

УДК 550.510.535

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ 9–14 СЕНТЯБРЯ 2005 г.

© 2011 г. М. В. Клименко^{1,2}, В. В. Клименко¹, К. Г. Ратовский³, Л. П. Гончаренко⁴

¹Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (Западное отделение), Калининград, Россия

²ФГОУ ВПО Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

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

⁴Обсерватория Хайстек, Массачусетский технологический институт, Вестфорд, Массачусетс, США

e-mail: maksim.klimenko@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2010 г.

После доработки 21.06.2010 г.

В данной работе рассматриваются ионосферные эффекты последовательности геомагнитных бурь 9–14 сентября 2005 г. Проведены численные расчеты поведения различных ионосферных параметров над станциями Якутск, Иркутск, Милстоун Хилл и Аресибо за рассматриваемый период времени с использованием Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП), разработанной в ЗО ИЗМИРАН. Результаты модельных расчетов возмущений ионосферных параметров во время бурь качественно удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для этих среднеширотных станций. Предполагается, что причинами количественных различий результатов расчетов и наблюдений могут быть: использование 3-часового Kp -индекса геомагнитной активности при моделировании временной зависимости входных параметров модели; использование дипольного приближения геомагнитного поля; отсутствие в модельных расчетах эффектов солнечных вспышек, имевших место в рассматриваемый период времени.

1. ВВЕДЕНИЕ

Численному моделированию ионосферных эффектов бурь посвящено большое число работ (см., например, обзор [Buonsanto, 1999]). В этих работах исследовались: положительные и отрицательные эффекты ионосферных бурь, вызванные изменениями параметров термосферы [Maug and Hedin, 1977; Намгаладзе и др., 1981; Förster et al., 1999; Fuller-Rowell et al., 2007; Lei et al., 2008; Lu et al., 2008]; тепловой режим верхней атмосферы на различных фазах развития ионосферных бурь [Maug and Hedin, 1977; Maeda et al., 1989]; проникновение поля магнитосферной конвекции к низким широтам из-за нарушения условий экранирования и возмущенное ионосферное динамо [Reddy and Maug, 1998; Fuller-Rowell et al., 2002, 2008; Huang et al., 2005; Maruyama et al., 2005; Wang et al., 2007; Lu et al., 2008]; влияние внешней ионосферы и магнитосферы на поведение F -области ионосферы во время бурь [Sojka et al., 1994; Wang et al., 2007]. Показано, что основными механизмами формирования возмущений ионосферных параметров во время бурь являются электрические поля и вариации термосферных параметров. Так, положительные ионосферные возмущения на средних широтах согласно [Maug and Volland, 1973] формируются меридиональной компонентой термосферного ветра, а отрицательные возмущения —

вариациями состава термосферы, т.е. изменениями отношения $n(O)/n(N_2)$.

В большинстве модельных исследований реакции ионосферы на геомагнитные бури учитываются изменения разности потенциалов через полярные шапки. Помимо этого, в модельных расчетах необходимо учитывать изменения потока и энергии высыпавшихся энергичных частиц и пространственно-временные вариации продольных токов второй зоны. Ранее в работе [Клименко и Клименко, 2009] с использованием Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) [Namgaladze et al., 1988; Намгаладзе и др., 1990] нами были рассмотрены на Иркутской долготной цепочке станций ионосферные эффекты изменения электрического поля магнитосферной конвекции с учетом и без учета дополнительных высыпаний, эффекты дополнительных продольных токов второй зоны и их смещения к экватору. При этом было показано, что учет только магнитосферной конвекции приводит к отрицательным возмущениям на всех рассмотренных станциях. Изменения высыпаний энергичных частиц и продольных токов второй зоны вызывают, в основном, эффекты в ночное время.

В данной работе представлены результаты исследований ионосферных эффектов последовательности геомагнитных бурь 9–14 сентября 2005 г.,

выполненных на модели ГСМ ТИП с учетом изменений во время возмущений всех входных параметров модели, о которых говорилось выше.

2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Известно [Брюнелли и Намгаладзе, 1988], что появление дополнительного восточного электрического поля приводит к дополнительному электромагнитному дрейфу к полюсу в плоскости геомагнитного меридиана и к подъему плазмы на большие высоты в область меньших скоростей химических потерь, что приводит к положительным эффектам в электронной концентрации в F -области ионосферы. Соответственно, появление дополнительного западного электрического поля приводит к дополнительному электромагнитному дрейфу к экватору в плоскости геомагнитного меридиана и к опусканию плазмы на меньшие высоты в область больших скоростей химических потерь, что приводит к отрицательным эффектам в электронной концентрации в F -области ионосферы.

Появление дополнительного меридионального электрического поля приводит к зональному дрейфу плазмы (поле, направленное к полюсу, приводит к дрейфу плазмы на запад, а поле, направленное к экватору, вызывает дрейф плазмы на восток). Это приводит к изменениям электронной концентрации в F -области ионосферы только в том случае, если в области существования меридиональной компоненты электрического поля имеются долготные градиенты электронной концентрации [Клименко и Намгаладзе, 1980]. При этом величина эффектов будет тем больше, чем больше эти градиенты. Таким образом, можно ожидать значительных эффектов меридионального электрического поля в местах существования таких крупномасштабных неоднородностей, как главный ионосферный провал и экваториальная ионизационная аномалия, а также на линии терминатора.

Поскольку плазма на высотах F -области и выше замагничена, то поперек силовых линий геомагнитного поля она может перемещаться только под действием электрического поля, эффекты которого рассмотрены выше. Однако, наличие угла наклона геомагнитного поля к поверхности Земли приводит к тому, что под действием меридиональной компоненты термосферного ветра плазма за счет ион-нейтрального трения может увлекаться нейтральными частицами, перемещаясь вверх или вниз вдоль силовых линий геомагнитного поля в области, соответственно, меньших или больших скоростей химических потерь в ионно-молекулярных реакциях, что приводит к росту или падению электронной концентрации [Брюнелли и Намгаладзе, 1988].

Поскольку атомарный кислород является основным источником ионизации в F -области ионосфе-

ры, а молекулярный азот определяет основные потери доминирующих ионов атомарного кислорода, то изменение отношения $n(O)/n(N_2)$ определяет знак изменений электронной концентрации — рост этого отношения приводит к увеличению электронной концентрации, а падение — к уменьшению [Брюнелли и Намгаладзе, 1988].

3. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРУЕМОГО ЯВЛЕНИЯ

В начале сентября 2005 г. произошло несколько следовавших друг за другом геомагнитных бурь. 9 сентября наблюдалась слабая геомагнитная буря с внезапным началом в 14:01 UT. В этот же день произошла вспышка на Солнце класса $X17$. Эта вспышка была одной из десяти самых мощных вспышек, зарегистрированных за всю историю. При этом произошел выброс корональной массы, и возникшая ударная волна достигла Земли в 09:30 UT 10 сентября, вызвав слабую геомагнитную бурю с внезапным началом около 06:00 UT, которая затем сменилась сильной магнитной бурей 11 сентября с внезапным началом в 01:14 UT. Эта буря, которая продолжалась вплоть до 15 сентября, была вызвана второй ударной волной от следующей вспышки на Солнце. Буря вызвала усиление авроральной активности, нарушение радиосвязи и ионосферную бурю.

На рисунке 1 показано поведение Kp -, AE - и Dst -индексов геомагнитной активности за период времени 9–14 сентября 2005 г. Значения трехчасового индекса геомагнитной активности Kp во время бурь 9, 10 и 11 сентября достигали своих максимальных значений 4.3; 5.7 и 7.7 соответственно. Таким образом, в данной работе рассматриваются ионосферные эффекты следовавших друг за другом геомагнитных бурь: двух слабых бурь 9 и 10 сентября и сильной бури 11 сентября. Следует отметить высокую вспыхечную активность в рассматриваемый период времени, в течение которого произошло 5 вспышек на Солнце (10 сентября в 19:10 UT и в 21:30 UT, 11 сентября в 12:44 UT, 13 сентября в 19:19 UT и 14 сентября в 10:05 UT). Рассматриваемое явление происходило при среднем уровне солнечной активности. При этом индекс солнечной активности $F10.7$ менялся от 101 до 120.

