

УДК 550.510.535

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ ВОЗМУЩЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В МАКСИМУМЕ F_2 -СЛОЯ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ СУПЕРБУРИ 15 ИЮЛЯ 2000 г.

© 2011 г. В. П. Ким¹, К. В. Мин², В. В. Хегай¹, Дж. Дж. Ли³

¹ Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова,
г. Троицк, (Московская обл.), Россия

² Корейский институт передовой науки и технологии (KAIST), г. Тэджон, Республика Корея

³ Корейский институт астрономии и космических исследований (KASI), г. Тэджон, Республика Корея
e-mail: hegai@izmiran.rssi.ru

Поступила в редакцию 21.05.2009 г.

После доработки 12.11.2009 г.

На основе данных станций наземного зондирования ионосферы исследованы морфологические особенности картины возмущений электронной концентрации в максимуме среднеширотного F_2 -слоя (NmF_2) в период магнитной супербури, которая началась 15 июля 2000 г. В южном (зимнем) полушарии в долготном секторе, в котором главная фаза бури началась после восхода, для достаточно больших значений средних широт днем и ночью наблюдались отрицательные возмущения NmF_2 , тогда как на меньших средних широтах имели место большие положительные возмущения в ночные часы. В северном (летнем) полушарии на долготах, для которых начало главной фазы бури пришлось на местный вечер, в дневные и ночные часы наблюдались только продолжительные отрицательные возмущения, а на тех долготах, где главная фаза бури началась после полудня, величина NmF_2 испытывала как отрицательные, так и положительные возмущения. На основе анализа данных спутников KOMPSAT-1, ROCKAT-1, DMSP F13, F14 и F15 представлено наглядное подтверждение точки зрения, представленной в ряде работ различных авторов, что именно усиление восточного электрического поля в вечернем секторе привело к формированию крупномасштабного провала в ночной низкоширотной верхней ионосфере. Усиление поля обусловлено проникновением в низкие широты магнитосферного электрического поля, а не динамо-действием возмущенного нейтрального ветра. Показано также, что расширение системы магнитосферной конвекции к экватору во время главной фазы бури привело к смещению плазмопаузы и главного ионосферного провала до магнитной широты 40° ($L \sim 1.7$).

1. ВВЕДЕНИЕ

Во время магнитных бурь электронная концентрация в максимуме среднеширотного F_2 -слоя (NmF_2) может значительно возрастать (положительное возмущение) или уменьшаться (отрицательное возмущение) относительно своих значений в магнито-спокойные дни. Этой проблематике посвящены многочисленные публикации, результаты которых суммированы в целом ряде обзоров [Rishbeth, 1993; Prolss, 1995; Vuonsanto, 1999; Mikhailov, 2000; Danilov, 2001]. В работе [Danilov and Laštovička, 2000] дан обзор различных эффектов магнитных бурь в атмосферно-ионосферной системе на различных высотах от тропосферы до уровня F_2 -слоя. Согласно сложившимся представлениям, отрицательные возмущения NmF_2 в основном обусловлены изменениями нейтрального состава, при которых возрастает относительное содержание молекулярных

составляющих N_2 и O_2 , т.е. уменьшается отношение $[O]/([N_2] + [O_2])$. Положительные возмущения NmF_2 в дневных условиях могут вызываться различными причинами, такими как: перемещающиеся атмосферные возмущения, представляющие из себя локализованные волновые пакеты нейтрального ветра, распространяющиеся от авроральных широт к экватору; изменения нейтрального состава, обусловленные меридиональной циркуляцией нейтральной атмосферы; вертикальные дрейфы плазмы, вызываемые электрическими полями. В ночных условиях положительные возмущения могут быть связаны с вертикальными перемещениями плазмы за счет меридионального ветра и электрического поля, а также с усилением потока плазмы из плазмосферы.

Особый интерес представляет реакция ионосферы на очень сильные магнитные бури, так называемые супербури, когда минимальное значение

Dst-индекса достигает -250 нТл и менее. Магнитные супербури вызывают сильные возмущения в ионосферно-термосферной системе в глобальном масштабе [Batista et al., 1991; Yeh et al., 1994; Szuszczewich et al., 1998; Kill et al., 2003; Mansilla, 2004; Crowley et al., 2006; Abdu et al., 2008; Basu et al., 2007; Maruyama and Nakamura, 2007]. Каждая магнитная супербурия имеет свои важные индивидуальные особенности в порождаемой ею картине ионосферных возмущений и поэтому требует отдельного изучения. Подавляющее большинство магнитных супербурь приходится на равноденственный сезон, поэтому ионосферные проявления супербури, которая произошла в сезон июньского солнцестояния, начавшись 15 июля 2000 г., заслуживают особо детального исследования. Эта магнитная буря является одной из самых сильных, когда-либо зарегистрированных в сезон июньского солнцестояния. Ионосферные эффекты данной супербури изучались в ряде работ [Basu et al., 2001; Shpynev et al., 2001; Lee et al., 2002; Sastri et al., 2002; Vlasov et al., 2003; Kill et al., 2003; Zhang et al., 2003; Lin and Yeh, 2005; Kill and Paxton, 2006], в которых было продемонстрировано, что ионосфера испытала в период бури глубокие структурные изменения. В ночной низкоширотной верхней ионосфере наблюдался крупномасштабный провал в горизонтальном распределении концентрации плазмы более, чем на два порядка величины [Basu et al., 2001; Lee et al., 2002; Lin and Yeh, 2005]. Наряду с этим в северном полушарии вблизи вечернего терминатора было зарегистрировано большое увеличение полного содержания электронов N_T простиравшееся от низких широт до авроральных [Vlasov et al., 2003; Foster and Coster, 2007]. Глобальная картина возмущения N_T характеризовалась четко выраженной сезонной асимметрией, заключавшейся в значительном в целом уменьшении N_T летнем (северном) полушарии и заметном увеличении N_T в зимнем (южном) полушарии [Kill et al., 2003].

Реакция среднеширотной ионосферы на супербурю 15 июля 2000 г. анализировалась преимущественно на основе данных спутниковых измерений полного содержания электронов и параметров верхней ионосферы, тогда как обсуждение вариаций $NmF2$ носило фрагментарный и краткий характер [Kill et al., 2003; Zhang et al., 2003; Kill and Paxton, 2006]. В то же время изучение поведения $NmF2$ представляет собой самостоятельный интерес. Целью данной работы является детальное рассмотрение особенностей глобальной морфологической картины возмущений $NmF2$ на средних широтах во время магнитной супербури 15 июля 2000 г. в различных регионах мира. Обсуждается роль магнитосферного электрического поля в модификации структуры ионосферы.

2. ИОНОСФЕРНЫЕ ДАННЫЕ И ГЕОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА

Для анализа вариаций $NmF2$ были использованы данные 20-ти наземных ионосферных станций вертикального зондирования, расположенных в различных регионах земного шара. Названия станций и их координаты приведены в таблице.

Обычно при изучении ионосферных возмущений в слое $F2$ за уровень отсчета принимается медиана $foF2_{\text{мед}}$ (например, месячная) критической частоты $foF2$ (МГц), а отклонения от нее ($\delta foF2 = [foF2_{\text{измеренное}} - foF2_{\text{мед}}]/foF2_{\text{мед}}$), рассматриваются как возмущения (см., например, [Danilov and Lastovička, 2001]). Так как критическая частота $foF2$ и величина главного максимума электронной концентрации $NmF2$ (см^{-3}) связаны формулой $NmF2 = 1.24 \times 10^4 (foF2)^2$, то соответствующая относительная величина $\delta NmF2 = [foF2_{\text{измеряемое}}^2 - foF2_{\text{мед}}^2]/foF2_{\text{мед}}^2$ будет характеризовать изменения $NmF2$.

