЕРНОЙ КОНВЕКЦИИ И ВЫСЫПАНИЙ В ОБРАЗОВАНИИ “СУМЕРЕЧНОГО ЭФФЕКТА” НА ГЛАВНОЙ ФАЗЕ МАГНИТНОЙ БУРИ

© 2011 г. А. В. Тащилин, Е. Б. Романова

Учреждение РАН Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

e-mail: avt@iszf.irk.ru; ebr@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 11.01.2010 г.

После доработки 30.09.2010 г.

Исследована роль магнитосферных факторов, таких как конвекция и высыпания энергичных электронов в процессе формирования положительных возмущений полного электронного содержания (ПЭС) в условиях летней вечерней ионосферы. Для этого была использована численная модель ионосферы и плазмосферы, в которой временные изменения скорости магнитосферной конвекции и параметров электронных высыпаний соответствовали главной фазе магнитной бури. Показано, что резкое вечернее увеличение ПЭС (сумеречный эффект) возникает в восточном и западном секторах примерно на одинаковых геомагнитных широтах, соответствующих субавроральной зоне, при условии, что внезапное начало бури приходится на утренние часы местного времени. Образование этого пика ПЭС является результатом совместной перестройки картины магнитосферной конвекции и высыпаний энергичных электронов на главной фазе бури. При этом конвекция играет основную роль, вызывая повышение $F2$ -слоя на 40–80 км в область с более низкой скоростью рекомбинации.

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди положительных ионосферных возмущений, которые образуются в средних и авроральных широтах на главной фазе магнитной бури значительный интерес вызывают резкие повышения $NmF2$ и полного электронного содержания в вечерние часы. Эти возрастания электронной концентрации, получившие название “сумеречного эффекта”, наблюдаются обычно в субавроральной и авроральной ионосфере, и поэтому их часто считают результатом перемещения пиков авроральной ионизации в сторону экватора на главной фазе магнитной бури [Mendillo, 2006; Prolls, 1991; Vuonsanto, 1999]. В дальнейшем на основе данных наблюдений на радаре некогерентного рассеяния в Миллстоун-Хилле (американский долготный сектор) были детально описаны вариации основных ионосферных характеристик, присущих данному явлению [Vo and Foster, 2001]. В настоящее время установлено, что “сумеречный эффект” возникает спорадически, главным образом в летних условиях и связан с высоким уровнем геомагнитной активности.

С точки зрения современной аэронамии образование аномального повышения электронной концентрации в вечерней ионосфере может быть обусловлено действием трех основных факторов – во-первых, совместной перестройкой картины магнитосферной конвекции и высыпаний энергичных электронов, во-вторых, дополнительным подъемом $F2$ -слоя ионосферы под действием усиленного тер-

мосферного ветра, дующего к экватору и, в-третьих, распространением в сторону низких широт крупномасштабных атмосферных волн, приводящих к быстрым изменениям термосферного состава.

Таким образом, для изучения процесса образования “сумеречного эффекта” необходимо решить задачу о моделировании отклика ионосферы на магнитную бурю с учетом всех отмеченных факторов. Целью предложенной работы является исследование роли магнитосферных факторов, таких как конвекция и высыпания энергичных электронов, в процессе формирования положительных возмущений в условиях летней вечерней ионосферы.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Для изучения механизма формирования “сумеречного эффекта” были выполнены модельные расчеты суточных вариаций ионосферных параметров над восьмью пунктами с географическими широтами 40° , 50° , 60° и $70^\circ N$, расположенными в американском ($70^\circ W$) и азиатском ($110^\circ E$) долготных секторах. Такой выбор пунктов моделирования позволяет учитывать в задаче эффекты, связанные с несовпадением географического и геомагнитного полюсов. Расчеты выполнялись для спокойного и геомагнитно – возмущенного периодов, соответствующих условиям летнего солнцестояния и среднему уровню солнечной активности ($F10.7 = 120$). В качестве полного электронного содержания была

принята величина N_T , равная электронному содержанию вдоль силовой линии, основание которой находится в одном из рассматриваемых пунктов, в интервале высот от 120 до 1000 км, т.е. $N_T = \int_{120 \text{ км}}^{1000 \text{ км}} n_e(s) ds$.