4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численные расчеты ионосферных эффектов последовательности геомагнитных бурь были выполнены с использованием модели ГСМ ТИП [Namgaladze et al., 1988; Намгаладзе и др., 1990], модифицированной в части расчета электрических полей динамо и магнитосферного происхождения [Клименко и др., 2006а, б; Klimentenko et al., 2007].

В качестве начальных условий выбирались значения ионосферных параметров в 06.00 UT 9 сентября 2005 г., рассчитанные для спокойных геомаг-

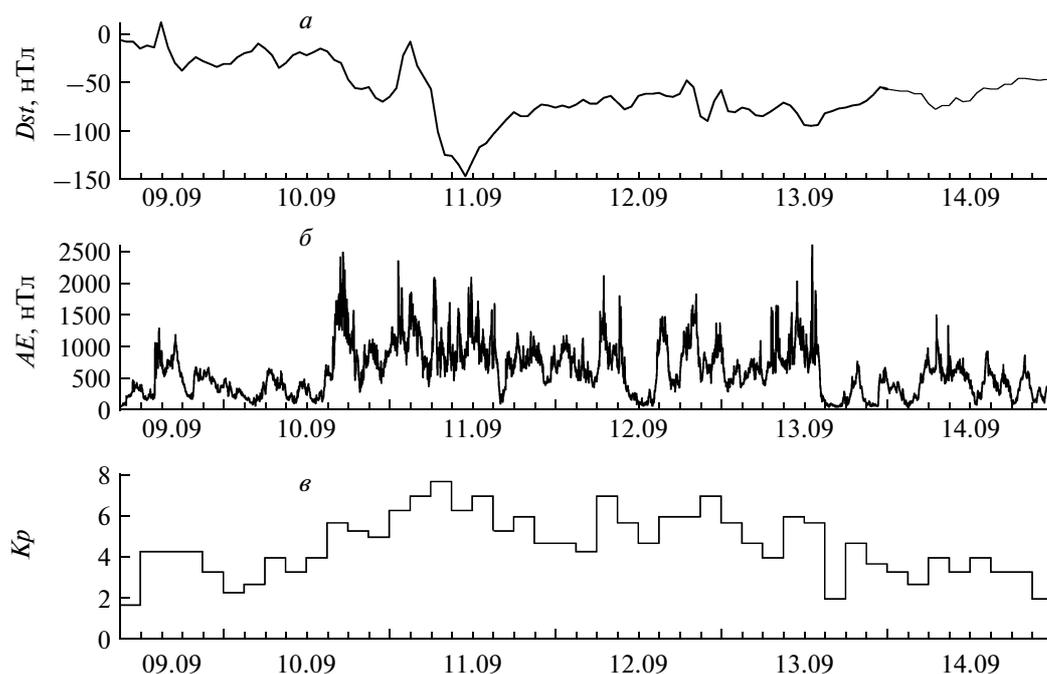


Рис. 1. Поведение Dst - (а), AE - (б) и Kp -индексов (в) геомагнитной активности 9–14 сентября 2005 г.

нитных условий ($Kp = 0.7$). В процессе счета невозмущенного поведения ионосферных параметров с 06:00 UT 9 сентября до 24:00 UT 14 сентября учитывались только изменения от суток к суткам индекса уровня солнечной активности $F10.7$. При этом значение Kp -индекса не менялось, оставаясь равным 0.7. В спокойных условиях разность потенциалов через полярные шапки $\Delta\Phi$ задавалась равной 35.7 кВ на геомагнитных широтах $\pm 75^\circ$, а продольные токи второй зоны j_2 , равные 3×10^{-8} А/м², на геомагнитных широтах $\pm 70^\circ$. При расчете возмущенных условий было проведено большое число численных экспериментов с различным заданием входных параметров модели. После их проведения в окончательном варианте расчетов мы остановились на следующих зависимостях от Kp -индекса геомагнитной активности разности потенциалов через полярные шапки, высыпаний энергичных частиц, амплитуды и широтного сдвига продольных токов второй зоны. Разность потенциалов через полярные шапки задавалась согласно [Feshchenko and Maltsev, 2003] по формуле $\Delta\Phi = 26.4 + 13.3 \times Kp$ (кВ) на геомагнитных широтах $\pm 75^\circ$. При этом не учитывались изменения размеров полярной шапки. Продольные токи второй зоны задавались на основе морфологических представлений [Iijima and Potemra, 1976; Kikuchi et al., 2008] по формуле $j_2 = 2.78 \times 10^{-8} + 0.32 \times 10^{-8} \times Kp$ (А/м²) на геомагнитных широтах: 1) $\pm 70^\circ$ при $Kp \leq 3$; 2) $\pm 65^\circ$ при $3 < Kp \leq 6$; 3) $\pm 60^\circ$ при $6 < Kp$. При этом учитывалась 30-минутная временная за-

держка вариаций токов второй зоны относительно вариаций разности потенциалов через полярные шапки. Высыпания энергичных частиц (потоки и энергия) задавались в соответствии с моделью [Zhang and Paxton, 2008]. Отношение $Flux_{Storm}$ — потока высыпавшихся частиц во время бури к $Flux_{Quiet}$ — потоку высыпавшихся частиц в спокойных условиях выбиралось следующим образом: $Flux_{Storm}/Flux_{Quiet} = 0.55 + 0.64 \times Kp$. При этом задавался поворот максимума высыпаний из полуночного сектора местного времени в утренний во время возмущений и получасовое запаздывание вариаций высыпаний относительно изменений разности потенциалов через полярные шапки.

На рисунке 2 показано поведение во времени разности потенциалов через полярные шапки, амплитуды продольных токов второй зоны и отношения потоков высыпавшихся энергичных частиц $Flux_{Storm}/Flux_{Quiet}$ в выбранном варианте модельных расчетов.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В данном разделе показаны результаты расчетов различных ионосферных параметров над станциями Иркутской долготной цепочки Якутск и Иркутск и над станциями в американском долготном секторе Миллстоун Хилл и Аресибо. Названия и координаты станций представлены в таблице. Мы проводим сравнение результатов расчетов с экспе-