В данной работе для более наглядного выделения положительных и отрицательных возмущений $NmF2$, обусловленных бурей, используется несколько иной способ. Изменения $NmF2$ отсчитываются относительно своего среднего значения для каждого часа суток по магнито-спокойным дням ($NmF2_q$). При этом в качестве магнито-спокойных дней были выбраны те дни в июле 2000 г., в течение которых индекс магнитной активности Kp не превышал значения 2. Положительным возмущением будем считать такое отклонение $NmF2$ от отсчетного уровня $NmF2_q$, при котором $NmF2$ превышает $NmF2_q$ больше, чем на удвоенное значение стандартного отклонения, т.е. $NmF2 > NmF2_q + 2d$ (d – стандартное отклонение). Соответственно под отрицательным возмущением будем понимать отклонение $NmF2$, при котором $NmF2$ становится меньше $NmF2_q$ на величину, превышающую удвоенное стандартное отклонение, т.е. при $NmF2 < NmF2_q - 2d$. Для количественного описания положительных и отрицательных возмущений введем соответственно индексы Dp и Dn , которые определим следующим образом:

$$Dp = \{ [NmF2 - (NmF2_q + 2d)]/NmF2_q \} \times \{ (1 + \text{sign}[NmF2 - (NmF2_q + 2d)])/2 \},$$

$$Dn = \{ [NmF2 - (NmF2_q - 2d)]/NmF2_q \} \times \{ (1 + \text{sign}[(NmF2_q - 2d) - NmF2])/2 \},$$

где $NmF2$ – текущая наблюдаемая величина электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя, а $\text{sign}(x)$ – ступенчатая функция ($\text{sign}(x) = \{1$ при $x > 0$; 0 при $x = 0$; -1 при $x < 0\}$). Видно, что индексы

Названия и координаты станций вертикального зондирования ионосферы

Название станции	Географическая широта, град.	Географическая долгота, E град.	Геомагнитная широта, град.
Chilton	51.6	358.7	54.1
Del'ebre	40.8	0.3	43.7
Tortosa	40.4	0.3	43.6
Juliusruh	54.6	13.4	54.3
Rome	41.8	12.5	42.3
Sofia	42.7	23.4	41.0
Grahamstown	-33.3	26.5	-33.9
Hobart	-42.9	147.3	-51.6
Canberra	-35.3	149.0	-44.0
Mundaring	-32.0	116.2	-43.5
Brisbane	-27.5	152.9	-35.7
Norfolk Island	-29.0	168.0	-34.8
Townsville	-19.6	146.9	-28.4
Darwin	-12.5	131.0	-23.2
Vanimmo	-2.7	141.3	-12.6
Boulder	40.0	254.7	48.9
Point Arguello	34.6	239.4	42.3
Dyess	32.5	260.3	42.0
Eglin AFB	30.4	273.2	41.1
Port Stanley	-51.7	302.2	-40.6

Dp и Dn дают с учетом знака относительные величины положительного и отрицательного возмущений $NmF2$ соответственно, в том случае, когда они име-

ют место. Более удобно описывать возмущения $NmF2$ посредством единого индекса DN , объединяющего индексы Dp и Dn по формуле

$$DN = \frac{1}{2} \left\{ \frac{[NmF2 - (NmF2_q + 2d)]}{NmF2_q} (1 + \text{sign}[NmF2 - (NmF2_q + 2d)]) + \frac{[NmF2 - (NmF2_q - 2d)]}{NmF2_q} (1 + \text{sign}[(NmF2_q - 2d) - NmF2]) \right\} \times 100\%,$$

Несмотря на громоздкий вид данной формулы, она позволяет достаточно просто и однозначно определять величину и знак возмущения $NmF2$. При этом фиксируются только те отклонения $NmF2$, которые выходят за “шумовую” дорожку полушириной в два стандартных отклонения. Предлагаемый способ выявления положительных и отрицательных ионосферных возмущений, на наш взгляд, является несколько более корректным с точки зрения физического смысла по сравнению с традиционным подходом, основанном на использовании медианы. Действительно, в последнем случае отклонение отсчитывается непосредственно от медианы, причем абсолютная величина порогового

уровня, начиная с которого наблюдаемое отклонение считается “ионосферным возмущением”, задается (или по умолчанию подразумевается) до некоторой степени произвольно. Таким образом, предложенный в работе способ определения возмущений $NmF2$ удовлетворяет более жестким критериям достоверности и количественной определенности по сравнению с традиционным подходом, что обеспечивается выбором уровня отсечки шума величиной в два стандартных отклонения.

Мы не включили в рассмотрение данные измерений виртуальной высоты максимума $F2$ -слоя $h'F2$, а также высоты $hpF2$, так как эти параметры зачастую, особенно во время бурь, не отражают

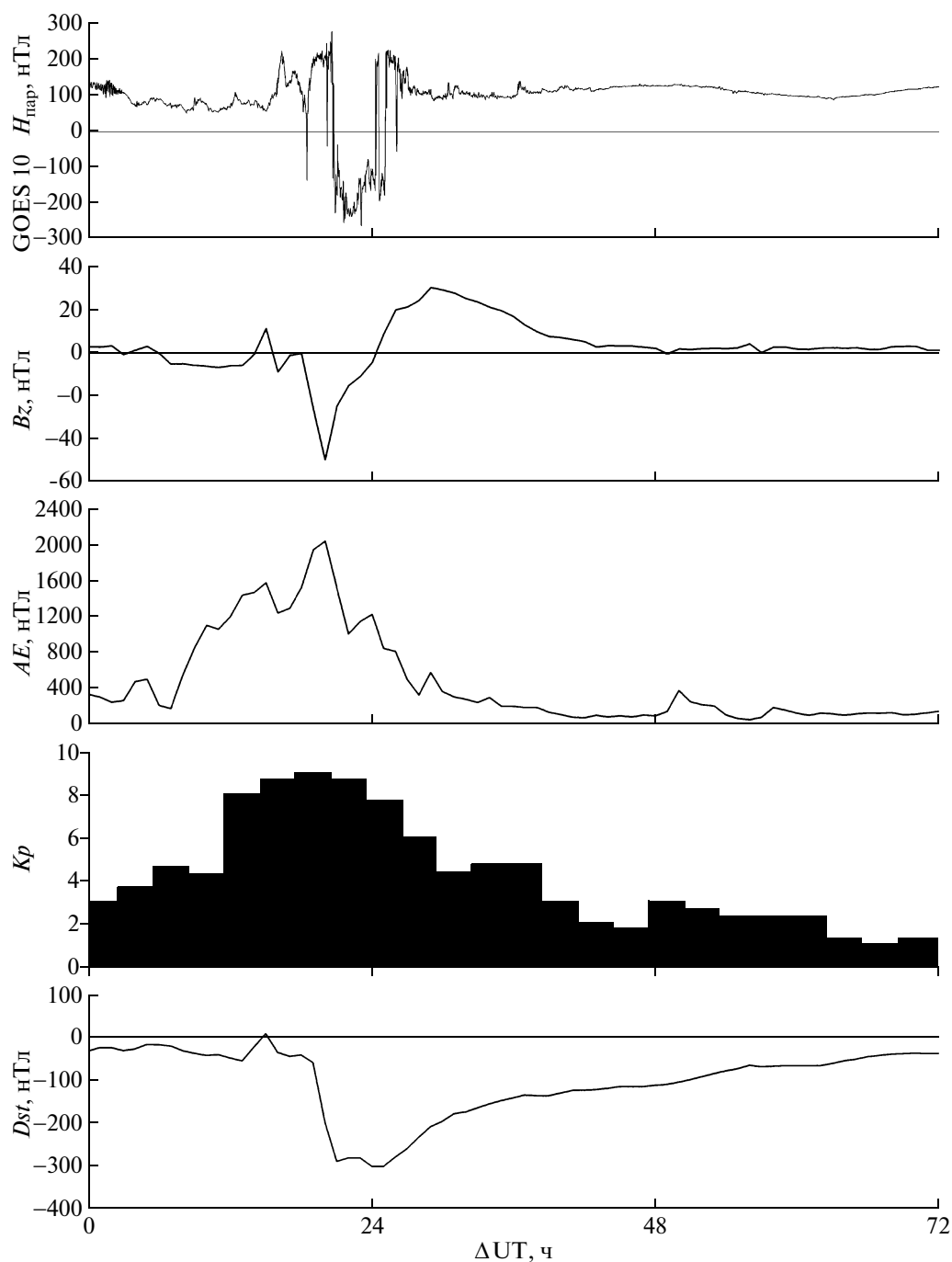


Рис. 1. Компонента магнитного поля, параллельная земной оси $H_{\text{пар}}$, измеренная на геостационарном спутнике GOES-10; B_z -компонента межпланетного магнитного поля; AE -индекс; K_p -индекс и Dst -индекс в зависимости от времени, отсчитываемого от 00:00 UT 15 июля 2000 г., за период 15–17 июля 2000 г.