Принятая нами модель магнитной бури представлена на рис. 1 в виде временных вариаций B_z составляющей ММП и индексов геомагнитной активности K_p , Dst . Чтобы учесть влияние момента начала магнитной бури по местному времени на реакцию ионосферы на различных широтах и долготах были рассмотрены два сценария магнитной бури с различными началами геомагнитного возмущения (SC): первый соответствовал внезапному началу бури в 03 UT, а для второго принято $SC = 15$ UT.

Расчеты вариаций ионосферных параметров в плазменной трубке выполнялись с использованием разработанной в ИСЗФ СО РАН модели ионосферно-плазмосферного взаимодействия, учитывающей дрейф плазмы поперек геомагнитных силовых линий [Tashchilin and Romanova, 2002]. Эта модель основана на численном решении системы нестационарных уравнений баланса частиц и энергии тепловой плазмы в дрейфующих плазменных трубках дипольного типа, основания которых расположены на высоте 120 км. Полагается, что плазма состоит из атомарных (O^+ , H^+) и молекулярных ионов N_2^+ , O_2^+ , NO^+ , которые рассматриваются как один ион с эффективной массой 30 а.е.м. Концентрации всех ионов рассчитывались с учетом процессов фотоионизации, рекомбинации и переноса вдоль геомагнитных силовых линий под действием амбиполярной диффузии и увлечения ионов горизонтальным нейтральным ветром. Для расчета скоростей фотоионизации термосферных составляющих и энергетических спектров первичных фотоэлектронов использован справочный спектр УФ-излучения Солнца из работы [Richards et al., 1994]. Температуры электронов и ионов рассчитывались с учетом процессов теплопроводности вдоль геомагнитных силовых линий и обмена тепловой энергией между электронами, ионами и нейтральными частицами вследствие упругих и неупругих столкновений. Скорость нагрева тепловых электронов рассчитывалась согласованно, путем решения кинетического уравнения переноса фотоэлектронов в сопряженных ионосферах, учитывая потери энергии фотоэлектронами при прохождении через плазмосферу.

Все плазменные трубки в модели рассматриваются как замкнутые или разомкнутые (открытые). Критерием такого деления служит факт нахождения основания трубки внутри полярной шапки. Если силовая линия, проходящая через плазменную трубку, лежит вне полярной шапки, т.е. в области авроральной ионосферы или плазмосферы, то трубка является замкнутой. В противном случае, когда силовая линия выходит из области полярной шапки и уходит в хвост магнитосферы, трубка рассматрива-

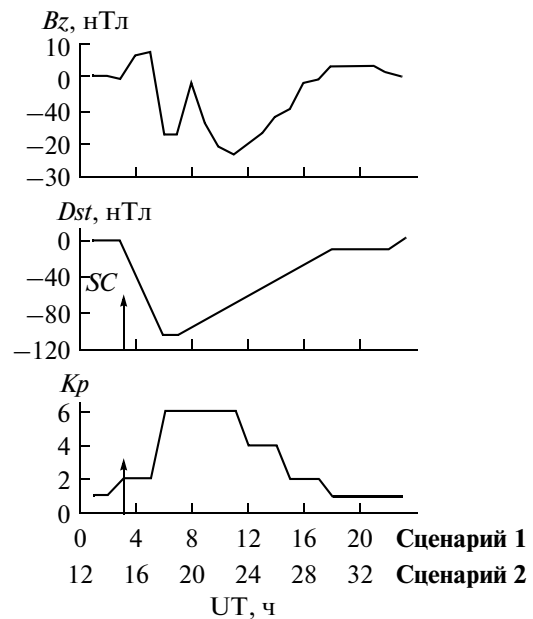


Рис. 1. Вариации индексов K_p , Dst и B_z -компоненты межпланетного магнитного поля. Сценарий 1 соответствует буре с внезапным началом (SC) в 03:00 UT. Сценарий 2 – с SC в 15:00 UT.

ется как открытая. В качестве граничных условий для замкнутых трубок принято условие равенства нулю потоков частиц и энергии через основания трубки ($h = 120$ км). Для открытых трубок на верхней границе, которая задавалась на расстоянии нескольких радиусов Земли, принималось условие ухода заряженных частиц из силовой трубки в магнитосферу через открытое сечение, т.е. полагалось, что $n_i(t, r_{\max}) = 0$. Для уравнений теплового баланса на верхней границе задавался нулевой приток тепла из магнитосферы. В данной модели расчеты начинаются с некоторых произвольных начальных условий, соответствующих низкому содержанию плазмы в трубке с целью учета процесса заполнения плазмосферы из нижележащей ионосферы. В этом случае начальные условия следует задавать на удалении от 5 до 10 суток от рассматриваемого момента времени в виде слабой заполненности трубок плазмой, температура которой равна температуре нейтралов.