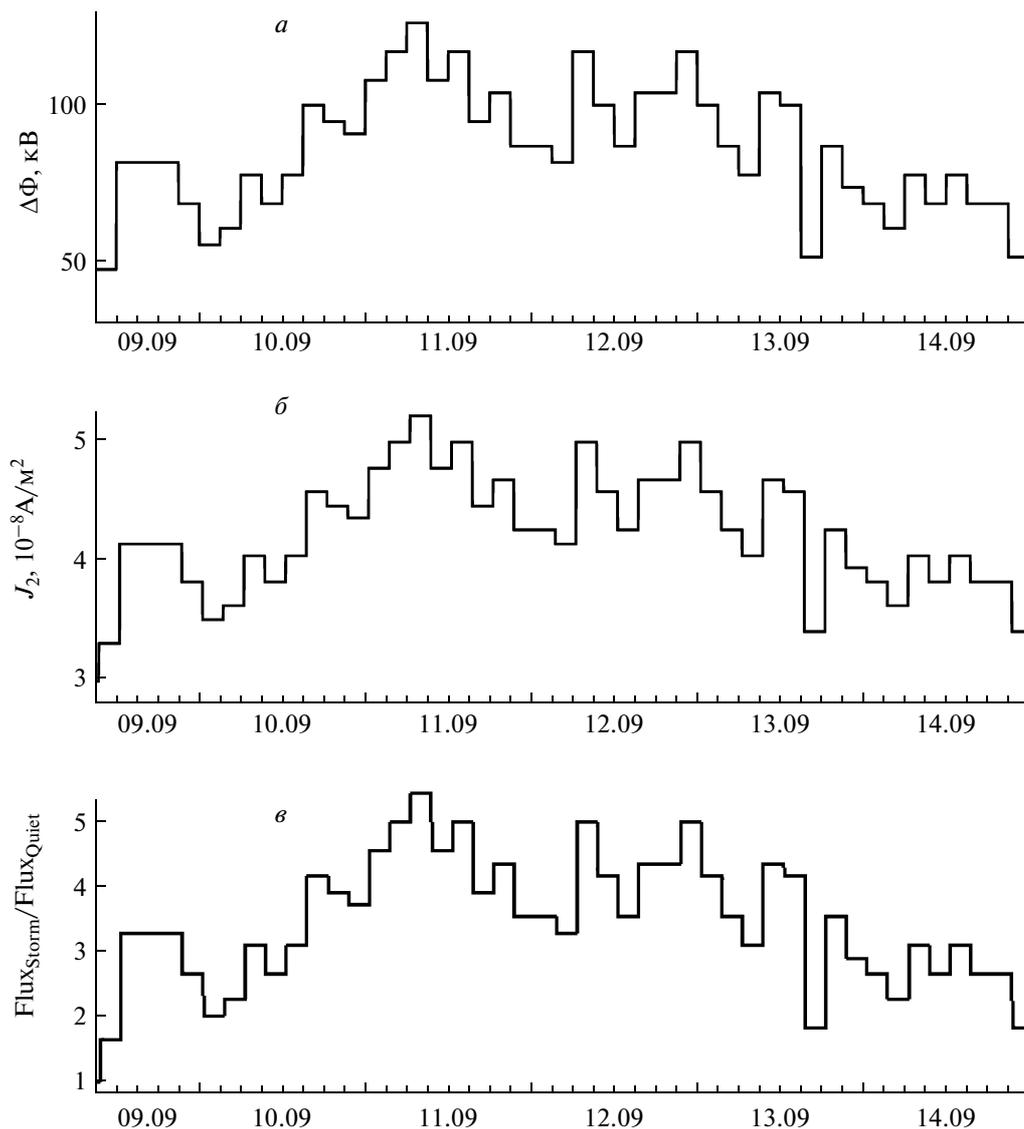


Рис. 2. Поведение входных параметров модели при моделировании ионосферных эффектов последовательности геомагнитных бурь: (а) – разности потенциалов через полярные шапки; (б) – амплитуды продольных токов второй зоны и (е) – отношения потоков высокоэнергичных высыпающихся частиц $Flux_{Storm}/Flux_{Quiet}$.

риментальными данными наземного зондирования ионосферы станциями Иркутской долготной цепочки, и радаров некогерентного рассеяния в Американском долготном секторе.

5.1. Эффекты последовательности бурь в Якутске и Иркутске

На рисунках 3, 4 показано рассчитанное поведение: критической частоты максимума $F2$ -слоя ионо-

Координаты рассматриваемых станций

Станция	Географическая широта	Географическая долгота	Геомагнитная широта	Геомагнитная долгота
Якутск	62.0°N	129.4°E	51.1°	194.2°
Иркутск	52.2°N	104.2°E	40.9°	175.1°
Миллстоун Хилл	42.6°N	71.5°W	54.0°	357.9°
Аресибо	18.3° N	66.8°W	29.7°	3.3°

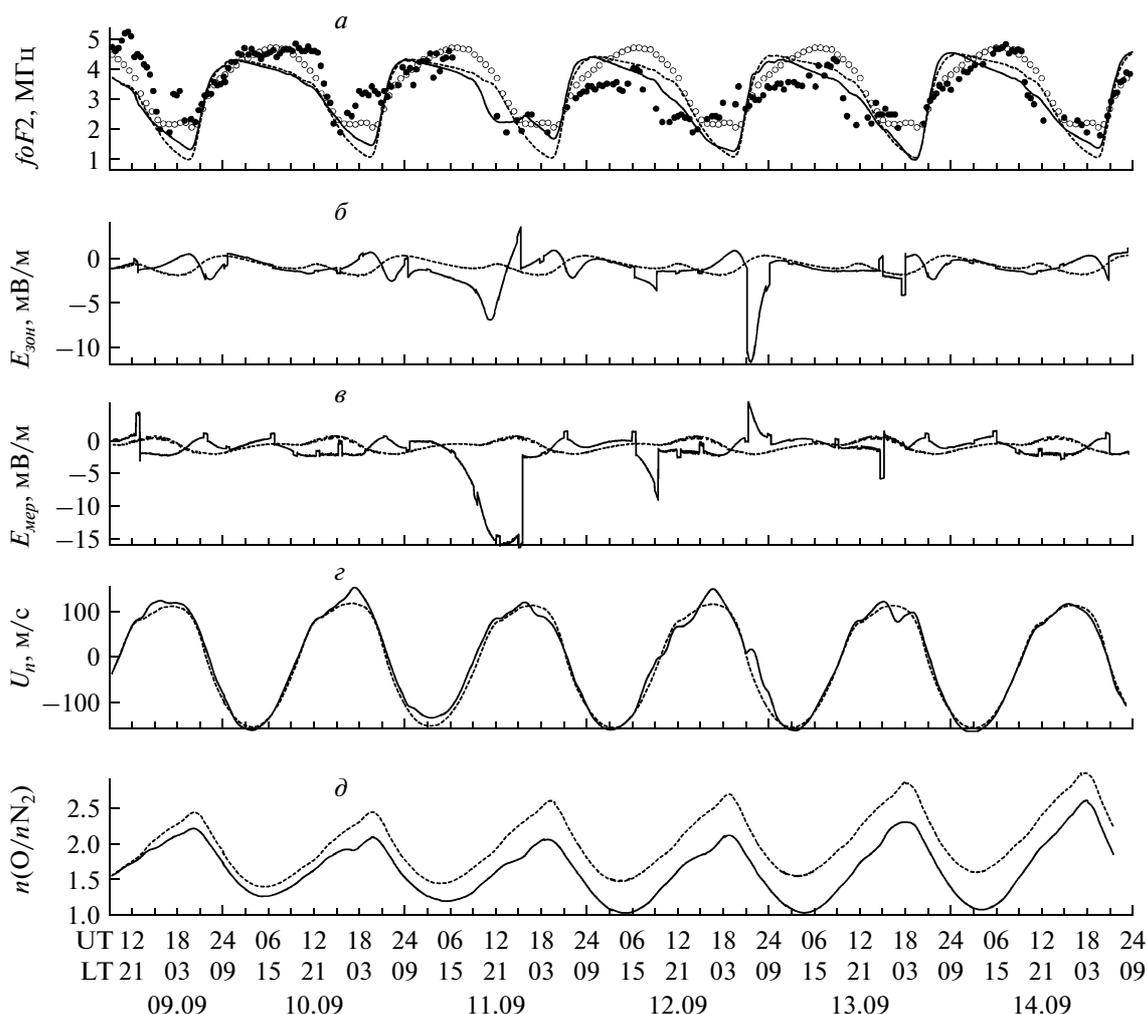


Рис. 3. Поведение: (а) $foF2$; (б) – зональной компоненты электрического поля $E_{зон}$ (положительной в восточном направлении); (в) – меридиональной компоненты электрического поля $E_{мер}$ (положительной в северном направлении); (г) – меридиональной компоненты скорости термосферного ветра, U_n (положительной к экватору) и (д) – отношения $n(O)/n(N_2)$, рассчитанное для спокойных условий (пунктирные линии) и во время последовательности геомагнитных бурь 9–14 сентября 2005 г. (сплошные линии) над ст. Якутск. Светлыми кружками показаны медианные значения, темными – данные наблюдений ионозонда в Якутске в возмущенный период.