адекватным образом изменения истинной высоты максимума F_2 -слоя [Matsushita, 1959].

Магнитная супербура 15 июля 2000 г. явилась следствием коронального выброса солнечной плазмы во время солнечной вспышки, которая произошла в “День Бастилии” 14 июля 2000 г., отсюда проследкает одноименное название вспышки и магнитной бури. Эволюция магнитной обстановки за

период 15–17 июля 2000 г. представлена на рис. 1, который показывает измеренную на геостационарном спутнике GOES-10 компоненту магнитного поля, параллельную земной оси, B_z -компоненту межпланетного магнитного поля, AE -индекс, индексы K_p и Dst . Магнитная супербура началась в 14:37 UT, 15 июля. Минимальное значение Dst -индекса составило менее -300 нТл, а значения индек-

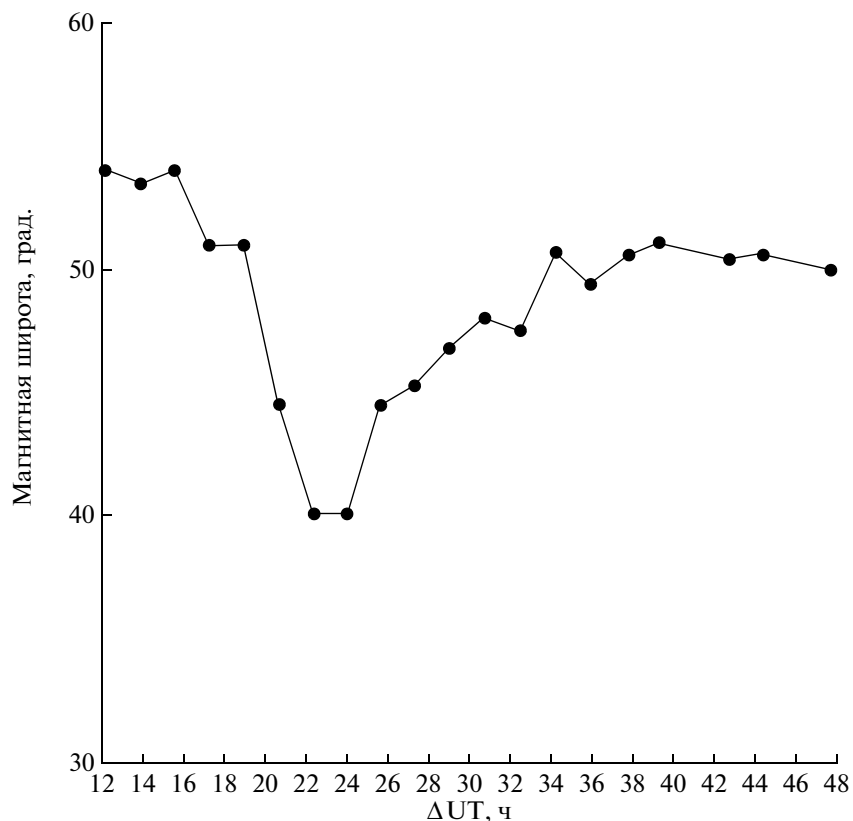


Рис. 2. Вариации положения плазмопаузы и главного ионосферного провала в зависимости от UT, определенные по наблюдениям субаврорального пика электронной температуры на спутнике DMSP F15 во время бури в интервале от 12:00 UT, 15 июля до 00:00 UT, 17 июля 2000 г.

са Kp достигали 9₋ и 9₀. Dst -индекс держался на низком уровне в течение периода между 20:00 UT, 15 июля и 06:00 UT, 16 июля с наименьшими значениями в интервале 00:00–01:00 UT, 16 июля. Примерно между 19:00 и 23:00 UT 15 июля геостационарный спутник GOES-10 наблюдал отрицательные значения компоненты магнитного поля параллельной земной оси, что свидетельствует об очень сильном сжатии магнитосферы в этом интервале времени, в результате которого спутник оказался вне магнитосферы, т.е. магнитопауза, обычно находящаяся на геоцентрическом расстоянии $10R_E$ (R_E – радиус Земли), сместилась внутрь геостационарной орбиты и оказалась на геоцентрическом расстоянии меньше, чем $6.6R_E$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Смещение положения плазмопаузы и главного ионосферного провала во время бури

Электрическое поле магнитосферной конвекции является одним из ключевых факторов, определяющих формирование и положение плазмопаузы и главного ионосферного провала (ГИП). И наобо-

рот, положение плазмопаузы и ГИП может служить хорошим индикатором степени расширения области магнитосферного электрического поля к более низким широтам. Известно, что это положение можно определить по наблюдениям субаврорального пика электронной температуры T_e [Kozuga et al., 1986; Brace et al., 1988; Afonin et al., 1997]. Рисунок 2 иллюстрирует изменение положения плазмопаузы/ГИП в ходе бури на основе данных наблюдений субаврорального пика T_e на спутнике DMSP F15 в 21:30 LT. Видно, что во время главной фазы бури произошло сильное смещение (примерно на 15°) положения плазмопаузы/ГИП к экватору, с магнитной широты $\sim 55^\circ$ ($L = 3$) до магнитной широты $\sim 40^\circ$ ($L = 1.7$). Это означает, что в интервале времени 19:00–22:00 UT 15 июля имело место непрерывное расширение системы магнитосферной конвекции к экватору, и магнитосферное электрическое поле эффективно проникло во внутреннюю плазмосферу, что подтверждается и прямыми измерениями различных параметров ионосферы и электрического поля во время бури посредством радара некогерентного рассеяния радиоволн в Иркутске [Berngardt et al., 2001; Shpynev et al., 2001]. Отметим, что период интенсификации и расширения систе-