Для описания пространственно-временных вариаций температуры и концентраций нейтральных компонентов O , O_2 , N_2 , H и N использовалась глобальная эмпирическая модель термосферы MSIS-86 [Hedin, 1987], а скорости горизонтального термосферного ветра определялись согласно эмпирической модели HWM-93 [Hedin et al., 1996]. Значения интегрального потока и средней энергии высыпавшихся электронов, необходимые для расчета скоростей авроральной ионизации, взяты в соответствие с глобальной моделью электронных высыпаний [Hagduy et al., 1987]. Электрическое поле магнитосферной

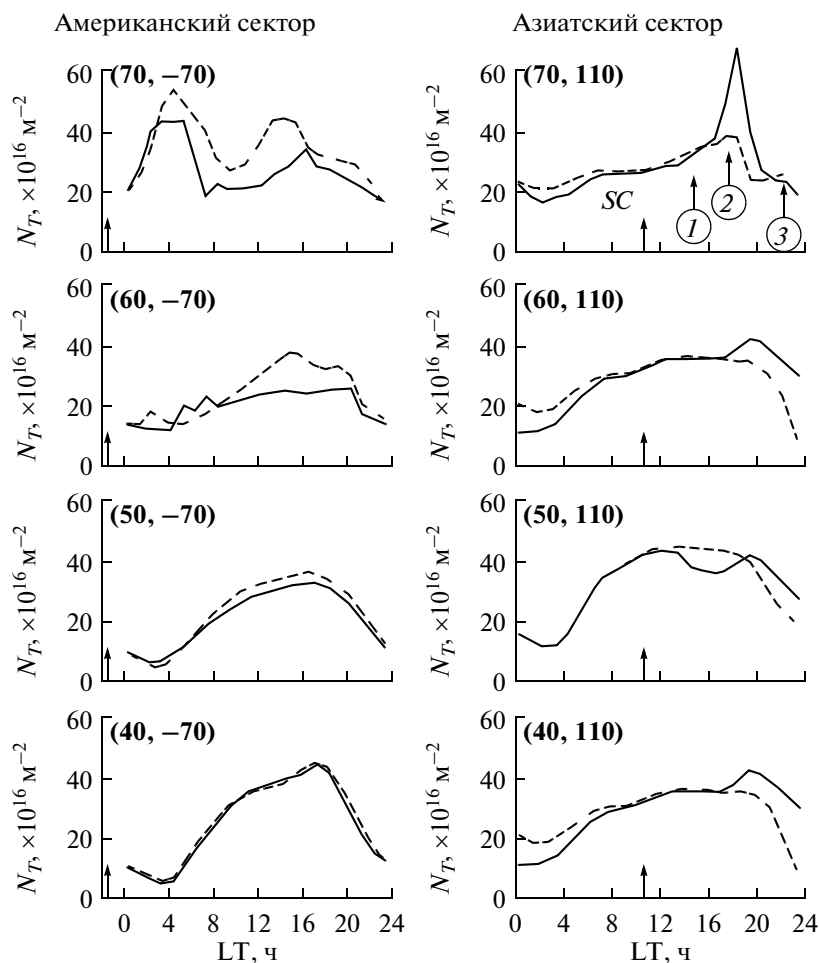


Рис. 2. Вариации полного электронного содержания для бури по сценарию *I*: штриховой линией показаны вариации N_T в спокойный день, толстой линией – вариации N_T во время бури, стрелкой отмечено внезапное начало бури.

конвекции рассчитывалось в соответствии с эмпирической моделью распределения потенциала магнитосферной конвекции на высотах ионосферы [Sojka et al., 1986].