сферы, $foF2$, зональной и меридиональной компонент электрического поля, $E_{зон}$ и $E_{мер}$, меридиональной компоненты скорости термосферного ветра, U_n и отношения $n(O)/n(N_2)$ для станций Якутск и Иркутск, соответственно. Кроме того, на верхних графиках этих рисунков нанесены данные наземного зондирования для спокойных и возмущенных условий в Якутске и Иркутске. Из рисунков видно, что в результатах модельных расчетов на Иркутской долготной цепочке станций 9 сентября формируется положительное возмущение $foF2$ в неосвещенное время суток. Согласно данным ионосферного зондирования над ст. Якутск в этот день имеет место рост $foF2$, а над ст. Иркутск после кратковременного понижения $foF2$ следует положительное возмущение. Таким образом, вариации $foF2$ над станциями

Иркутск и Якутск во время геомагнитного возмущения 9 сентября, полученные с использованием модели ГСМ ТИП, удовлетворительно согласуются с данными ионосферного зондирования.

Начиная с 10 сентября в результатах модельных расчетов формируются отрицательные возмущения $foF2$ днем и положительные ночью на Иркутской долготной цепочке станций. При этом результаты модельных расчетов во время последовательности геомагнитных бурь находятся в хорошем согласии с данными Якутского ионозонда, и хуже согласуются с данными Иркутского ионозонда, особенно дневной рост $foF2$ 11 сентября. Возможные причины различий результатов расчетов и наблюдений будут рассмотрены в обсуждении.

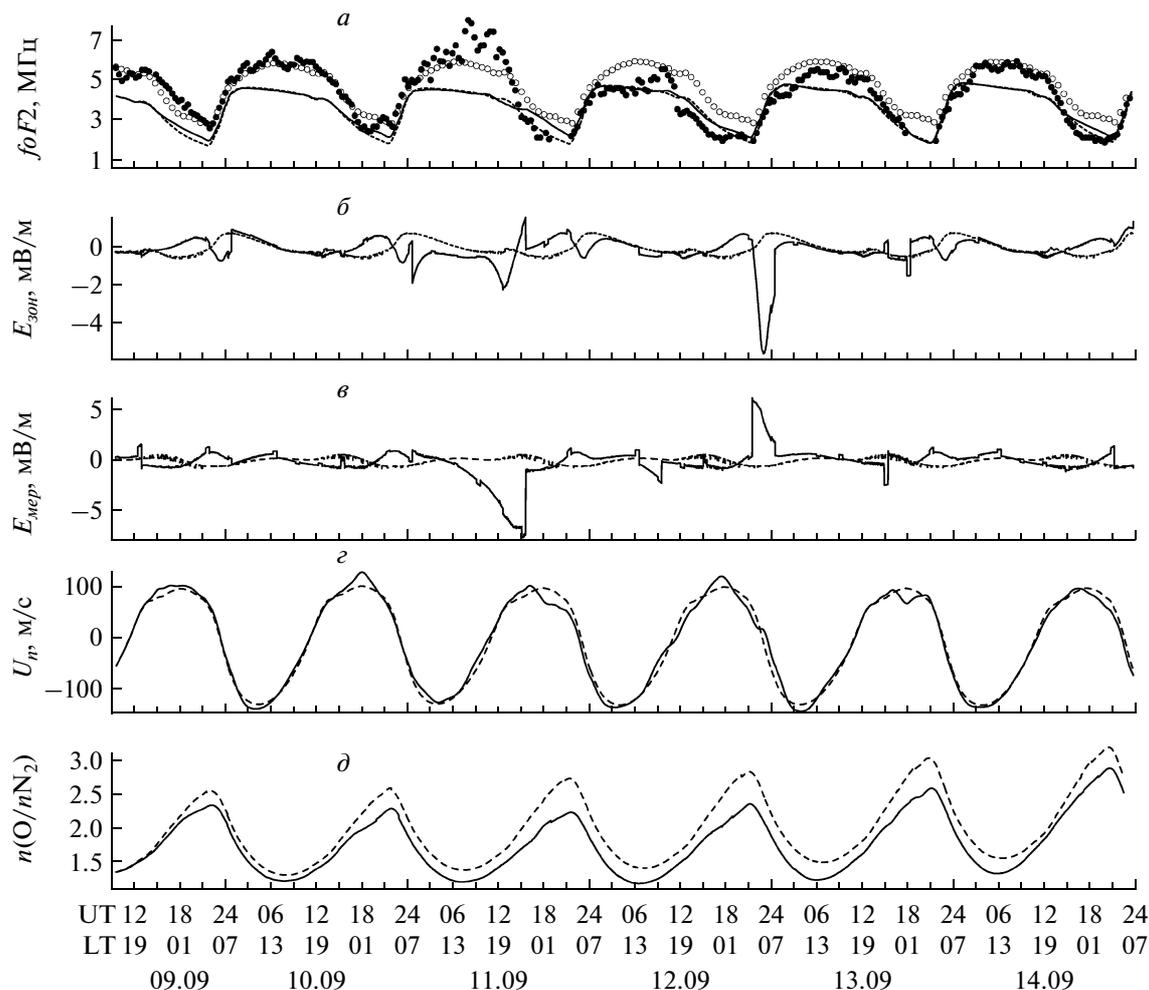


Рис. 4. То же, что на рис. 3, над ст. Иркутск.

Общими чертами возмущений различных ионосферных параметров над Иркутском и Якутском, полученных в модельных расчетах, является : а) в зональной компоненте электрического поля – появление дополнительного восточного поля ночью и западного перед восходом Солнца; б) в меридиональной компоненте электрического поля – появление дополнительного южного поля вечером и ночью и северного – перед восходом Солнца; в) в меридиональной компоненте термосферного ветра – появление дополнительного ветра к экватору в ночное время; г) в составе нейтральной атмосферы – уменьшение отношения $n(O)/n(N_2)$ во время последовательности бурь. При этом следует отметить появление дополнительного западного электрического поля в дневное время 11 сентября, значительное усиление западного поля утром 13 сентября и появление южного электрического поля в дневное время 11 сентября и его значительное усиление в вечернее время.

Основываясь на описанных выше физических механизмах формирования ионосферных возмущений, проведем анализ эффектов в $foF2$, полученных в модельных расчетах для станций Якутск и Иркутск в отдельные моменты времени. Заметим, что эффекты геомагнитных бурь на этих станциях очень похожи между собой как в результатах расчетов, так и в эксперименте. Имеющееся в экспериментальных данных сильное положительное возмущение в $foF2$ в дневное время над Иркутском на первый взгляд отсутствует над станцией Якутск. Однако, следует обратить внимание, что именно в это время экспериментальные данные в возмущенный период над Якутском отсутствуют. Вполне возможно, что такое же положительное возмущение должно было наблюдаться и здесь. К такому выводу мы пришли, обратив внимание на сходство поведения основных возмущающих факторов (вариаций электрического поля, меридиональной компоненты термосферного ветра и состава нейтральной ат-

мосферы), полученных в результатах расчетов над станциями Иркутск и Якутск. Поэтому мы проведем анализ рассчитанного поведения $foF2$ только над станцией Якутск.

В утренние часы 11 сентября с 03:00 до 06:00 LT во время сильной бури над ст. Якутск возникает дополнительное восточное электрическое поле, которое должно было бы приводить к положительным эффектам в $foF2$. В это же время появляется дополнительный ветер к экватору и происходит уменьшение отношения $n(O)/n(N_2)$. И если ветер к экватору должен приводить к росту $foF2$, то уменьшение отношения $n(O)/n(N_2)$ – к ее уменьшению. Поскольку при этом меридиональная компонента электрического поля меняется незначительно, то суммарный эффект будет определяться конкурирующим действием восточного электрического поля и ветра к экватору с одной стороны и изменений состава нейтральной атмосферы с другой. Видно, что при этом $foF2$ возрастает. Это говорит о том, что эффекты зонального электрического поля и меридиональной компоненты термосферного ветра преобладают над эффектами изменения состава нейтральной атмосферы.

В дневное время эта же буря вызывает появление дополнительного западного электрического поля достаточно большой величины и дополнительного ветра к экватору, которые действуют на фоне уменьшенного отношения $n(O)/n(N_2)$. Теперь росту $foF2$ за счет меридиональной компоненты термосферного ветра препятствует понижение $foF2$ под действием западного электрического поля и за счет уменьшения отношения $n(O)/n(N_2)$. При этом меридиональная компонента электрического поля меняется незначительно. Из рисунка 3 видно, что днем 11 сентября формируется небольшое отрицательное возмущение в $foF2$. А это значит, что эффекты западного поля и изменения состава преобладают над эффектами меридиональной компоненты термосферного ветра.