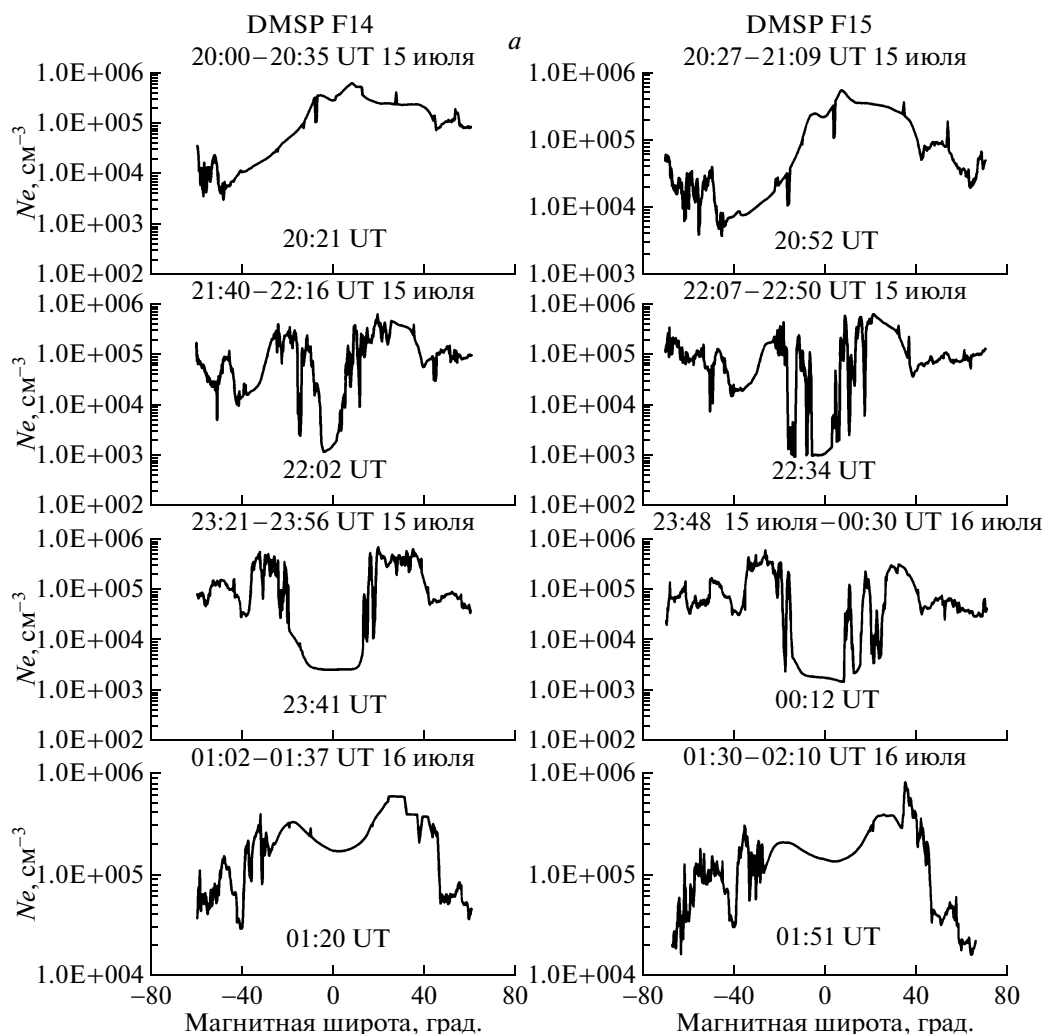


Рис. 3. Зависимости электронной концентрации от магнитной широты на высоте 840 км в 21:30 LT, измеренные на спутниках DMSP F14 и F15 вдоль четырех последовательных орбит во время главной фазы бури (а). Значения UT, при которых спутники пересекали магнитный экватор, приведены непосредственно над осью UT. Зависимость электронной концентрации от географической широты на высоте 685 км в 22:50 UT по измерениям на спутнике KOMPSAT-1 вдоль траектории, которая пересекла магнитный экватор (его положение показано вертикальной стрелкой) в 23:09 UT 15 июля 2000 г. (б). В области низкоширотного провала значение N_e было меньше нижнего предела измерений прибора 10^3 см^{-3} .

Зависимость электронной концентрации от географической долготы на высоте 600 км в диапазоне магнитных широт от ~ -10 до $\sim 10^\circ$ интервале 06:51–07:11 UT (02:23–06:44 LT) 16 июля 2000 г. по измерениям на спутнике ROCSAT-1 (в).

мы магнитосферной конвекции совпадает с периодом сильного сжатия магнитосферы.

3.2. О возмущении зонального электрического поля в вечернем секторе экваториальной ионосферы

В работе [Greenspan et al., 1991] было показано, что причиной образования глубокого крупномасштабного провала в горизонтальном распределении N_e , наблюдавшегося в ночной низкоширотной верхней ионосфере во время магнитной супербури 13 марта 1989 г., явилось увеличение зонального электрического поля восточного направления. Аналогичный механизм был предложен в работах [Basu

et al., 2001; Lee et al., 2002] для объяснения образования провала, который наблюдался в ночной низкоширотной верхней ионосфере во время супербури 15 июля 2000 г. Возмущения электрического поля в низкоширотной ионосфере во время магнитных бурь могут являться результатом прямого проникновения магнитосферного электрического поля [Jaggi and Wolf, 1973; Southwood, 1977; Spiro et al., 1988; Fejer and Scherlies, 1998] и динамо-эффекта возмущенного нейтрального ветра [Blanc and Richmond, 1980; Scherlies and Fejer, 1997; Richmond et al., 2003]. Попытка воспроизвести возможную картину возмущения электрического поля в низкоширотной ионосфере, вызванного супербурей 15 июля 2000 г.,

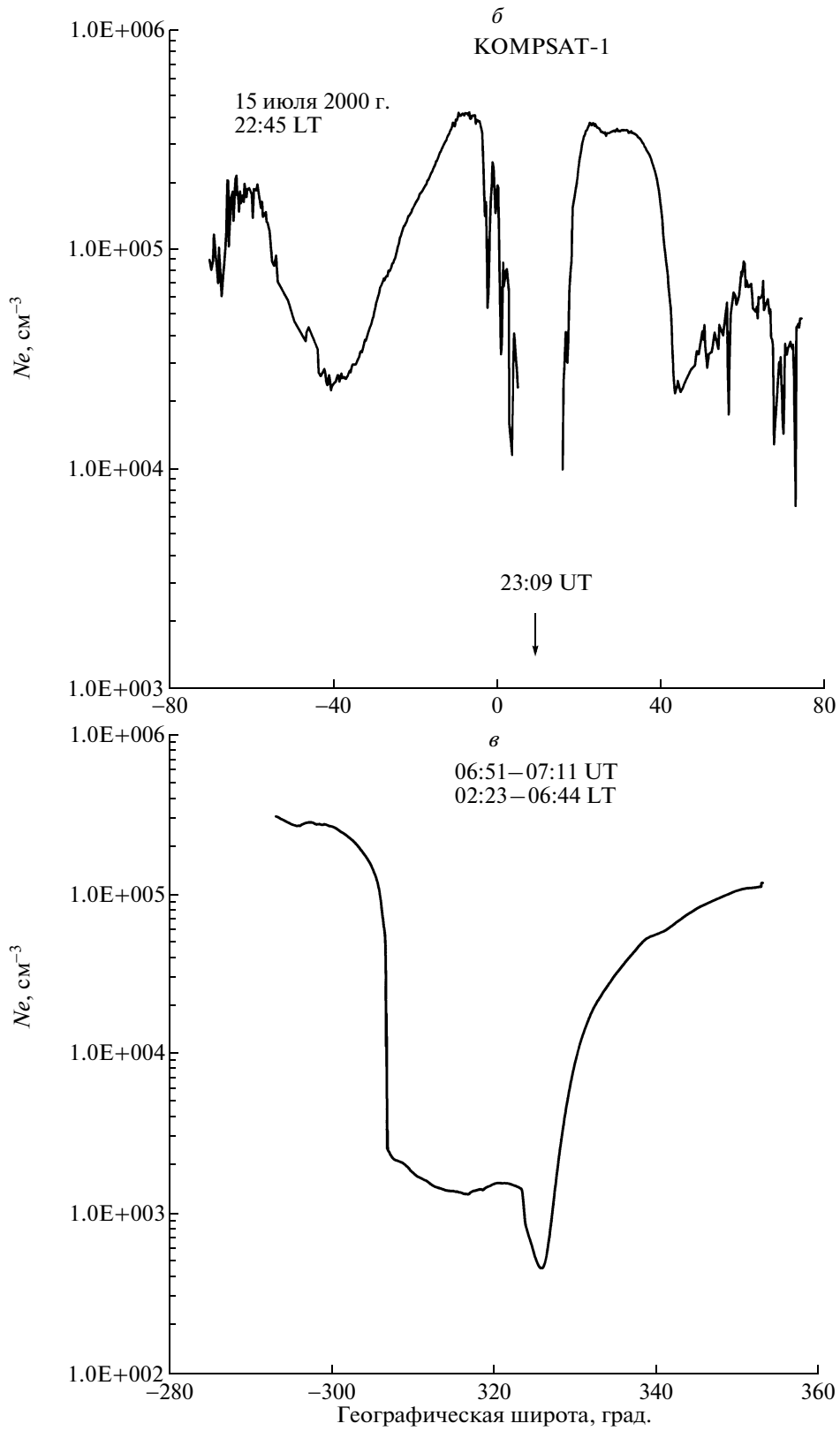


Рис. 3. Продолжение.

