УДК 551.510.535

РЕАКЦИЯ ОБЛАСТИ F НА ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ (ОБЗОР)

А.Д. Данилов

Реакция области F ионосферы на геомагнитные бури, обычно называемая ионосферной бурей, представляет собой весьма сложное явление. Она состоит из так называемых положительной и отрицательной фаз, поведение которых является очень сложным и в пространстве и во времени. Основные морфологические особенности ионосферных бурь и главные процессы, контролирующие их поведение, были поняты в конце 90-х годов и описаны в серии обзорных статей. В течение предыдущего десятилетия появилось много публикаций, посвященных проблеме ионосферных бурь. В данной статье кратко суммируется концепция морфологии и физики ионосферной бури сформулированная в конце 90-х годов и описываются наиболее интересные результаты, полученные в 2000-х годах. Показано, что основными особенностями исследований прошлого десятилетия были: использование данных GPS TEC (полное содержание электронов, ПСЭ) для анализа морфологии ионосферных бурь, привлечение сложных теоретических моделей для изучения процессов, контролирующих поведение ионосферы в возмущенных условиях, и акцент на анализе поведения ионосферы во время выдающихся событий (очень сильные и сверхсильные геомагнитные бури). Особое внимание уделялось также предбуревым возрастаниям foF2 и ПСЭ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, ПЛАЗМОСФЕРА, TEC, ПЭС, БУРЯ

1. ВВЕДЕНИЕ

Земная ионосфера реагирует на изменения геомагнитной обстановки (геомагнитные бури и суббури). Эта реакция различна для различных ионосферных областей. Например, реакция ионосферного слоя F2 отличается от реакции нижней ионосферы. Различие вызвано различием в физических механизмах, определяющих изменения электронной концентрации. В областях E и D основной причиной изменения электронной концентрации N_e является изменение скорости ионизации из-за корпускулярных вторжений, тогда как во время геомагнитных возмущений нет заметных изменений интенсивности источника ионизации в области F, и поэтому вариации электронной концентрации вызываются косвенными факторами - нейтральным составом и динамическими процессами (см. Danilov and Laštovička (2001)).

Имеется также и другое различие в поведении электронной концентрации во время геомагнитных возмущений в разных ионосферных областях. Все «возмущения» в нижней ионосфере (послебуревой эффект, авроральное поглощение, ППШ) представляют собой увеличение N_e по сравнению с некоторым спокойным уровнем. В отличие от этого, реакция слоя F2 на геомагнитные возмущения (так называемая ионосферная буря) состоит из эффектов обоих знаков. Во время таких бурь наблюдаются как понижение, так и рост N_e относительно фонового уровня, и их часто называют, соответственно, «положительной» и «отрицательной» фазами бури.

В этой статье рассматриваются сегодняшние взгляды на бури в ионосферной области F. За информацией о реакции более низких ионосферных слоев мы отсылаем читателя к статьям Danilov and Laštovička (2001), Fuller-Rowell et al. (1994), Buresova and Laštovička (2008), and Mikhailov (2010) и ссылкам в них.

Морфология бурь в области F весьма сложна. Реакция ионосферы, наблюдаемая на разных ионосферных станциях, может быть очень различна во время одной и той же бури в зависимости от координат станции, местного времени начала магнитного возмущения и некоторых других параметров. Глобальное распределение эффектов ионосферной бури также весьма сложно и существенно меняется от одной бури к другой.

Морфология и физика ионосферных бурь исследовалась многократно. Не смотря на сложную картину поведения слоя F2 во время бурь, упомянутую выше, в середине 90-х годов общая картина этого поведения была нарисована и описана в обзорных статьях (Prolls (1995), Rees (1995), Buonsanto (1999), Danilov (2001), and Danilov and Laštovička (2001)). В этих ста-

Данилов Алексей Дмитриевич, ФГБУ"ИПГ", заведующий лабораторией, 8(499)1814511, adanilov99@mail.ru

тьях была представлена достаточно «сглаженная» картина реакции области F и термосферы на геомагнитные возмущения.