К вечеру 11 сентября, начиная с ~17:00 LT (08:00 UT), буря приводит к появлению дополнительного меридионального электрического поля, направленного к экватору. Это поле со временем усиливается и к ~21:00 LT (12:00 UT) достигает ~15 мВ/м. Оно вызывает дрейф плазмы в F -области ионосферы с запада на восток, что при наличии сильного падения $foF2$ на линии вечернего терминатора должно приводить к росту $foF2$ в послезаходные часы. В это же время происходит усиление дополнительного западного электрического поля. Все это происходит на фоне небольшого дополнительного меридионального ветра к экватору, приводящего к росту $foF2$, который ограничивается уменьшением отношения $n(O)/n(N_2)$. Таким образом, вечером с 17:00 до 21:00 LT формируется сильное отрицательное возмущение в $foF2$ за счет преобладания эффек-

тов западного электрического поля и изменений состава нейтральной атмосферы над эффектами меридиональных компонент термосферного ветра и электрического поля. После этого на фоне сильной южной компоненты электрического поля, которая в ~24:00 LT (15:00 UT) достигает ~16 мВ/м, происходит уменьшение дополнительного западного электрического поля, а затем в ~23:00 LT (16:00 UT) и смена знака зонального электрического поля. Все это происходит на фоне небольшого дополнительного меридионального ветра к экватору, приводящего к росту $foF2$, который ограничивается сильным уменьшением отношения $n(O)/n(N_2)$. В результате совместного действия восточной и южной компонент электрического поля и термосферного ветра к экватору, эффекты которых преобладают над эффектами изменениями состава нейтральной атмосферы, в 24:00 LT происходит смена знака возмущения в $foF2$ с отрицательного на положительный.

С 00:00 до 06:00 LT 12 сентября формируется положительное возмущение в $foF2$ за счет дополнительной восточной компоненты электрического поля, преобладающей над эффектами меридионального ветра к полюсу и изменений состава нейтральной атмосферы. В это же время происходит исчезновение дополнительного электрического поля к экватору. Дневные и вечерние эффекты 12 сентября меньше из-за того, что величина западной и южной компонент дополнительного электрического поля в этом случае значительно меньше, чем 11 сентября. А вот появление большого ~10 мВ/м дополнительного западного электрического поля на восходе 13 сентября совместно с уменьшением отношения $n(O)/n(N_2)$ приводит к отрицательным эффектам в $foF2$. Следует заметить, что эти эффекты были бы еще сильнее, если бы не противодействие со стороны дополнительных меридиональных компонент электрического поля и термосферного ветра.

Эффекты 9, 10 и 14 сентября меньше, чем в остальные дни. При этом основные особенности этих эффектов повторяются.

5.2. Эффекты последовательности бурь в Миллстоун Хилле и Аресибо

На рисунке 5 показано рассчитанное в модели ГСМ ТИП поведение электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя ионосферы, $NmF2$ для станций Миллстоун Хилл и Аресибо. Кроме того, на этом рисунке показаны данные радаров некогерентного рассеяния для спокойных и возмущенных условий в Миллстоун Хилл и Аресибо.

Согласно результатам расчетов в течение всего рассмотренного периода времени над ст. Миллстоун Хилл днем и вечером по местному времени формируются отрицательные возмущения $NmF2$ за исклю-

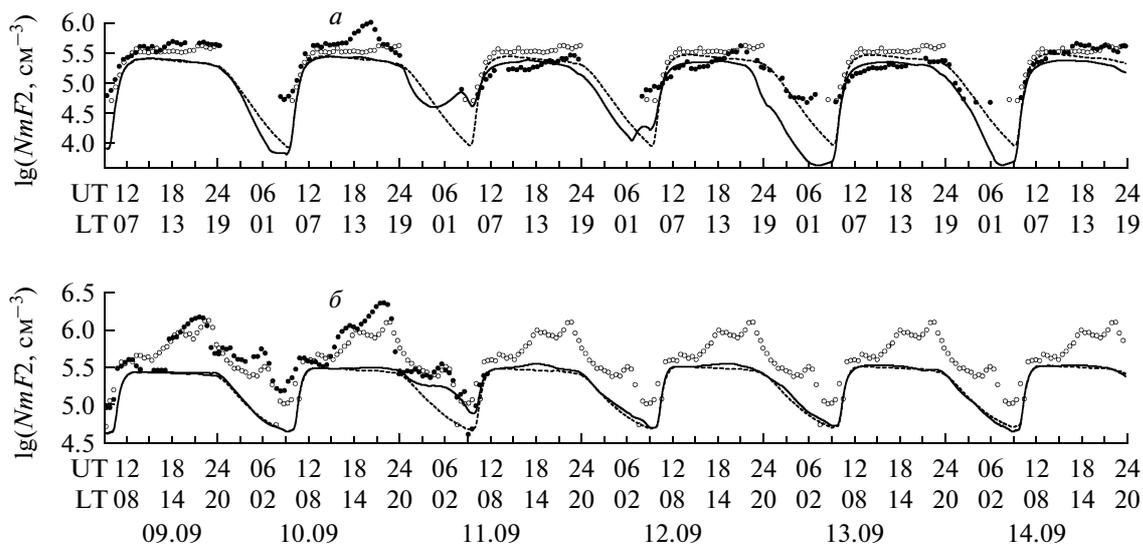


Рис. 5. Поведение десятичного логарифма электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя, $lg(NmF2)$, рассчитанное для спокойных условий (пунктирные линии) и во время последовательности геомагнитных бурь 9–14 сентября 2005 г. (сплошные линии) над станциями (а) – Миллстоун Хилл; (б) – Аресибо. Светлыми кружками показаны данные наблюдений радара некогерентного рассеяния в спокойных условиях 8 сентября 2005 г., темными – в возмущенный период.

чением положительных возмущений днем 9 и 10 сентября. Все эти возмущения наблюдались на радаре некогерентного рассеяния. При этом положительное возмущение $NmF2$ 10 сентября, описанное в работе [Goncharenko et al., 2007], было сильнее, чем 9 сентября. В модельных расчетах в течение всего рассмотренного периода времени ночью формируются отрицательные возмущения $NmF2$, за исключением положительных возмущений в ночь с 10 на 11 сентября и с 11 на 12 сентября. Эти ночные положительные возмущения наблюдались и в эксперименте.

Над ст. Аресибо, в отличие от ст. Миллстоун Хилл, в результатах модельных расчетов в течение всего рассмотренного периода времени, днем формируются положительные возмущения $NmF2$. Эти положительные возмущения наблюдались и в эксперименте 9 и 10 сентября. В модельных расчетах в ночное время формируются положительные возмущения $NmF2$, за исключением отрицательных возмущений в ночь с 13 на 14 сентября. Положительные возмущения в ночное время наблюдались и на радаре некогерентного рассеяния.

Мы провели более детальный анализ ионосферных эффектов, вызванных последовательностью геомагнитных бурь 9 и 10 сентября, над станциями Миллстоун Хилл и Аресибо 10 сентября 2005 г. Кроме того, было проведено сравнение результатов модельных расчетов различных ионосферных параметров с экспериментальными данными.

На рисунке 6 показаны результаты расчетов и экспериментальные данные радара некогерентного рассеяния в Миллстоун Хилл $NmF2$, высоты макси-

муму $F2$ -слоя, $hmF2$, зональной и меридиональной компонент электрического поля, скорости меридиональной компоненты термосферного ветра. Результаты расчетов и наблюдений всех этих ионосферных параметров качественно хорошо согласуются между собой.