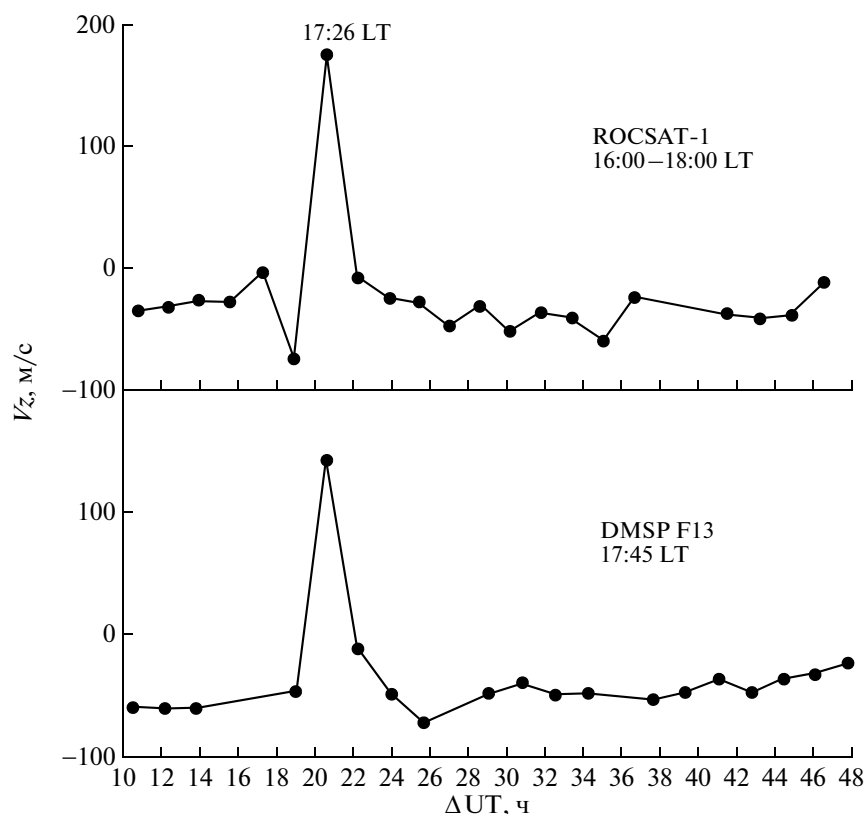


Рис. 4. Зависимость вертикального дрейфа плазмы (положительный знак соответствует направлению вверх) от времени, отсчитываемого от 00:00 UT 15 июля 2000 г., строго над магнитным экватором в вечернем секторе местного времени по измерениям на спутниках ROCSAT-1 и DMSP F13.

на основе данных спутника ROCSAT-1 и упрощенных модельных расчетов была предпринята в работе [Lin et al., 2005].

Для того, чтобы оценить поведение восточного электрического поля в вечерней и послезакходной низкоширотной ионосфере в период супербури 15 июля 2000 г., воспользуемся данными нескольких спутников. Рисунок 3 суммирует результаты наблюдений крупномасштабного провала N_e в ночной низкоширотной верхней ионосфере во время рассматриваемой бури на спутниках DMSP F14 и F15, KOMPSAT-1 и ROCSAT-1. Видно, что в 21:30 LT спутники DMSP F14 and F15 фиксировали провал между ~22:00 UT 15 июля и ~01:00 UT 16 июля. Важно заметить, что в 21:30 LT провал наблюдался не ранее 21:00 UT 15 июля и не позднее 01:20 UT 16 июля. Таким образом большое восточное электрическое поле, которое вызвало образование провала в послезакходной ионосфере, существовало не более 4-х часов. Из данных спутника ROCSAT-1 видно, что на самом деле время существования возмущения восточного поля не превышало 3-х часов. На рисунке 4, на основе данных спутников ROCSAT-1 и DMSP F13, показано как меняется во время бури в

зависимости от UT скорость вертикального дрейфа плазмы (положительный знак соответствует дрейфу вверх) строго над магнитным экватором вблизи вечернего терминатора. Вертикальный дрейф плазмы над магнитным экватором вызывается зональным электрическим полем. Дрейф вверх соответствует восточному полю, а дрейф вниз обусловлен воздействием западного поля. Как видно из рисунка, оба спутника примерно в 21:00 UT зарегистрировали значительное усиление дрейфа, направленного вверх. Величина соответствующего восточного электрического поля составила ~3.4 мВ/м по данным спутника ROCSAT-1 и ~2.7 мВ/м по данным спутника DMSP F13. Увеличение скорости направленного вверх дрейфа имело место между ~19:00 и ~22:00 UT 15 июля, то есть в период быстрого расширения системы магнитосферной конвекции к экватору. Этот факт согласуется с общепринятой концепцией, что в такие периоды создаются благоприятные условия для проникновения магнитосферного электрического поля к низким широтам [Jaggi and Wolf, 1973; Southwood, 1977; Fejer et al., 1990].

Из рисунков 3 и 4 следует, что возмущение восточного электрического поля не простиралось по

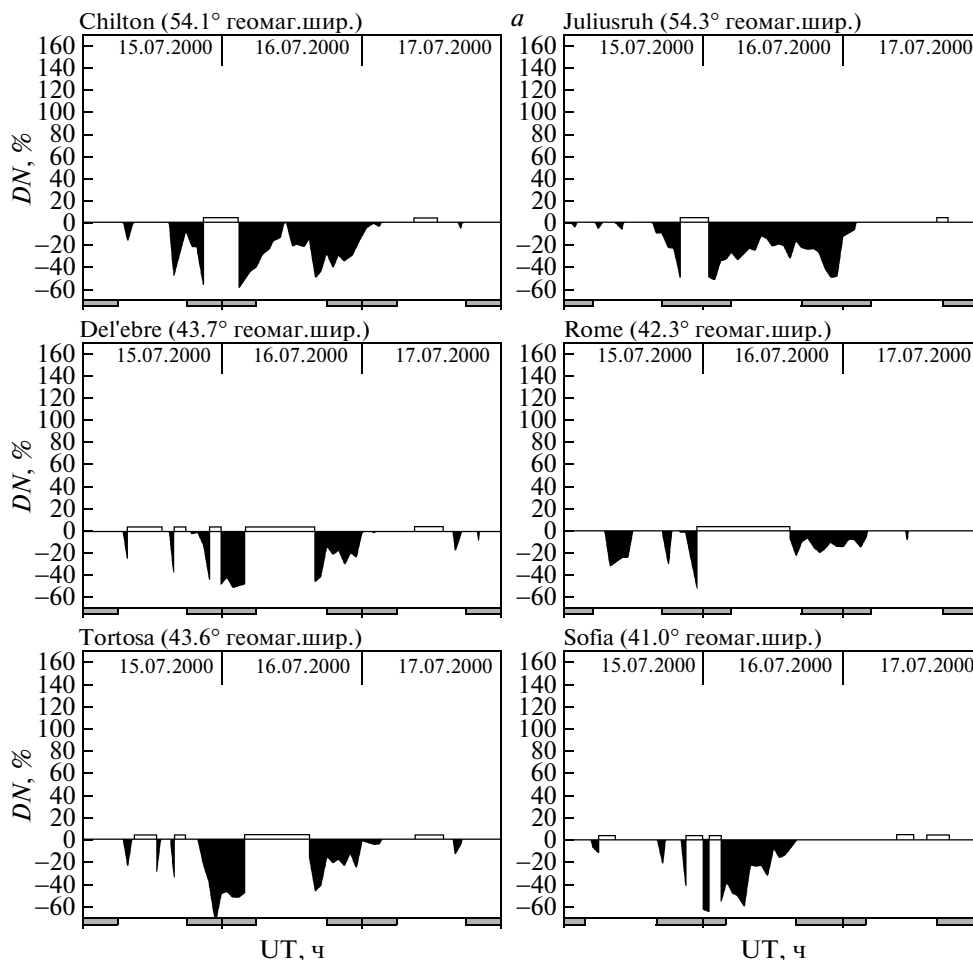


Рис. 5. UT-вариации индекса DN , определяющего относительные возмущения $NmF2$, измеренные в европейском регионе по данным ряда ионосферных станций. Горизонтальные затененные полосы обозначают ночные часы для каждой станции, а светлыми горизонтальными полосками показаны интервалы времени, для которых отсутствовали данные (а).