Общий алгоритм решения модельных уравнений состоит из двух этапов. На первом этапе для моделируемого интервала времени рассчитываются траектории дрейфа путем интегрирования уравнений движения плазменной трубки назад во времени от заданного момента UT , при котором также задано положение основания трубки в северном полушарии, до некоторого начального момента UT_0 . При этом изменения со временем электрического поля конвекции, характеристик высыпаний, параметров нейтральной атмосферы и термосферного ветра учитываются через заданные вариации часовых значений индексов геомагнитной активности и параметров ММП (см. рис. 1). На втором этапе уравнения ионосферной модели интегрируются в прямом направлении по времени (от UT_0 до UT) вдоль рассчитанной траектории дрейфа. Интервал времени

моделирования задавался равным 7-ми расчетным суткам с шагом интегрирования 3 мин.

Для получения вариаций полного электронного содержания над каждым пунктом рассчитывались по 24 траектории дрейфа для спокойных и возмущенных условий.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов полного электронного содержания N_T по первому и второму сценариям представлены на рисунках 2 и 3, соответственно. Штриховой линией показаны вариации полного электронного содержания в спокойный день, толстой линией представлены вариации N_T во время бури, стрелкой отмечено внезапное начало бури. Для бури с $SC = 03$ UT аномальное повышение N_T в вечерней ионосфере возникает только в азиатском секторе ($70^\circ N, 110^\circ E$), а для бури с $SC = 15$ UT сумеречный эффект образуется также только в одном пункте, но расположенном в зоне американского

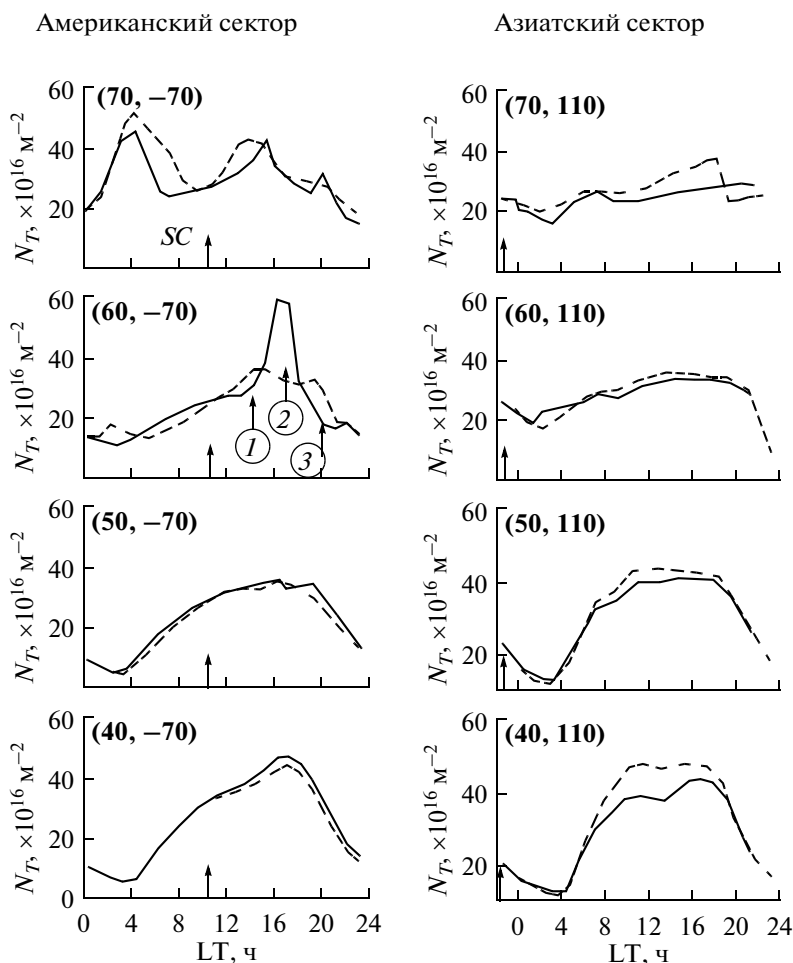


Рис. 3. Вариации полного электронного содержания для бури по сценарию 2: штриховой линией показаны вариации N_T в спокойный день, толстой линией – вариации N_T во время бури, стрелкой отмечено внезапное начало бури.

сектора (60°N , 70°W). Эти пункты характеризуются тем, что для них внезапное начало бури происходит в утренние часы, т. е. около 10:20 LT, и они расположены в зоне перехода от субавроральных к авроральным широтам как в американском, так и в азиатском долготных секторах (геомагнитные широты равны 64.3° и 64.7° , соответственно).