С тех пор проблема поведения ионосферы во время геомагнитных бурь рассматривалась в многочисленных публикациях. Они содержали много исследований конкретных бурь (case studies) или результаты численного моделирования поведения ионосферы в течение конкретной бури, либо и то и другое. Эти статьи рассматриваются в параграфах, приведенных ниже. Здесь мы упомянем только подробный и большой по объему обзор Mendillo (2006), посвященный проявлениям бурь в полном содержании электронов (ПСЭ). Этой обзор суммирует предыдущие исследования, описывает статистические особенности проявления бурь и указывает на ответственные за них механизмы, найденные путем моделирования. В обзоре представлены результаты исследования возмущений ПСЭ в периоды 180 геомагнитных бурь и описываются сезонные и связанные с солнечным циклом эффекты в ПСЭ. Обзор заканчивается перечнем открытых вопросов, которые требуют дополнительных исследований.

Ионосферная буря обычно проявляется в вариациях электронной концентрации в широком интервале высот от примерно 200 до 800-1000 км. Основные черты таких бурь обычно проявляются и в поведении ПСЭ, наблюдаемом с помощью различных спутниковых навигационных систем.

Реакция слоя F2 на геомагнитные возмущения обычно описывается двумя способами. Рассматривается либо абсолютная разница между foF2 (или высоты слоя F2, hmF2) в течение периода бури и в выбранные спокойные дни (или месячной медианы) ΔfoF2 в МГц (ΔhmF2 в км), либо относительная разница в процентах между теми же самыми параметрами

$$\delta foF2 = \{foF2(набл)-foF2(мед)\}/foF2(мед).$$
$$\delta hmF2 = \{hmF2(обс)-hmF2(мед)\}/hmF2(мед).$$

Поведение δfoF2 со временем в течение ионосферной бури состоит обычно из нескольких периодов с положительными величинами (положительные фазы бури) и отрицательными величинами (отрицательные фазы). Примеры поведения δfoF2 можно найти повсюду (см., например Рис. 1 в Danilov (2001)). Морфология отрицательной и положительной фаз ионосферной бури различны, поскольку считается, что различны основные физические механизмы, ответственные за их формирование.

Прежде, чем переходить к результатам публикаций последнего десятилетия, мы опишем кратко принципиальную картину ионосферных бурь так, как она представлялась в конце 90-х годов и была описана в обзорах, упоминавшихся выше (Prolls, 1995; Rees, 1995; Buonsanto, 1999; Danilov, 2001; Danilov and Laštovička, 2001). Более поздние результаты будут сравниваться с этой картиной.

2. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА

2.1 Морфология

В высоких и средних широтах отрицательная фаза ионосферной бури наблюдается наиболее часто. Она также боле опасна для распространения КВ радиоволн чем положительная фаза, поскольку сужает интервал применимых радио частот в системах радиосвязи.

Одной из существенных особенностей отрицательной фазы является ее направленный к экватору дрейф во время бури от авроральных широт к средним. Амплитуда эффекта (максимальная абсолютная величина δfoF2) уменьшается по мере этого дрейфа. Чем меньше геомагнитная широта станции Ф, тем больше задержка ΔT начала отрицательной фазы относительно начала магнитного возмущения и тем меньше максимальная амплитуда δfoF2. Скорость направленного к экватору дрейфа отрицательной фазы согласно различным оценкам составляет примерно 50-300 м/с (Данилов и Белик, 1991).

Это проникновение отрицательной фазы к экватору демонстрирует сезонный ход. В летнем полушарии в течение одной и той же бури отрицательная фаза выражена лучше и ее дрейф прослеживается до более низких широт, чем в зимнем полушарии (Prolls, 1995; Field et al., 1998).

Отрицательная фаза в большинстве случаев проявляет хорошо выраженную зависимость от интенсивности магнитного возмущения, описываемой различными геомагнитными индексами. Наиболее ярко выраженная зависимость наблюдается от индекса *AE* (пример зависимости максимальной интенсивности отрицательной фазы I_{max} от этого индекса можно найти в работе Данилова и Белик (1991)). Сообщалось также и о зависимости I_{max} от *Kp*, *Dst* и *Ap* индексов (см. ссылки в работе Данилова и Белик (1991)).