Положительное возмущение в $NmF2$ в дневное время меньше, чем в эксперименте, и достигает своего максимума на час раньше. Оно вызвано меридиональной компонентой скорости термосферного ветра, поведение которого показано на рис. 6д. Такой же вывод был сделан в работе [Lu et al., 2008] при модельном описании положительной фазы ионосферной бури 10 сентября. При этом изменение нейтрального состава над станцией Миллстоун Хилл, а именно, уменьшение отношения $n(O)/n(N_2)$, полученное в модельных расчетах, должно приводить к уменьшению электронной концентрации за счет роста скорости потерь. Результирующий эффект определяется конкурирующим действием вариаций термосферного ветра и состава нейтральной атмосферы. При этом вклад вариаций обеих компонент электрического поля в это положительное возмущение в результатах расчетов невелик. В то же время, в эксперименте наблюдались дополнительные восточная и северная компоненты электрического поля, которые в данной ситуации должны приводить к положительному эффекту в $NmF2$.

Согласно результатам расчетов и данным наблюдений возмущения $hmF2$ имеют два пика: предвосходный и дневной. Предвосходный пик связан с ростом восточной компоненты электрического по-

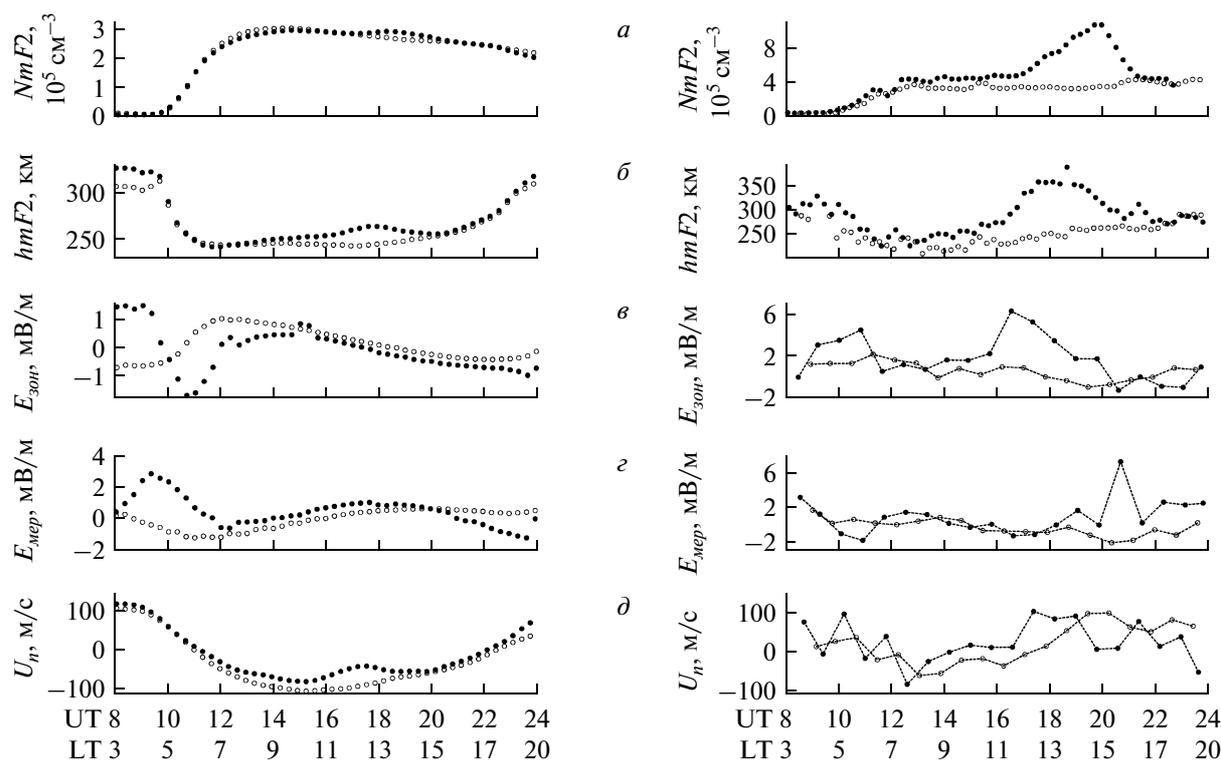


Рис. 6. Поведение над ст. Миллстоун Хилл: (а) — $NmF2$, (б) — высоты максимума $F2$ -слоя, $hmF2$, (в) и (г) — зональной и меридиональной компонент электрического поля, E_{3000} и $E_{мер}$; (д) — меридиональной компоненты скорости термосферного ветра, U_{12} , положительной к экватору. Слева — результаты модельных расчетов, справа — данные наблюдений установки некогерентного рассеяния. Светлые кружки — спокойные условия, темные кружки — буря 10 сентября 2005 г.

ля и ветра к экватору, как в результатах расчетов, так и в эксперименте. Дневной пик в результатах модельных расчетов связан с увеличением меридиональной компоненты термосферного ветра к экватору, а в эксперименте — с совместным действием термосферного ветра к экватору и дополнительного восточного электрического поля.

На рисунке 7 показаны результаты модельных расчетов и экспериментальные данные радара некогерентного рассеяния в Аресибо $NmF2$ и $hmF2$, зональной и меридиональной компонент электрического поля и скорости меридиональной компоненты термосферного ветра. Результаты расчетов и наблюдений, находятся в хорошем качественном согласии.

Положительное возмущение в $NmF2$ так же, как и на ст. в Миллстоун Хилл, вызвано изменениями меридиональной компоненты термосферного ветра. Отличие состоит в том, что противодействие этому положительному эффекту со стороны изменений состава нейтральной атмосферы, как показывают модельные расчеты, минимально. Кроме того, этот положительный эффект усиливается за счет дополнительной восточной компоненты электрического поля.

Согласно результатам расчетов и данным наблюдений возмущения $hmF2$ имеют два пика: предвосходный и дневной. В результатах расчетов оба эти пика связаны с появлением дополнительной меридиональной компоненты термосферного ветра к экватору, действию которой в предвосходные часы препятствует дополнительное западное электрическое поле. В эксперименте свой вклад в подъем $hmF2$ перед восходом вносит дополнительная восточная компонента электрического поля.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных и результатов проведенных нами модельных расчетов ионосферных эффектов последовательности геомагнитных бурь 9–14 сентября 2005 г. показал, что положительные ионосферные возмущения в электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя вызваны, главным образом, меридиональной компонентой термосферного ветра к экватору, которая в отдельные моменты времени может действовать совместно с восточной компонентой электрического поля. Этому положительному эффекту препятствуют изменения состава нейтральной атмосферы, которые в свою очередь являются одним из механизмов фор-