Рассмотрим условия, при которых формируются аномальные повышения N_T в вечерней субавроральной ионосфере каждого долготного сектора. С этой целью на рисунках 4 и 5 представлены временные вариации параметров максимума F_2 -слоя (электронная концентрация NmF_2 и высота H_{max}), потока высыпающихся электронов (P), вертикальные проекции скоростей электромагнитного дрейфа (W_{con}) и термосферного ветра (W_{wind}) на высоте 300 км. Эти графики представляют временные изменения указанных параметров в двух дрейфующих плазменных трубках, которые двигаясь вдоль траекторий дрейфа приходят в данный пункт американского и азиатского секторов в моменты времени, отмеченные на

рисунках 2 и 3 стрелками и цифрами в кружках. Сами траектории дрейфа для каждого момента времени приведены в нижней части рисунков 4 и 5. Вертикальной штриховкой обозначены неосвещенные интервалы времени. Рассмотрим отдельно реакцию ионосферы на развитие бури по сценариям 1 и 2.

Сценарий 1. В этом случае буря начинается в момент $SC = 03:00$ UT, а вечерний пик N_T появляется в 18:20 LT (11:00 UT) в азиатском секторе над пунктом 70°N , 110°E (см. рис. 3). Чтобы понять особенности формирования вечернего пика дополнительно рассмотрим ионосферные условия в этом пункте в предшествующий момент времени 15:20 LT (08:00 UT) и в последующий 22:20 LT (15:00 UT), когда пик полностью исчез (эти моменты обозначены на рис. 2 и 4 цифрами 1, 2 и 3 соответственно). Как следует из рис. 4 (1), над пунктом (70°N , 110°E) в предшествующий момент 15:20 LT проходит трубка, плазма в которой образована в результате действия фотоионизации (почти вся предшествующая часть траектории расположена в освещенной зоне). При этом воз-