В течение 2000-х годов стал часто использоваться индекс *SYM-H*. Этот индекс представ-

ляет собой геомагнитный индекс, который основывается на данных различных наземных магнитометрических станций. От традиционного индекса *Dst*, используемого в исследованиях бурь, *SYM-H* отличается использованием минутных, а не часовых значений и слегка отличным выбором станций (Wanliss and Dobias, 2007). Если отвлечься от этих отличий, оба индекса легко заменяют друг друга в прикладном плане (Wanliss and Showalter, 2006).

Проблема использования различных геомагнитных индексов для описания поведения ионосферы в период геомагнитных бурь очень сложна. Она выходит за рамки данного обзора, и мы отсылаем читателей к публикациям, посвященным этой проблеме (Burton et al., 1975; Kalegaev et al. 2005; Калегаев и Макаренков, 2006; Troshichev and Janzhura, 2009) и ссылкам в них. Здесь мы будем, главным образом, использовать (как это делается в большинстве публикаций, посвященных ионосферным бурям) индекс *Dst* как индикатор интенсивности и развития магнитного возмущения

Магнитная буря представляет собой редкое явление. Например, в период с августа 1958 г. по декабрь 1979 произошло 10 интенсивных (Dst_{min} > -100 нТ), 40 умеренных (-100 ≤ Dst_{min} ≤ -50 нТ) и 62 слабых (-50 ≤ Dst_{min} ≤ -30 нТ) бури. Здесь Dst_{min} - пиковое (максимальное по амплитуде) отрицательное значение *Dst* (Gonzalez et al., 1999). Интенсивные бури подразделяются на сильные (-200 ≤ Dst_{min} ≤ -100 нТ), очень сильные (-350 ≤ Dst_{min} ≤ -200 нТ) и выдающиеся (Dst_{min} ≤ -350 нТ). Очень сильные и выдающиеся магнитные бури происходят в среднем раз в год и раз в 10-12 лет, соответственно. Самая сильная за период измерений индекса *Dst* (с 1957 г.) магнитная буря произошла 14 марта 1989 г., когда величина индекса Dst_{min} опускалась до -548 нТ. В течение первого десятилетия 2000-х годов произошло несколько очень сильных и выдающихся бурь, и они стали объектом очень интенсивных исследований (см. ниже).

Морфология положительной фазы еще более сложна, что говорит о более сложных физических процессах ее формирования. Однако, некоторые особенности можно указать. Положительная фаза иногда наблюдается за несколько часов до начала магнитного возмущения, которое считается причиной данной ионосферной бури (Данилов и Белик, 1991). Эта проблема будет подробно рассмотрена в параграфе 3.3.

Отрицательная фаза почти всегда наблюдается в высоких широтах и примерно так же часто, как положительная фаза, в средних широтах, тогда как положительная фаза имеет тенденцию к появлению в средних и низких широтах. Что касается сезонного эффекта, то отрицательная фаза появляется во все сезоны, кроме зимы, когда более вероятна положительная фаза.

Во время магнитных возмущений в экваториальных широтах в большинстве случаев (90%) наблюдается положительная фаза (Adeniyi, 1986; Mikhailov et al., 1994). Но во время выдающихся возмущений там может наблюдаться отрицательная фаза (Adeniyi, 1986; Turunen, 1980). Таблица 1 (из работы Михайлова (2010)) показывает вероятность появления отрицательной и положительных ионосферных возмущений в зависимости от местного времени и солнечной активности. В таблице 1 приведены результаты обработки всех возмущений, наблюдавшихся в течение 47-летнего периода (1949-1996 гг.) на станции Слау. Сглаженное 12-месячное число Вольфа используется как индикатор солнечной активности: низкой (R_{12} < 50), умеренной (R_{12} = 50-100) и высокой (R_{12} > 100).