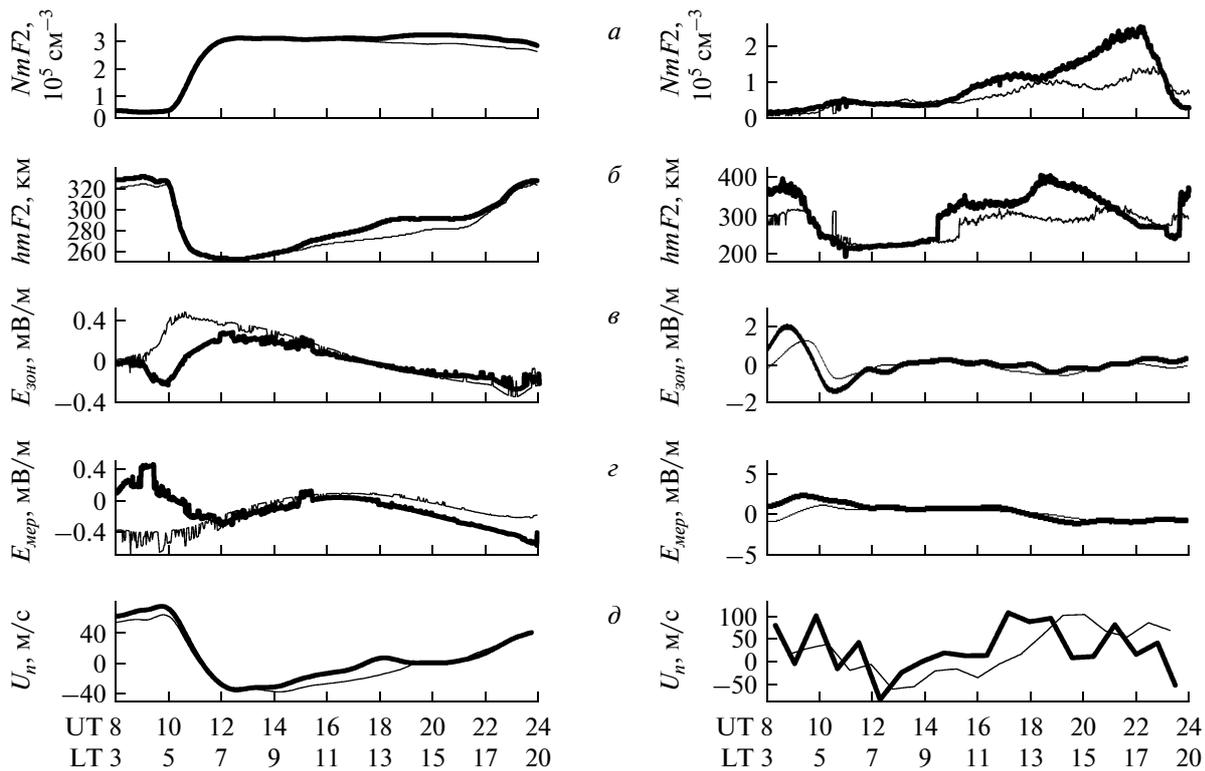


Рис. 7. То же, что на рис. 6, над ст. Аресибо. Тонкие линии – спокойные условия, жирные линии – буря 10 сентября 2005 г.

мирования отрицательных возмущений. Другим механизмом формирования отрицательных ионосферных возмущений является западное электрическое поле. Показано, что в отдельные моменты времени свой вклад, как в отрицательные, так и в положительные возмущения, вносит меридиональная компонента электрического поля.

Сравнение результатов модельных расчетов с экспериментальными данными наземного зондирования ионосферы и радаров некогерентного рассеяния выявило удовлетворительное качественное, а в отдельных случаях и количественное согласие. Обсудим возможные причины различий результатов расчетов и наблюдений. Заметим, что, во-первых, вариации состава нейтральной атмосферы, полученные в расчетах и в эксперименте в Американском долготном секторе несколько отличаются друг от друга. Это хорошо видно из рис. 8, на котором показаны наблюдавшийся в эксперименте и полученный в модельных расчетах широтный ход изменений состава нейтральной атмосферы во время бури 10 сентября. Если во время бури вариации состава нейтральной атмосферы в расчетах и в эксперименте качественно совпадают на широтах северного полушария, больших 40° (отношение $n(O)/n(N_2)$ падает относительно фоновых значений), то на широтах между 40° и экватором в эксперименте наблюдался рост отношения $n(O)/n(N_2)$, тогда как результаты

расчетов показывают уменьшение этого отношения по сравнению со спокойными условиями. Заметим, что если бы модель описывала наблюдавшийся рост отношения $n(O)/n(N_2)$, это привело бы к значительному усилению дневного положительного возмущения над ст. Аресибо и к лучшему согласию с экспериментальными данными.

Во-вторых, изменения таких входных параметров модели, как разность потенциалов через полярные шапки, амплитуда продольных токов второй зоны и интенсивность высыпаний энергичных частиц задавались нами как функции от Kp -индекса геомагнитной активности, который не меняется в течение трех часов, т.е. входные параметры изменялись каждые три часа, оставаясь неизменными в течение последующих трех часов. Тем самым в расчетах мы зачастую пренебрегали учетом нарушения условий экранирования электрического поля магнитосферной конвекции полем Альвеновского слоя. Учет этого нарушения имеет место лишь в первые полчаса каждого трех часов. В дальнейшем предполагается использовать зависимость входных параметров не от Kp -индекса, а от AE -индекса с минутным временным разрешением. Это позволит приблизить результаты расчетов к эксперименту вследствие более корректного описания временно-го развития реально происходящего процесса.

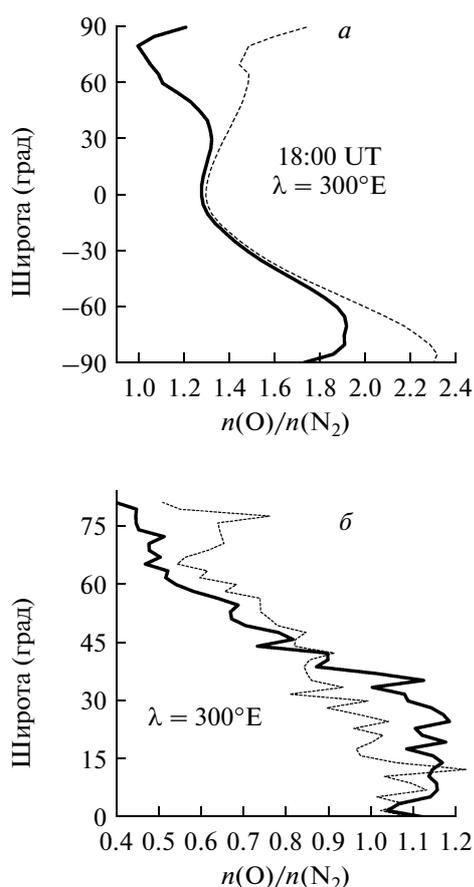


Рис. 8. Широтный ход $n(O)/n(N_2)$: (а) — результаты расчетов; (б) — эксперимент [Goncharenko et al., 2007]. Пунктирные линии — спокойные условия, сплошные жирные линии — буря 10 сентября 2005 г.

В-третьих, использование в модели дипольного геомагнитного поля не позволяет учесть изменений плотности тепловой плазмы при изменении объема плазменных трубок вследствие искажения геометрии реального геомагнитного поля при изменении геомагнитной активности, а именно: сжатие (расширение) силовых линий геомагнитного поля на дневной стороне магнитосферы и расширение (сжатие) на ночной стороне магнитосферы с ростом (уменьшением) геомагнитной активности. Сжатием геомагнитного поля на дневной стороне можно объяснить дополнительный вклад в положительное возмущение электронной концентрации над всеми рассмотренными станциями днем во время бурь. При сжатии уменьшается объем плазменной трубки, что приводит к росту электронной концентрации. Мы полагаем, что именно с дипольным приближением геомагнитного поля в нашей модели связано отсутствие положительных возмущений днем во время сильной магнитной бури 11 сентября над Иркутском и, возможно, над Якутском, а также то, что в результатах модельных расчетов величина положительного возмущения 10 сентября над стан-

циями Миллстоун Хилл и Аресибо существенно меньше, чем по данным радаров некогерентного рассеяния. Заметим также, что дипольное приближение затрудняет учет изменения положений и размеров полярных шапок, которое имеет место во время геомагнитных возмущений. К сожалению, в настоящее время модель ГСМ ТИП не описывает процессы сжатия и расширения плазменных трубок и изменений положений и размеров полярных шапок. Для их учета необходимо вместо дипольного приближения геомагнитного поля использовать реальное геомагнитное поле.

И, наконец, в-четвертых, проведенные нами в последнее время модельные расчеты ионосферных эффектов солнечных вспышек позволяют утверждать, что их учет в рассматриваемый период времени с 9 по 14 сентября 2005 г. может улучшить описание поведения электронной концентрации в максимуме F_2 -слоя. Мы планируем провести расчеты с учетом эффектов пяти солнечных вспышек, которые наблюдались в рассматриваемый период времени. Мы надеемся, что устранение отмеченных недостатков в постановке задачи позволит приблизить ре-

зультаты расчетов к экспериментальным данным, полученным на станциях Иркутск, Якутск, Миллстоун Хилл и Аресибо.