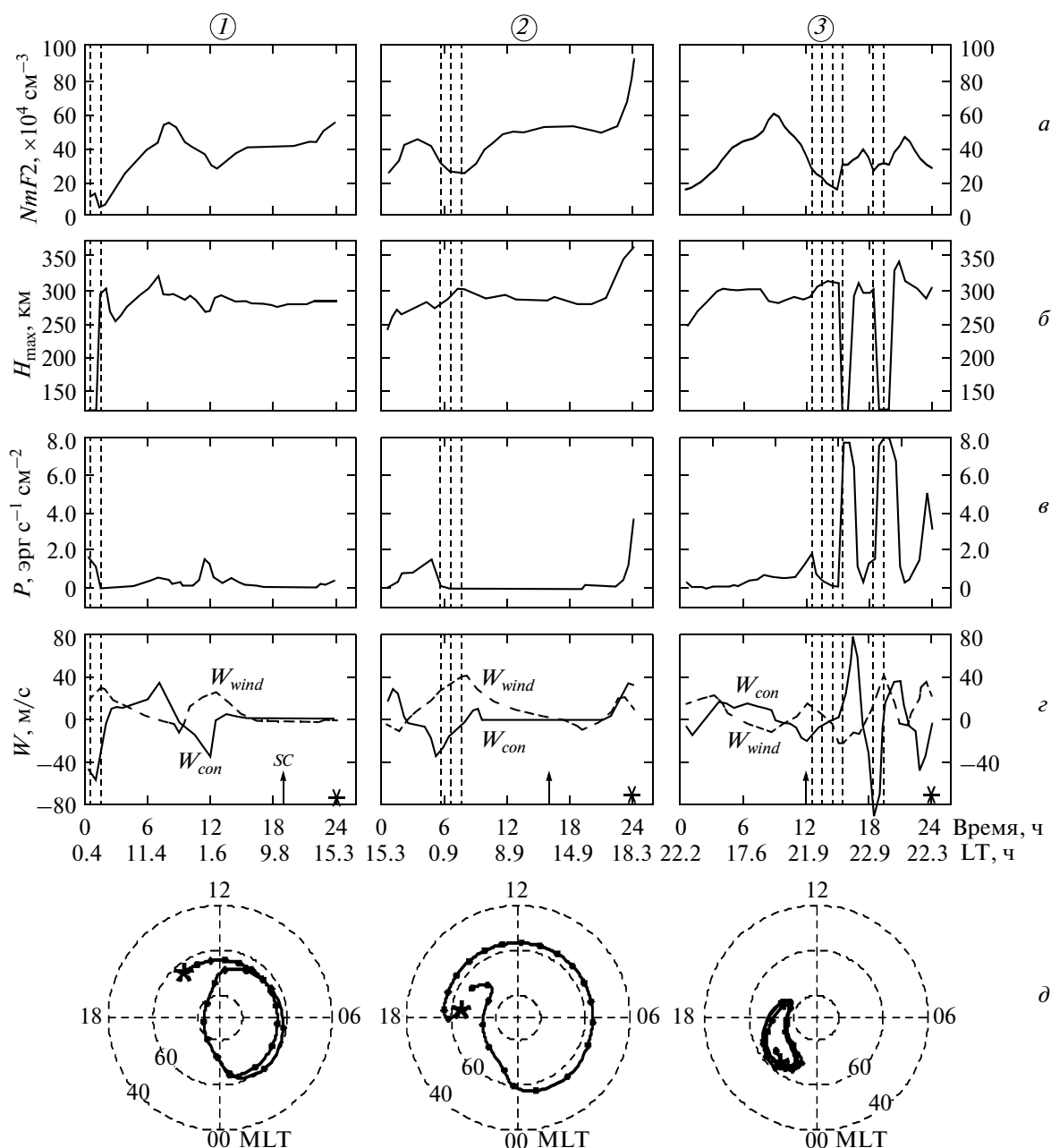


Рис. 4. Изменения ионосферных параметров вдоль траектории плазменных трубок, проходящих над пунктом (70, 110) в моменты времени 15:20 LT (08:00 UT), 18:20 LT (11:00 UT), 22:20 LT (15:00 UT) во время бури по сценарию 1 (SC в 03:00 UT), эти моменты времени отмечены на рис. 2 стрелками и цифрами в кружках: 1, 2, 3 соответственно. а – электронная концентрация в максимуме F2-слоя; б – высота максимума F2-слоя; в – поток энергии высыпавшихся электронов; г – вертикальные проекции скорости электромагнитного дрейфа W_{con} (непрерывная линия) и скорости термосферного ветра на высоте 300 км W_{wind} (штриховая линия); д – траектории дрейфа плазменных трубок в координатах геомагнитная широта-MLT, кружки – часовые метки, соответствуют оси “Время” на рисунках а, б, в, г, звездочка – положение пункта (70, 110) в рассматриваемые моменты времени. Штриховкой обозначены неосвещенные интервалы времени.

действия со стороны термосферного ветра и магнитосферной конвекции проявляются только в первые 12 часов вдоль траектории, вызывая увеличение или уменьшение $NmF2$ совместно с повышением или понижением F2-слоя. Воздействие высыпаний так же незначительно в этот период.

В 18:20 LT над этим пунктом проходит трубка с иной предысторией. Как показано на рис. 4 (2), в этой дрейфующей трубке профиль электронной концентрации сформировался в результате совместного действия фотоионизации и корпускулярной ионизации, а также под действием вертикального