Таблица 1. Процент общего числа положительных и отрицательных возмущений для тех уровней солнечной активности и различных LT начала возмущений согласно Михайлову [2010].

Интервал LT	Отрицательные возмущения			Положительные возмущения		
	Низкая СА	Умерен. СА	Высокая СА	Низкая СА	Умерен. СА	Высокая СА
00-04	36.6	34.0	32.0	25.5	21.3	21.3
05-08	19.5	16.6	12.6	26.0	18.4	12.6
09-15	13.4	13.2	9.0	13.6	19.4	18.2
16-20	17.0	21.3	25.4	23.8	28.6	34.6
21-23	13.6	15.0	21.1	10.9	12.3	13.2
Всего	1541	1916	2016	1136	1491	1558

2.2 Физические механизмы

Со времени первого предположения Ситона (Seaton (1956)) считалось, что отрицательная фаза вызвана изменениями состава термосферного газа из-за нагрева термосферы во время геомагнитных возмущений. Электронная концентрация в максимуме слоя F2, грубо говоря, пропорциональна отношению $[O]/[N_2]$ (Rishbeth and Barron, 1960) (мы отсылаем читателя за более точным соотношением к работам Mikhailov et al., (1989, 1995)). Это означает, что при прочих неизменных условиях мы должны иметь понижение N_e (отрицательная фаза) во всех областях, где $[O]/[N_2]$ уменьшилось на высотах области F.

Prolls and von Zahn (1974) показали, что наблюдается близкое соотношение между отношением $[O]/[N_2]$, измеренным на спутнике ESRO 4, и электронной концентрацией в максимуме слоя F2, измеренной на нескольких ионосферных станциях. Prolls (1980) сравнил вариации N_e и $[O]/[N_2]$ над несколькими ионосферными станциями и показал, что вариации обоих параметров весьма близки, хотя и различаются для разных станций.

Причина изменений термосферного состава (уменьшение $[O]/[N_2]$) совершенно ясна. Во время геомагнитных возмущений происходит нагрев нижней части термосферы (100-140 км) в авроральной области. Главным источником этого нагрева является джоулева диссипация токов, но некоторый вклад может вносить также поглощение высыпающихся частиц (Prolls, 1995).

Нагрев должен вести к немедленному уменьшению отношения атомы-молекулы во всей толще термосферы в высокоширотной области. Если бы динамический режим термосферы оставался неизменным во время магнитных возмущений, зона пониженного $[O]/[N_2]$ (и, следовательно, и N_e, и foF2) оставалась бы ограниченной высокоширотной ионосферой (приблизительно авроральным овалом). Но нагрев индуцирует свою собственную циркуляцию (которая может «конфликтовать» с «регулярной» циркуляцией, см. ниже), и на высотах слоя F2 она стремится перенести воздух в направлении экватора в более низкие широты. Это, в простейшей аппроксимации, приводит к упомянутому выше дрейфу отрицательной фазы в сторону более низких широт.

Направленная к экватору экспансия возмущения нейтрального состава термосферы в основном происходит в послеполуночном секторе во время главной фазы бури из-за уменьшения ионного трения и направленного к экватору фонового ветра в послеполуночном секторе (Prolls, 1995).

Необходимо отметить здесь, что нагретый газ с уменьшенным отношением $[O]/[N_2]$ обладает в термосфере более высокой температурой. Уменьшение T приводит на высотах области F к увеличению линейного коэффициента рекомбинации (из-за специфической зависимости константы скорости реакции $O^+ + N_2$ от T эффект будет сильнее летом) и таким образом к дальнейшему уменьшению N_e (Mikhailov et al., 1995). Таким образом, отрицательная фаза образуется в нагретом термосферном газе благодаря двум факторам: уменьшение $[O]/[N_2]$ и увеличение температуры (Mikhailov and Forster, 1997).