То же, что и на рис. а, но для региона Австралии (б).

То же, что и на рис. а, но для американского региона (в).

местному времени далее 21:00 LT. Отметим также, что в течение бури, за исключением интервала 19:00–22:00 UT 15 июля, спутники ROCSAT-1 и DMSF F13 наблюдали в предзаходном секторе зональное электрическое поле, направленное на запад, со средней величиной ~ 0.9 мВ/м.

3.3. Морфология возмущений $NmF2$

На рисунке 5а показаны возмущения $NmF2$, представленные вариациями индекса DN , наблюдавшиеся на ряде европейских ионосферных станций в период 15–17 июля 2000 г. Здесь главная фаза бури началась в вечернем секторе местного времени. Перед бурей наблюдалась довольно интенсивная авроральная активность, которая вероятно вызвала умеренные отрицательные возмущения $NmF2$, проявлявшиеся вплоть до $\sim 18:00$ UT 15 июля. Затем возникло продолжительное отрицательное возму-

щение, которое началось с резкого уменьшения $NmF2$. Оно продолжалось более 30-ти часов над всеми станциями, за исключением станции Sofia, где длительность отрицательного возмущения была на 6 ч короче, и оно имело место как в днем, так и ночью. Положительные возмущения не были зафиксированы ни на одной станции.

Рисунок 5б иллюстрирует вариации DN в австралийском регионе (южное полушарие). В этой области главная фаза бури началась после восхода. На станциях Hobart, Canberra, Mundaring и Brisbane отрицательные возмущения наблюдались преимущественно в дневное время, тогда как на более низкоширотных станциях Norfolk Island, Townsville и Darwin в ночные часы имели место большие положительные выбросы $NmF2$. На низкоширотной станции Vanimo днем величина $NmF2$ испытывала умеренные отрицательные возмущения во время главной фазы бури. Мы полагаем, что сильные положительные возмуще-

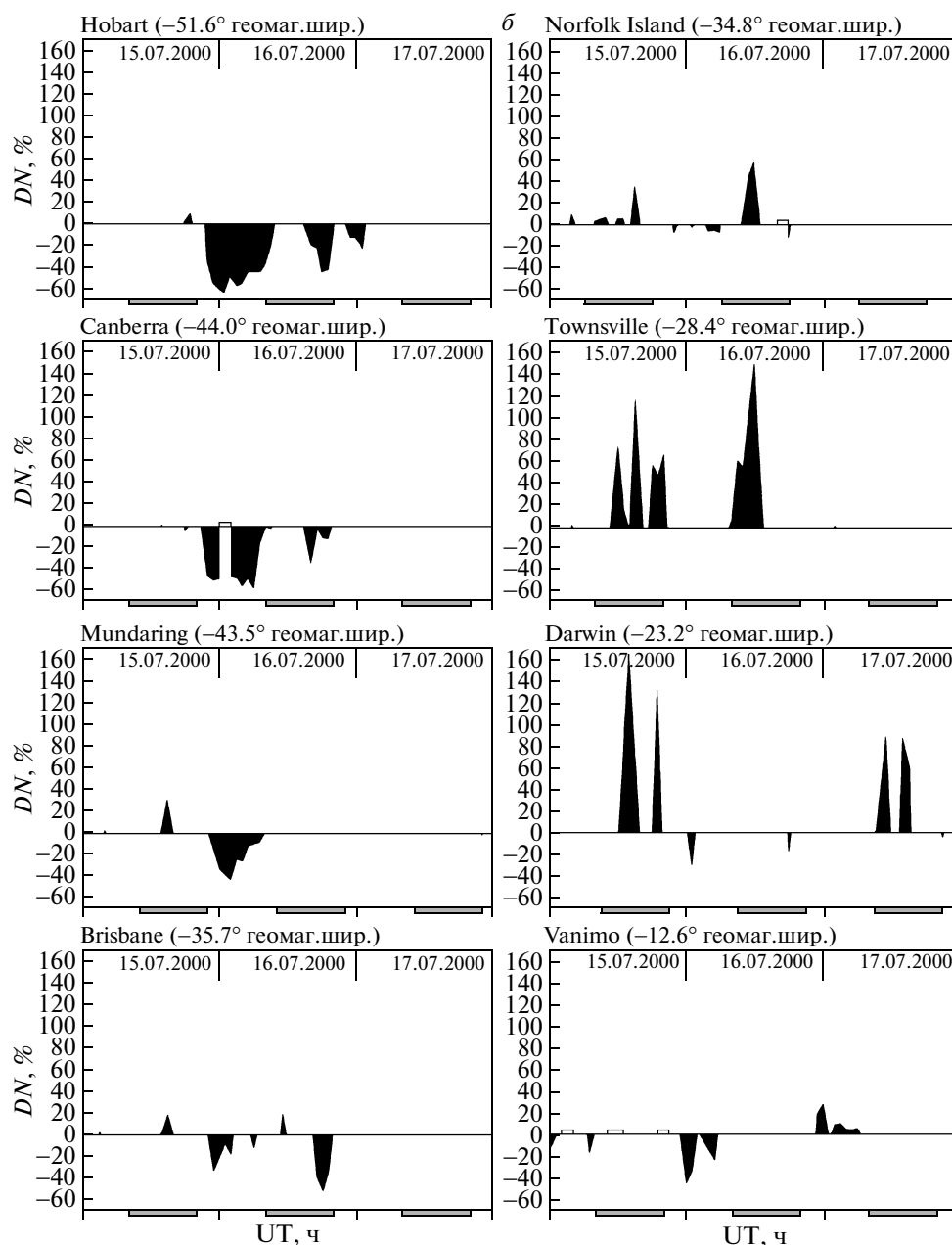


Рис. 5. Продолжение.

ния, зарегистрированные на станциях Townsville и Darwin до 18:00 UT 15 июля, были связаны с суббулевой активностью, которая предшествовала буре.

На рисунке 5в представлены возмущения $NmF2$ в американском долготном секторе, в котором главная фаза бури прилась на послеполуночные часы. На станции Boulder большое положительное возмущение короткой длительности сменилось отрицательным возмущением, которое длилось всю ночь с 15 на 16 июля и затем появилось снова ночью 17 июля. Из-за отсутствия данных ничего нельзя

сказать о поведении $NmF2$ днем 16 июля. На станциях Point Arguello и Dyess спорадически наблюдались как положительные, так и отрицательные возмущения в течение главной фазы бури. Над станцией Eglin AFB в ночь с 15 на 16 июля после сильных положительных возмущений наступила продолжительная отрицательная фаза. В южном полушарии на станции Port Stanley зафиксированы последовательности дискретных положительных возмущений 15 и 16 июля в дневное время. Для ночи с 15 на 16 июля данные отсутствовали.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из рис. 2, во время главной фазы бури в интервале 19:00–22:00 UT, 15 июля 2000 г. произошло сильное смещение к экватору ионосферной проекции плазмопаузы и ГИП, что свидетельствует об интенсификации и расширении системы магнитосферной конвекции. Рисунки 3 и 4 наглядно иллюстрируют, что именно в этот период имело место большое увеличение восточного электрического поля в вечерней низкоширотной ионосфере. Относительно небольшая длительность возмущения восточного поля и его совпадение по времени с периодом быстрого расширения области магнитосферного электрического поля к низким широтам дает основание считать, что усиление восточного поля было обусловлено прямым проникновением магнитосферного электрического поля в низкоширотную ионосферу. В работе [Sastri et al., 2002] на основе анализа данных трех индийских ионосферных станций также сделан вывод, что в интервале 19:00–21:00 ЦТ 15 июля 2000 г. имело место проникновение магнитосферного электрического поля на низкие широты. Интересно отметить, что, как следует из рис. 4, никакого существенного увеличения восточного электрического поля в предзаходной экваториальной ионосфере в восстановительную фазу бури не наблюдалось, хотя модельные расчеты [Richmond et al., 2003] предсказывают для этого периода заметное восточное электрическое поле за счет динамо-эффекта возмущенного нейтрального ветра.