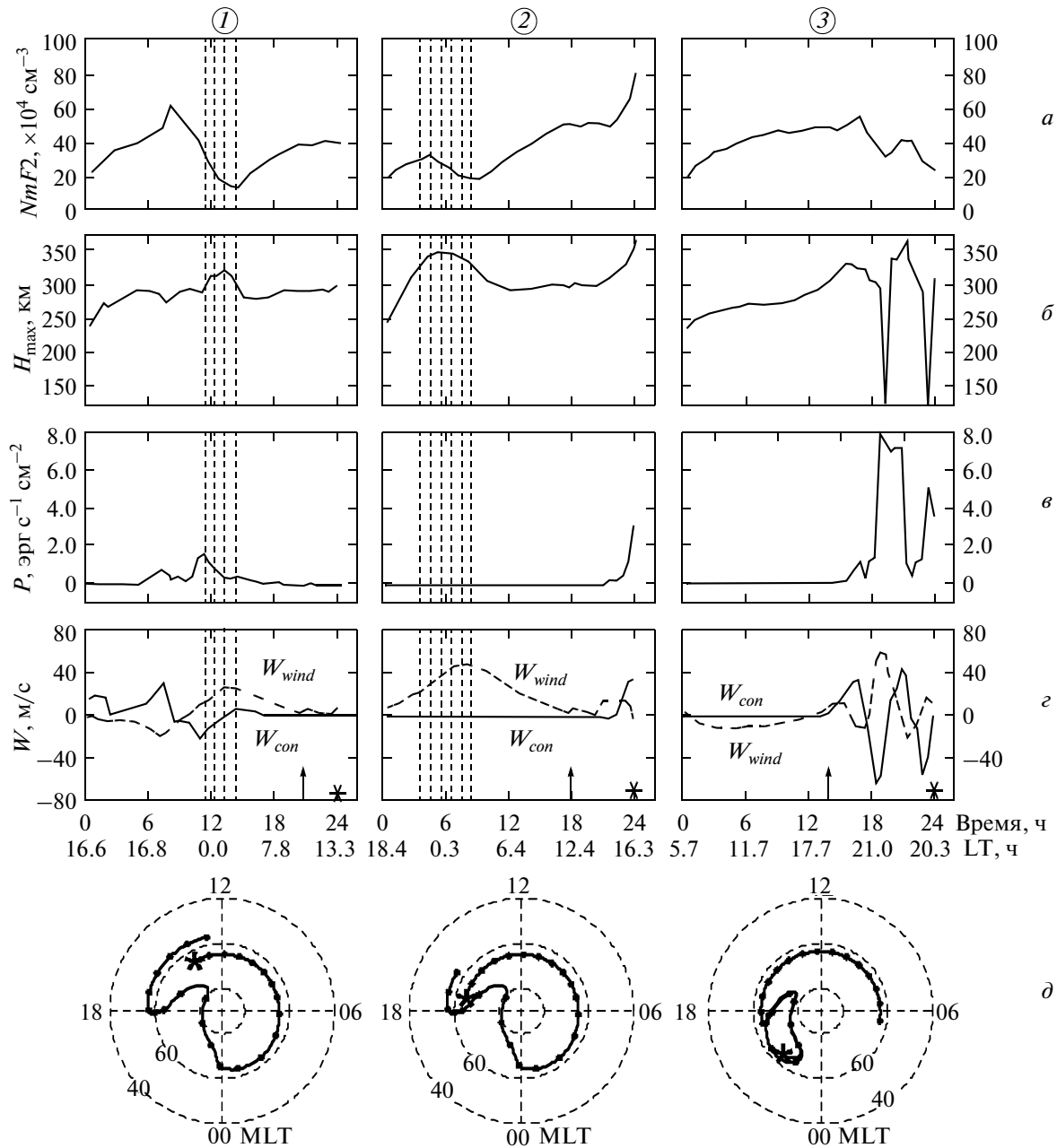


Рис. 5. Изменения ионосферных параметров вдоль траектории плазменных трубок, проходящих над пунктом (60, -70) в моменты времени 13:20 LT (18:00 UT), 16:20 LT (21:00 UT), 20:20 LT (01:00 UT) во время бури по сценарию 2 (SC в 15:00 UT), эти моменты времени отмечены на рис. 3 стрелками и цифрами в кружках: 1, 2, 3 соответственно. *a* – электронная концентрация в максимуме F2-слоя; *b* – высота максимума F2-слоя; *v* – поток энергии высыпающих электронов; *z* – вертикальные проекции скорости электромагнитного дрейфа W_{con} (непрерывная линия) и скорости термосферного ветра на высоте 300 км W_{wind} (штриховая линия); *d* – траектории дрейфа плазменных трубок в координатах геомагнитная широта-MLT, кружки – часовые метки, соответствуют оси “Время” на рисунках *a, б, в, z*, звездочка – положение пункта (60, -70) в рассматриваемые моменты времени. Штриховкой обозначены неосвещенные интервалы времени.

дрейфа, скорость которого в течение трех последних часов была направлена вверх (положительна на рис. 4e) и достигла величины ~40 м/с ($W_{con} = 31$ м/с, $W_{wind} = 9$ м/с). В результате максимум F2 слоя под-

нялся на 83 км (рис. 4б(2)) в область с более низкой скоростью рекомбинации, что явилось причиной увеличения $NmF2$ почти в два раза (от 4.9×10^5 см⁻³ до 9.1×10^5 см⁻³).