Широтное проникновение отрицательной фазы согласно описанной простой схеме должно различаться в освещенном Солнцем и ночном временных секторах зимней ионосферы. Индуцированная бурей циркуляция направлена от полюса к экватору. Зимой она противоположна дневной фоновой (индуцированной солнечным нагревом) термосферной циркуляции, которая направлена от экватора к полюсу. Это приводит к эффекту «остановки» направленного к экватору дрейфа отрицательной фазы, и область развития отрицательной фазы оказывается, таким образом, ограничена высокими широтами.

В ночной период обе циркуляции (фоновая и индуцированная бурей) совпадают (обе направлены к экватору) и таким образом воздух с возмущенным (пониженным) отношением $[O]/[N_2]$ распространяется до гораздо более низких широт, чем в дневное время. Это приводит к достаточно частому появлению отрицательной фазы на средних широтах зимней ночью.

Летом фоновая циркуляция все сутки направлена к экватору и такиv образом совпадает с циркуляцией, индуцированной бурей. Это благоприятствует проникновению воздуха с уменьшенным отношением $[O]/[N_2]$ (и увеличенной температурой T) в средние широты, и таким образом летом отрицательная фаза часто наблюдается на средних широтах и днем и ночью.

Была дискуссия о роли колебательно возбужденного азота в формировании отрицательной фазы. Дело в том, что из-за нескольких факторов, включая увеличение температуры, на высотах слоя F2 возможно увеличение колебательной температуры молекулярного азота

$T(N_2^{\#})$. Это увеличение должно приводить к сильной интенсификации реакции $O^+ + N_2$ и, таким образом, к существенному уменьшению электронной концентрации. Некоторые авторы (см, например, Pavlov (1994), Pavlov and Buonsanto (1997)) утверждали, что этот процесс играет существенную роль в формировании отрицательной фазы. Однако все еще нет прямых подтверждений того, что увеличение $T(N_2^{\#})$ действительно происходит. С другой стороны, во многих исследованиях конкретных событий (Mikhailov et al., 1994, 1995; Mikhailov and Schlegel 1998; Mikhailov and Forster, 1997) основные особенности исследованных бурь (включая выдающиеся события) были успешно объяснены без каких-либо предположений о росте $T(N_2^{\#})$.

Было предложено несколько механизмов как возможных источников положительной фазы ионосферных бурь (Danilov and Belik, 1992; Prolls, 1995). Это: подъем слоя F2 из-за вертикального дрейфа, потоки плазмы из плазмосферы, и «даунвеллинг» газа в результате индуцированной бурей термосферной циркуляции.

Дрейф слоя F2 может быть вызван двумя основными причинами: усиление электрических полей магнитосферного происхождения и направленная к экватору горизонтальная термосферная циркуляция, которая поднимает плазму слоя F2 вверх вдоль наклонных линий геомагнитного поля. Вопрос о сильных электрических полях, проникающих в слой F2 из магнитосферы, оставался в течение долгого времени открытым, и в 90-х годах не было прямых доказательств того, что этот механизм вносит существенный вклад в поведение слоя F2 во время ионосферных бурь на средних широтах (Prolls, 1995). Также не было каких-либо указаний на существенную роль потоков плазмы из плазмосферы. В настоящее время ситуация иная (см. ниже параграф 3.2). Что же касается дрейфа, индуцированного циркуляцией, и термосферного «даунвеллинга», то они, как считается, вносят существенный вклад в формирование положительной фазы на средних широтах.

Описанная выше пропорциональность электронной концентрации в максимуме слоя F2 отношению $[O]/[N_2]$ в течение десятилетий считалась достаточной для объяснения отрицательной фазы вариациями отношения атомы-молекулы. Mikhailov et al. (1989, 1995) показали, что в действительности зависимость N_e(макс) от [O] и $[N_2]$ более сложна. Электронная концентрация пропорциональна $[O]^n$ (n = 0.7-0.85) (Mikhailov et al., 1995) и таким образом одновременные вариации и [O] и $[N_2]$ при неизменном отношении $[O]/[N_2]$ ведут к увеличению N_e. Именно это происходит во время ионосферных бурь в низких широтах. Индуцированная бурей циркуляция ведет к «даунвеллингу» термосферного газа в низких широтах и таким образом к увеличению [O] и $[N_2]$ иногда без каких-либо заметных изменений отношения $[O]/[N_2]$. Это является причиной существенной части ионосферных бурь, наблюдаемых на широтах ниже 30-40^o. Однако, важную роль играют также изменения электрического поля, индуцирующего направленный вверх дрейф слоя F2 (см. ниже параграф 3).