Буря вызвала очень сильные возмущения $NmF2$. Из рис. 2 видно, что в период главной фазы и в начале восстановительной фазы бури в промежутке времени между 20:00 UT 15 июля и 04:00 UT 16 июля главный ионосферный провал на ночной стороне находился в интервале магнитных широт 40° – 45° . Отсюда можно предположить, что уменьшение $NmF2$, наблюдавшееся в предполуночном европейском регионе 15 июля (рис. 5а), было в значительной мере связано с перемещением в эту зону главного ионосферного провала. Затем с высоких широт сюда распространилась область с повышенным содержанием молекулярных газов и отрицательное возмущение стало контролироваться изменением состава нейтральной атмосферы.

В австралийском регионе (зимнее полушарие) (рис. 5б) главная фаза бури началась после восхода и отрицательные возмущения $NmF2$, которые наблюдались в южной части региона, в основном были обусловлены изменениями нейтрального состава. На более низких широтах существенных возмущений $NmF2$ в этот период времени не было, за исключением слабого отрицательного возмущения небольшой продолжительности, зафиксированного на станции Darwin. Однако затем в ночные часы тут произошли большие положительные возмущения $NmF2$. Амплитуда возмущения над станцией Townsville превысила 140%. Эти положительные возмущения, по-

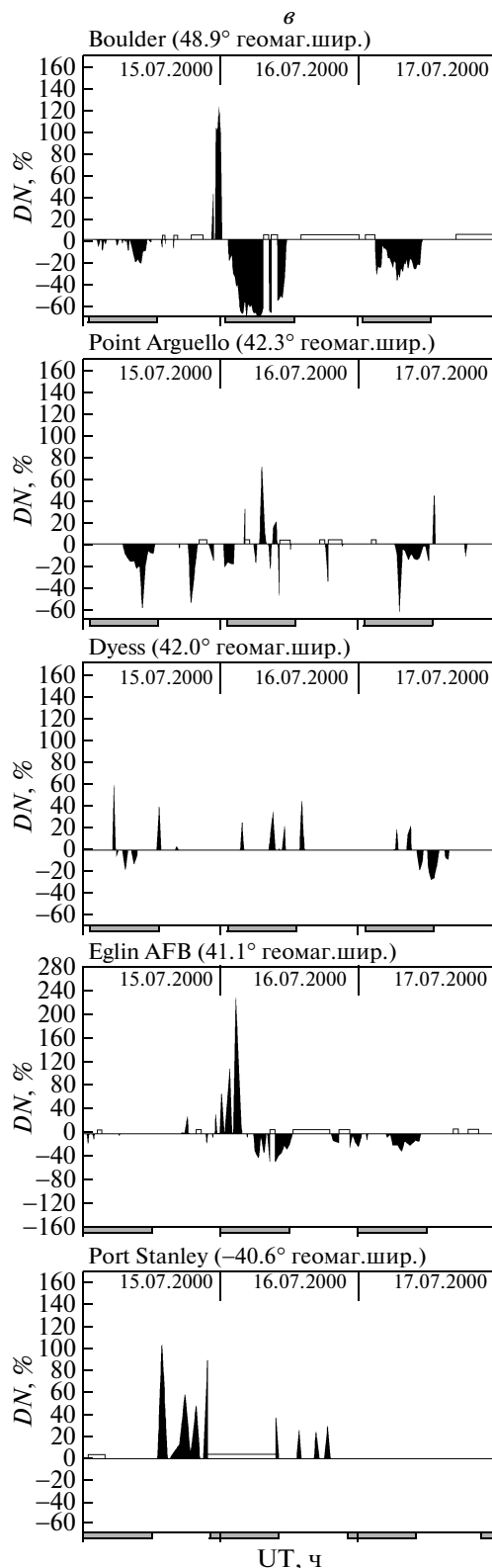


Рис. 5. Окончание.

видимому, были вызваны большими спорадическими увеличениями потока плазмы из плазмосферы за счет возмущений меридионального нейтрального ветра.

В американском долготном сегменте (рис. 5б) главная фаза бури началась после полудня и здесь вариации $NmF2$ во время бури разительно отличались даже на близкорасположенных станциях Dyess и Eglin AFB. Большое положительное возмущение $NmF2$, которое наблюдалось на станции Boulder вблизи момента минимума Dst -индекса перед заходом, скорее всего было проявлением эффекта SED (увеличения полного содержания электронов вблизи вечернего терминатора за счет усиления восточного электрического поля) (см., например, [Foster et al., 2002]), Последовавшее затем отрицательное возмущение было вызвано изменением нейтрального состава. Эффект SED особенно ярко проявился на станции Eglin AFB, где амплитуда увеличения $NmF2$ 200%. На станции Port Stanley (южное полушарие) во время бури наблюдались только кратковременные спорадические положительные возмущения в дневное время, которые вероятно были связаны с возмущениями меридионального нейтрального ветра.

5. ВЫВОДЫ

Представленные результаты являются дополнением к совокупности результатов предыдущих исследований ионосферных эффектов магнитной супербури 15 июля 2000 г. и существенно подкрепляют точку зрения, согласно которой во время главной фазы бури имело место прямое проникновение магнитосферного электрического поля в низкоширотную ионосферу и что именно восточная компонента проникшего магнитосферного поля привела к образованию крупномасштабного провала в горизонтальном распределении электронной концентрации в ночной низкоширотной верхней ионосфере. Расширение системы интенсивной магнитосферной конвекции к экватору в период главной фазы бури вызвало смещение плазмопаузы и главного ионосферного провала до магнитной широты 40° ($L \sim 1.7$).

Выявлены следующие основные особенности глобальной морфологической картины возмущений $NmF2$ на средних широтах во время бури:

1. В южном (зимнем) полушарии в австралийском регионе, в котором главная фаза бури началась после восхода, на станциях, расположенных в южной части региона, и днем и ночью наблюдались отрицательные возмущения $NmF2$. Тогда как на более низких широтах зарегистрированы большие положительные возмущения в дневное время.

2. В северном (летнем) полушарии в европейском регионе, где главная фаза бури началась вечером, в дневные и ночные часы наблюдались только продолжительные отрицательные возмущения $NmF2$. В американском регионе, в котором главная фаза бури началась после полудня, имели место как положительные, так и отрицательные возмущения $NmF2$.

Авторы глубоко признательны профессору S.-Y. Su (Institute of Space Science and Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University, Chung-Li, Taiwan) за предоставление данных спутника ROCSAT-1 и выражают благодарность the Center for Space Sciences at the University of Texas at Dallas and the US Air Force, USA за возможность использовать данные измерений параметров тепловой плазмы на спутнике DMSP. Данные вертикального зондирования ионосферы, использованные в работе, были взяты из банков ионосферных данных World Data Center for Solar-Terrestrial Physics, Boulder, USA и IPS (Ionospheric Prediction Service) – The Australian Space Weather Agency, Sydney, Australia. Работа была выполнена при частичной поддержке фонда The Korea Science and Engineering Foundation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Abdu M.A. et al.* Abnormal evening vertical plasma drift and effects on *ESF* and *EIA* over Brazil-South Atlantic sector during the 30 October 2003 superstorm // *J. Geophys. Res.* 113. A07313. doi:10.1029/2007JA012844. 2008.
- *Afonin V.V., Bassolo V.S., Smilauer J., Lemaire J.F.* Motion and erosion of the nightside plasmapause region and of the associated subauroral electron temperature enhancement: Cosmos 900 observations // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A2. P. 2093–2103. 1997.
- *Basu S., Basu Su., Groves K.M., Yeh H.-C., Su S.-Y., Rich F.J., Sultan P.J., Keskinen M.J.* Response of the equatorial ionosphere in the south Atlantic region to the great magnetic storm of July 15, 2000 // *Geophys. Res. Lett.* V. 28. № 18. P. 3577–3580. 2001.
- *Basu S., Basu Su., Rich F.J., Groves K.M., MacKenzie E., Coker C., Sahai Y., Fagundes P.R., Becker-Guedes F.* Response of the equatorial ionosphere at dusk to penetration electric fields during intense magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 112. A08308. doi:10.1029/2006J A012192. 2007.
- *Batista I.S., de Paula E.R., Abdu M.A., Trivedi N.B.* Ionospheric effects of the March 13, 1989, magnetic storm at low and equatorial latitudes // *J. Geophys. Res.* V. 96. № A8. P. 13943–13952. 1991.
- *Berngardt O.I., Zherebtsov G.A., Potekhin A.P., Shpynev B.G.* Observations of powerful coherent echoes during July, 15–16, 2000 major geomagnetic storm // *Atmospheric and ocean optics. Atmospheric Physics. VIII Joint International Symposium, Irkutsk, 25–29 June 2001. Abstracts.* P. 220–221. 2001.
- *Blanc M., Richmond A.D.* The ionospheric disturbance dynamo // *J. Geophys. Res.* V. 85. № A4. P. 1669–1686. 1980.
- *Brace L.H., Chappell C.R., Chandler M.O., Comfort R.H., Horwitz J.L., Hoegy W.R.* F region electron temperature signatures of the plasmapause based on Dynamics Explorer 1 and 2 measurements // *J. Geophys. Res.* V. 93. № A3. P. 1896–1908. 1988.
- *Buonsanto M.J.* Ionospheric storms – A review // *Space Sci. Rev.* V. 88. № 3/4. P. 563–601. 1999.