Несмотря на отмеченные недостатки в постановке задачи, следует отметить, что даже в этом случае нам удалось получить качественное согласие с экспериментальными данными [Goncharenko et al., 2007] и подтвердить выводы, сделанные другими авторами на основании модельных расчетов относительно механизмов формирования ионосферных возмущений во время бури 10 сентября 2005 г. [Lu et al., 2008].

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данном исследовании рассмотрены результаты модельных расчетов ионосферных эффектов в электронной концентрации в максимуме F_2 -слоя, временных вариаций разности потенциалов через полярные шапки, высыпаний энергичных частиц и продольных токов второй зоны, связанных с последовательностью геомагнитных бурь.

2. Сравнение результатов расчетов на модели ГСМ ТИП различных ионосферных параметров качественно удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными ионосферного зондирования над станциями Якутск и Иркутск, а также радаров некогерентного рассеяния в Миллстоун Хилле и Аресибо.

3. Проведен анализ полученных результатов модельных расчетов вариаций электронной концентрации в максимуме F_2 -слоя, основанный на возможных основных физических механизмах формирования ионосферных возмущений во время последовательности геомагнитных бурь.

4. Причинами различий результатов расчетов и наблюдений могут являться использование 3-часового K_p -индекса геомагнитной активности при моделировании временной зависимости входных параметров модели, использование дипольного приближения геомагнитного поля и отсутствие в модельных расчетах эффектов солнечных вспышек, имевших место в рассматриваемый период времени.

Авторы выражают глубокую признательность и благодарность команде GUVI, сотрудникам Якутского и Иркутского цифровых ионозондов DPS-4 и командам радаров некогерентного рассеяния в Аресибо и в Миллстоун Хилле за обработку экспериментальных данных и за любезное предоставление доступа к ним. Авторы также выражают огромную благодарность уважаемому рецензенту за положительную оценку нашей скромной работы.

Работа поддержана грантом РФФИ № 08-05-00274.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 527 с. 1988.
- Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Динамо поле и экваториальный электроджет // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 46. № 4. С. 485–494. 2006а.
- Клименко М.В., Клименко В.В. Численное моделирование эффектов магнитосферной конвекции, высыпаний и продольных токов второй зоны во время последовательности геомагнитных бурь 9–14 сентября 2005 г. // Изв. КГТУ. Калининград, ФГОУ ВПО КГТУ. № 16. С. 220–228. 2009.
- Клименко В.В., Клименко М.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Постановка задачи и тестовые расчеты // Математическое моделирование. Т. 18. № 3. С. 77–92. 2006б.
- Клименко В.В., Намгаладзе А.А. Ионосферные эффекты меридиональных электрических полей // Вариации ионосферы во время магнитосферных возмущений. С. 3–10. М.: Наука, 1980.
- Намгаладзе А.А., Захаров Л.П., Намгаладзе А.Н. Численное моделирование ионосферных бурь // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 21. № 2. С. 259–265. 1981.
- Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глуценко Т.А., Наумова Н.М. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 30. № 4. С. 612–619. 1990.
- Feshchenko E. Yu., Maltsev Yu. P. Relations of the polar cap voltage to the geophysical activity // Proc. XXVI Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, February 25–28, 2003. Apatity: PGI KSC RAS. P. 59–61. 2003.
- Förster M., Namgaladze A.A., Yurik R. Y. Thermospheric composition changes deduced from geomagnetic storm modeling // Geophys. Res. Lett. V. 26. № 16. P. 2625–2628. 1999.
- Fuller-Rowell T., Codrescu M., Maruyama N., Fredrizzi M., Araujo-Pradere E., Sazykin S., Bust G. Observed and modeled thermosphere and ionosphere response to superstorms // Radio Sci. V. 42. № 4. doi: 10.1029/2005RS003392. 2007.
- Fuller-Rowell T., Millward G. H., Richmond A. D., Codrescu M. Storm-time changes in the upper atmosphere at low latitudes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. № 12. P. 1383–1391. 2002.
- Fuller-Rowell T. J., Richmond A. D., Maruyama N. Global Modeling of Storm-Time Thermospheric Dynamics and Electrodynamics // Geophysical monograph. V. 181. P. 187–200. 2008.
- Goncharenko L. P., Foster J. C., Coster A. J., Huang C., Aponte N., Paxton L. J. Observations of a positive storm phase on September 10, 2005 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 69. P. 1253–1272. 2007.
- Huang, C.-M., Richmond A. D., Chen M.-Q. Theoretical effects of geomagnetic activity on low-latitude ionospheric electric fields // J. Geophys. Res. V. 110. № A5. doi: 10.1029/2004JA010994. 2005.
- Iijima T., Potemra T. A. Field-Aligned Currents in the Dayside Cusp Observed by Triad // J. Geophys. Res. V. 81. № 34. P. 5971–5979. 1976.

- *Kikuchi T., Hasimoto K.K., Nozaki K.* Penetration of magnetospheric electric fields to the equator during a geomagnetic storm // *J. Geophys. Res.* V. 113. № A6. doi: 10.1029/2007JA012628. 2008.
- *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bryukhanov V.V.* Numerical modeling of the equatorial electrojet UT-variation on the basis of the model GSM TIP // *Adv. Radio Science.* V. 5. P. 385–392. 2007.
- *Lei J., Wang W., Burns A.G., Solomon S.C., Richmond A.D., Wiltberger M., Goncharenko L.P., Coster A., and Reinisch B.W.* Observations and simulations of the ionospheric and thermospheric response to the December 2006 geomagnetic storm: Initial phase // *J. Geophys. Res.* V. 113. № A1. doi:10.1029/2007JA012807. 2008.
- *Lu G., Goncharenko L.P., Richmond A.D., Roble R.G., Aponte N.* A dayside ionospheric positive storm phase driven by neutral winds // *J. Geophys. Res.* V. 113. № A8. doi:10.1029/2007JA012895. 2008.
- *Maeda S., Fuller-Rowell T.J., Evans D.S.* Zonally Averaged Dynamical and Compositional Response of the Thermosphere to Auroral Activity During September 18–24, 1984 // *J. Geophys. Res.* V. 94. № A12. P. 16869–16883. 1989.
- *Maruyama N., Richmond A.D., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Sazykin S., Toffoletto F.R., Spiro R.W., Millward G.H.* Interaction between direct penetration and disturbance dynamo electric fields in the storm-time equatorial ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* V. 32. № 17. doi: 10.1029/2005GL023763. 2005.
- *Mayr H.G., Hedin A.E.* Significance of Large-Scale Circulation in Magnetic Storm Characteristics With Application to AE-C Neutral Composition Data // *J. Geophys. Res.* V. 82. № 7. P. 1227–1234. 1977.
- *Mayr H.G., Volland H.* Magnetic Storm Characteristics of the Thermosphere // *J. Geophys. Res.* V. 78. № 13. P. 2251–2264. 1973.
- *Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushenko T.A., Naumova N.M.* Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // *Pure and Applied Geophysics (PAGEOPH).* V. 127. № 2/3. P. 219–254. 1988.
- *Reddy C.A., Mayr H.G.* Storm-time penetration to low latitudes of magnetospheric-ionospheric convection and convection-driven thermospheric winds // *Geophys. Res. Lett.* V. 25. № 16. P. 3075–3078. 1998.
- *Sojka J.J., Schunk R.W., Denig W.F.* Ionospheric response to the sustained high geomagnetic activity during the March '89 great storm // *J. Geophys. Res.* V. 99. № A11. P. 21341–21352. 1994.
- *Wang W., Lei J., Burns A.G., Wiltberger M., Richmond A.D., Solomon S.C., Killeen T.L., Talaat E.R., Anderson D.N.* Ionospheric electric field variations during a geomagnetic storm simulated by a coupled magnetosphere ionosphere thermosphere model (CMIT) // *Geophys. Res. Lett.* V. 35. № 18. doi:10.1029/2008GL035155. 2008.
- *Zhang Y., Paxton L.J.* An empirical K_p -dependent global auroral model based on TIMED/GUVI FUV data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 70. P. 1231–1242. 2008.