Вертикальный дрейф плазмы представляет собой очень важный фактор, влияющий на состояние слоя F2. В спокойный условиях дрейф вызывается горизонтальной циркуляцией. Направленные к экватору или полюсу горизонтальные ветры благодаря наклону магнитных силовых линий в средних широтах ведут к дрейфу, направленному соответственно вверх или вниз. В спокойных равновесных условиях этот дрейф уравновешивается другими процессами. Однако когда присутствует индуцированная бурей циркуляция, она усиливает, или ослабляет фоновую циркуляцию и таким образом усиливает или ослабляет направленный вверх дрейф.

В среднеширотной зимней ионосфере в дневное время зона уменьшенного отношения $[O]/[N_2]$ «заперта» в высоких широтах, поскольку обычная циркуляция препятствует проникновению нагретого газа на средние широты. В то же время, обычная циркуляция ослабляется направленной в противоположную сторону индуцированной бурей циркуляцией и поэтому направленный вниз дрейф плазмы становится слабее. Это приводит к новым равновесным условиям в максимуме слоя F2, причем его высота hmF2 увеличивается и соответственно увеличивается и электронная концентрация. Это является причиной доминирования положительной фазы в этих условиях.

Летом фоновая и индуцированная бурей циркуляции совпадают (обе направлены к экватору). В этом случае направленный вверх дрейф усиливается и вновь мы должны ожидать положительную фазу. Однако это происходит не всегда, поскольку индуцированная бурей циркуляция несет газ с уменьшенным отношением $[O]/[N_2]$ и это ведет к уменьшению N_e в максимуме слоя F2. Последнее обстоя-

тельство доминирует и именно поэтому летом отрицательная фаза наблюдается гораздо чаще, чем положительная. Описанная выше конкуренция объясняет также существование «мертвых зон», когда в течение нескольких часов в течение бури величина δfoF2 не превышает ±10% (см. Danilov (2001)).

Вертикальный дрейф слоя F2 может также индуцироваться электрическими полями, проникающими из магнитосферы. В 90-е годы еще не было надежных доказательств того, что сильные электрические поля (вплоть до 70-100 мВ/м) могут проникать на средние широты и быть ответственными здесь за положительную фазу. Однако было очевидно, что электрические поля играют важную роль в поддержании слоя F2 в низких широтах. Роль проникающих электрических полей в различных буревых явлениях будет подробно рассмотрена в параграфе 3.

В спокойных условиях Ey компонента электрического поля, которая принимает участие в ExB дрейфе, направлена на восток. В большинстве случаев во время магнитных возмущение Ey уменьшается в экваториальной зоне и это приводит к уменьшению направленного вниз дрейфа и таким образом к положительной фазе (Prolls, 1995; Mikhailov et al., 1994). Однако во время выдающихся возмущений может происходить усиление Ey с соответствующим усилением направленного вниз дрейфа и появлением соответствующей отрицательной фазы (Adeniyi, 1986; Turunen and Rao, 1980). Очевидно, именно это произошло на экваторе во время бури 23 сентября 1973 г., рассмотренной Mikhailov et al. (1994).

Сильные электрические поля часто наблюдаются в полярных областях в зоне джоулева нагрева и диссипации продольных токов. Из-за геометрии магнитного поля они не вызывают такого сильного вертикального дрейфа как в низких широтах, но могут повлиять на поведение слоя F2 через коэффициент рекомбинации. Скорость реакции $O^+ + N_2$, которая обеспечивает важный этап в рекомбинационной цепи, сильно зависит от электрического поля (Schunk et al., 1975), и поэтому усиление поля должно вести к уменьшению N_e, т.е. к отрицательной фазе. Именно это, видимо, произошло над установкой EISCAT во время сильного магнитного возмущения 3 апреля 1990 г., когда наблюдалось сильное (85 мВ/м) электрическое поле (Mikhailov and Schlegel, 1998).