- *Crowley G. et al.* Global thermosphere-ionosphere response to onset of 20 November 2003 magnetic storm // *J. Geophys. Res.* 111. A10S18. doi:10.1029/2005JA011518. 2006.
- *Danilov A.D.* F2-region response to geomagnetic disturbances // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 63. № 5. P. 441–449. 2001.
- *Danilov A.D., Laštovička J.* Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // *Int. J. Geomag. Aeron.* V. 2. № 3. P. 209–224. 2001.
- *Fejer B.G., Spiro R.W., Wolf R.A., Foster J.C.* Latitudinal variation of perturbation electric fields during magnetically disturbed periods: 1986 SUNDIAL observations and model results // *Ann. Geophys.* V. 8. № 5. P. 441–454. 1990.
- *Fejer B.G., Scherliess L.* Mid- and low-latitude prompt penetration ionospheric plasma drifts // *Geophys. Res. Lett.* V. 25. № 16. P. 3071–3074. 1998.
- *Foster J.C., Coster A.J., Erickson P.J., Goldstein J., Rich F.J.* Ionospheric signatures of plasmaspheric tails // *Geophys. Res. Lett.* 29(13). 1623. doi:10.1029/2002GL015067. 2002.
- *Foster J.C., Coster A.J.* Conjugate localized enhancement of total electron content at low latitudes in the American sector // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 69. № 10–11. P. 1241–1252. 2007.
- *Greenspan M.E., Rasmussen S.E., Burke W.J., Abdu M.A.* Equatorial density depletions observed at 840 km during the great magnetic storm of March 1989 // *J. Geophys. Res.* V. 96. № A8. P. 13931–13942. 1991.
- *Jaggi R.K., Wolf R.A.* Self-consistent calculation of the motion of a sheet of ions in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 78. № 16. P. 2852–2866. 1973.
- *Kil H., Paxton L.J., Pi X., Hairston M.R., Zhang Y.* Case study of the 15 July 2000 magnetic storm effects on the ionosphere-driver of the positive ionospheric storm in the winter hemisphere // *J. Geophys. Res.* 108(A11). 1391. doi:10.1029/2002JA009782. 2003.
- *Kil H., Paxton L.J.* Ionospheric disturbances during the magnetic storm of 15 July 2000: Role of the fountain effect and plasma bubbles for the formation of large equatorial plasma density depletions // *J. Geophys. Res.* 111. A12311. doi:10.1029/2006JA011742. 2006.
- *Kozyra J.U., Brace L.H., Cravens T.E., Nagy A.F.* A statistical study of the subauroral electron temperature enhancement using Dynamics Explorer 2 Langmuir probe observations // *J. Geophys. Res.* V. 91. № A10. P. 11270–11280. 1986.
- *Lee J.J., Min K.W., Kim V.P., Hegai V.V., Oyama K.-I., Rich F.J., Kim J.* Large density depletions in the nighttime upper ionosphere during the magnetic storm of July 15, 2000 // *Geophys. Res. Lett.* 29(3). 1032. doi:10.1029/2001GL013991. 2002.
- *Lin C.S., Yeh H.C.* Satellite observations of electric fields in the South Atlantic anomaly region during the July 2000 magnetic storm // *J. Geophys. Res.* 110. A03305. doi:10.1029/2003JA010215. 2005.
- *Mansilla G.A.* Mid-latitude ionospheric effects of a great geomagnetic storm // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 66. № 12. P. 1085–1091. 2004.
- *Maruyama T., Nakamura M.* Conditions for intense ionospheric storms expanding to lower midlatitudes // *J. Geophys. Res.* 112. A05310. doi:10.1029/2006JA012226. 2007.
- *Mikhailov A.V.* Ionospheric F2-layer storms // *Fisica de la Tierra.* № 12. P. 223–262. 2000.
- *Prolss G.W.* Ionospheric F-region storms // *Handbook of Atmospheric Electrodynamics.* P. 195–248. V. II. CRC Press, 1995.
- *Richmond A.D., Peymirat C., Roble R.G.* Long-lasting disturbances in the equatorial ionospheric electric field simulated with a coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere model // *J. Geophys. Res.* 108(A3). 1118. doi:10.1029/2002JA009758. 2003.
- *Rishbeth H.* F-region storms and thermospheric dynamics // *J. Geomag. Geoelectr.* V. 43. Suppl. 1. P. 513–524. 1991.
- *Sastri J.H., Niranjana K., Subbarao K.S.V.* Response of the equatorial ionosphere in the Indian (midnight) sector to the severe magnetic storm of July 15, 2000 // *Geophys. Res. Lett.* 29(13). 1651. doi:10.1029/2002GL015133. 2002.
- *Scherliess L., Fejer B.G.* Storm time dependence of equatorial disturbance dynamo zonal electric fields // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A11. P. 24037–24046. 1997.
- *Shpynev B.G., Medvedev A.V., Nosov V.E., Zherebtsov G.A., Potekhin A.P., Zavorin A.V.* Ionospheric observation during July 15–16, 2000 major geomagnetic storm // *Atmospheric and ocean optics. Atmospheric Physics.* VIII Joint International Symposium, Irkutsk, 25–29 June 2001. Abstracts. P. 211. 2001.
- *Southwood D.J.* The role of hot plasma in magnetospheric convection // *J. Geophys. Res.* V. 82. № 35. P. 5512–5520. 1977.
- *Spiro R.W., Wolf R.A., Fejer B.G.* Penetration of highlatitude electric-field effects to low latitudes during SUNDIAL, 1984 // *Ann. Geophysical.* V. 6. № 1. P. 39–49. 1988.
- *Szuszczewicz E.P., Lester M., Wilkinson P., Blanchard P., Abdu M., Hanbaba R., Igarashi K., Pulnits S., Reddy B.M.* A comparative study of global ionospheric responses to intense magnetic storm conditions // *J. Geophys. Res.* V. 103. № A6. P. 11665–11684. 1998.
- *Vlasov M., Kelley M.C., Kil H.* Analysis of ground-based and satellite observations of F-region behavior during the great magnetic storm of July 15, 2000 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 65. № 11–13. P. 1223–234. 2003.
- *Yeh K.C., Ma S.Y., Lin K.N., Conkright R.O.* Global ionospheric effects of the October 1989 geomagnetic storm // *J. Geophys. Res.* V. 99. № A4. P. 6201–6218. 1994.
- *Zhang Y., Paxton L.J., Kil H., Meng C.-I., Mende S.B., Frey H.U., Immel T.J.* Negative ionospheric storms seen by the IMAGE FUV instrument // *J. Geophys. Res.* 108(A9). 1343. doi:10.1029/2002JA009797. 2003.