Для момента исчезновения сумеречного эффекта (22:20 LT) на рис. 4д(3) видно, что траектория дрейфа плазменной трубки располагается в узкой широтной зоне между 60° и 80° геомагнитной широты вечернего сектора. Следовательно, трубка, проходящая над этим пунктом в 22:20 LT в течение четырех предшествующих часов находилась в неосвещенной зоне (заштрихованная область на рис. 4 (3)). При этом она два раза пересекала расширившийся во время главной фазы бури авроральный овал, попадая в зону усиленной магнитосферной конвекции. Прохождение через авроральный овал сопровождалось значительным увеличением функции ионообразования на высотах $h < 150$ км за счет ударной ионизации молекулярных составляющих термосферы. При этом высота максимума $F2$ -слоя опускалась ниже 150 км. Эти факторы вызвали колебания максимальной концентрации электронов в F -области. Кроме того, в течение трех часов до 22:20 LT на плазму в дрейфующей трубке действовал вертикальный дрейф, направленный вниз, что вызвало снижение H_{\max} на 40 км и понижение $NmF2$ до $3 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, несмотря на то, что поток высыпавшихся электронов был таким же, как в 18:20 LT.

Сценарий 2. В случае, когда буря развивается по сценарию 2 (SC в 15:00 UT), вечерний пик N_T появляется в 16:20 LT (21:00 UT) в американском секторе над пунктом (60°N , 70°W). На рисунке 5 приведены такие же вариации параметров для плазменных трубок, проходящих над этим пунктом в моменты времени 13:20 LT (18:00 UT), 16:20 LT (21:00 UT) и 20:20 LT (01:00 UT). В этой ситуации плазма в дрейфующих трубках формируется аналогичным образом и вечерний пик $NmF2$ также образуется в результате действия вертикального дрейфа ($W_{\text{con}} = 37$ м/с, $W_{\text{wind}} = -0.9$ м/с) и высыпаний энергичных электронов. Таким образом, основную роль в формировании вечернего пика ионизации играет магнитосферная конвекция.

4. ВЫВОДЫ

Анализ результатов численного моделирования процессов формирования положительных возмущений в условиях летней вечерней ионосферы на главной фазе бури позволил выделить следующие закономерности:

Вечерний пик электронной концентрации (“сумеречный эффект”) появляется в восточном и

западном секторах примерно на одинаковых геомагнитных широтах, примыкающих к экваториальной границе авроральной зоны, когда внезапное начало бури приходится на утренние часы местного времени.

Образование этого пика обусловлено действием двух основных факторов: совместной перестройкой картины магнитосферной конвекции и высыпаний энергичных электронов, причем конвекция играет основную роль, вызывая повышение $F2$ -слоя на 40–80 км в область с более низкой скоростью рекомбинации.

Термосферный ветер не оказывает заметного влияния на формирование вечернего пика ионизации на субавроральных широтах.

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-05-00950).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Buonsanto M.J., Ionospheric storms – a review // Space Sci. Rev. V. 88. P. 563–601. 1999.
- Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Raistrick R., et al. Statistical and functional representation of the pattern of auroral energy flux, number flux, and conductivity // J. Geophys. Res. V. 92. P. 12275–12294. 1987.
- Hedin A.E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geophys. Res. V. 92. № 5. P. 4649–4662. 1987.
- Hedin A.E., et al. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere // J. Atmos. Terr. Phys. V. 58. № 13. P. 1421–1447. 1996.
- Mendillo M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content. // Rev. Geophys. V. 44. RG4001. doi:10.1029/2005RG000193. 2006.
- Prohls G.W., et al. Ionospheric storm effects at subauroral latitudes: a case study // J. Geophys. Res. V. 96. № 2. P. 1275–1288. 1991.
- Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations // J. Geophys. Res. V. 99. P. 8981–8992. 1994.
- Sojka J.J., Rasmussen C.E., Schunk R.W. An interplanetary magnetic field dependent model of the ionospheric convection electric field // J. Geophys. Res. V. 91. P. 11281–11290. 1986.
- Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling the high-latitude ionosphere // Proceeding of COSPAR Colloquia Series. V. 14. P. 315–325. 2002.
- Vo H.B., Foster J.C. Quantitative investigation of ionospheric density gradients at mid latitudes // J. Geophys. Res. V. 106. P. 21555–21563. 2001.