Некоторые положительные эффекты в N_e во время геомагнитных возмущений могут быть вызваны так называемыми перемещающимися атмосферными возмущениями (ПАВ) (Prolls, 1995; Mikhailov et al., 1994). Энергия, инжектированная в верхнюю атмосферу во время магнитных бурь, может генерировать ПАВ, которые представляют собой импульсподобные атмосферные возмущения, распространяющиеся к экватору со скоростью в несколько соте метров в секунду, превосходящей в 3-5 раз умеренные ветры к экватору (около 150 м/с). В средних широтах ПАВ будут приводить к усилению вертикального дрейфа и таким образом к положительной фазе таким же образом, как это делает «гладкая» индуцированная бурей циркуляция, но гораздо меньшей длительности.

Описанная выше физическая картина, сформированная в конце 90-х годов, объясняет наиболее типичные особенности морфологии ионосферных бурь. Но для объяснения некоторых особенностей ионосферных бурь, особенно во время выдающихся геомагнитных событий, рассматриваются некоторые другие механизмы.

На основе описанной выше схемы Araujo and Fuller-Rowell (2001, 2002) разработали первую прогностическую модель ионосферной бури и включили ее как часть Международной Справочной Модели Ионосферы (Bilitza, 2001). В некоторых исследованиях конкретных ионосферных бурь, выполненных в 2000-х годах, наблюдаемые величины foF2 сравнивались с этой моделью.

Это завершает краткое описание морфологии и физики ионосферных бурь в слое F2 как они виделись в конце 90-х годов и были описаны в обзорных статьях, неоднократно упоминавшихся выше.

3. ИССЛЕДОВАНИЯ 2000-Х ГОДОВ

В течение прошлого десятилетия поведению ионосферной области F было посвящено большое число статей. В одной статье невозможно дать даже краткий обзор их всех. В этом параграфе мы постараемся описать наиболее важные из них. Четыре относительно новых элемента в изучении ионосферных бурь типичны для публикаций этого периода. Это: детальные исследования конкретных выдающихся бурь (таких, как случились в 2000 г. (событие Bastilia), 2001г., 2003 г. (события Halloway) и 2004 г.), использование техники GPS (Global Positioning System) в изучении ионосферных бурь, использование сложных теоретических моделей для моделирования поведения ионосферы во время геомагнитных возмущений и

пристальное внимание к проблеме положительных возмущений, появляющихся по внезапного начала магнитной бури (SSC).

Параграфы 3.2 и 3.3 ниже будут посвящены двум из четырех элементов указанных выше. Но мы начнем в параграфе 3.1 с обзора некоторых публикаций, касающихся исследования обычных (от слабых до сильных) бурь как наземными, так и спутниковыми методами, а также их численному моделированию. Использование данных GPS и результаты их моделирования будут рассматриваться во всех трех параграфах в связи с соответствующими бурями.

3.1 Обычные события (бури от слабых до сильных).

David and Adedakun (2009) исследовали ионосферную реакцию на сильную ионосферную бурю 28 января 1985 г. (Dst_{min} = -116 нТ), анализируя два набора станций в евро-африканском и восточно-азиатском секторах. В период понижения *Dst* станции в евро-африканском секторе находились близко к полудню, тогда как станции в восточно-азиатском секторе находились около захода. Станции восточно-азиатского сектора вели себя в соответствии со схемой, описанной в предыдущем параграфе, тогда как три низкоширотные станции евро-африканского сектора вели себя иначе. Этот факт позволил авторам предположить, что восходный эффект перераспределил плазму над этими станциями до момента, соответствующего Dst_{min}.

Mansilla and Zlossi (2012a) анализировали поведение ионосферы во время бури 3 августа 2010 г. Это была умеренная буря с максимальным отрицательным значением индекса *Dst*, равным 90. Аналогично работе Mansilla (2007) (см. ниже параграф 3.2), Mansilla and Zossi (2012a) рассматривали отдельно поведение слоя F2 во время бури в трех широтных секторах: Азия/Тихий океан, Европа/Африка и Америка.

Анализ выявил несколько обычных особенностей поведения слоя F2 во время бури. Например, отрицательная фаза наблюдалась на большей части станций европейского сектора. В зимнем полушарии (австралийские станции) “остановка” направленной к экватору индуцированной бурей циркуляции циркуляцией, индуцированной солнечным излучением, выразилась в том, что отрицательная фаза была ограничена высокими и частично средними широтами.

Анализируя реакцию термосферно-ионосферной системы на интенсивную геомагнитную бурю, Mansillo and Zossi (2012b) использовали данные измерений на спутнике Dynamic Explorer (DE) 2 на высотах слоя F2 (концентрации N_2 и O, нейтральная температура и концентрация электронов). Реакция ионосферы характеризовалась эффектом отрицательной бури, распространяющимся от средних и высоких к низким широтам. Данные по составу показали, что отрицательная фаза ионосферной бури была вызвана главным образом увеличением концентрации молекулярного азота, тогда как не был зарегистрировано почти никаких изменений концентрации атомного кислорода.

Mansilla (2008) использовал последовательность прямых измерений, проведенных на высотах от 280 до 300 км в среднеширотной и высокоширотной областях на спутнике DE 2 для изучения реакции термосферно-ионосферной системы в течение сильной геомагнитной бури 26 сентября 1982 г. (Dst_{min} = -187 нТ).

Было обнаружено, что уменьшение электронной концентрации следует за уменьшением отношения $[O]/[N_2]$, подтверждая таким образом принципиальную схему ионосферной бури, описанную в параграфе 2. Более того, наблюдался также рост нейтральной температуры T_n примерно на 40–50% на геомагнитных широтах от 60^o до 70^o в конце главной фазы и на ранней стадии восстановительной фазы. Этот рост температуры привел к увеличению коэффициента рекомбинации (включая возможный эффект возбуждения колебательных уровней молекулы N_2) и таким образом к дальнейшему уменьшению концентрации электронов на высотах области F. Таким образом, в действительности отрицательная фаза бури была образована благодаря двум факторам: уменьшенному отношению $[O]/[N_2]$ и усиленной рекомбинации из-за увеличения температуры. На широтах, меньших 60^o, задержанное возрастание N_e, наблюдавшееся в течение фазы восстановления 27 сентября 1982 г., могло быть связано согласно Mansilla (2008) с наблюдаемым существенным возрастанием концентрации O, тогда как концентрация N_2 оставалась близки к невозмущенным значениям. На этой стадии бури не было зарегистрировано никакого существенного возрастания T_n. Таким обра-

зом, это могло быть примером эффекта «даунвеллинга» (см. выше параграф 2).

Отношение [O]/[N_2] в столбе атмосферы, измеренное прибором Global Ultraviolet Imager (GUVI) на спутнике Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) во время ряда сильных геомагнитных бурь в конце июля 2004 г. (Dst_{min} = -180 нТ), было проанализировано Stephan et al. (2008). Результаты показывают, что произошло сильное уменьшение величины [O]/[N_2] в столбе атмосферы в средних широтах и соответствующее увеличение этого отношения в низких широтах во время максимума бури. Было обнаружено, что основные особенности этих наблюдений удовлетворительно объясняются моделью нейтральной атмосферы NRLMSISE-00, однако амплитуды вызванных бурей изменений недооцениваются моделью. Экспериментальные данные указывают на 40% увеличение [O]/[N_2] по сравнению с моделью NRLMSISE-00 в районе геомагнитного экватора 27 июля 2004 г. в период минимума *Dst*. Было найдено также, что максимальное воздействие бури на экваториальных широтах происходит по времени раньше, чем предсказывает модель.

Oyama et al. (2008) исследовали скорость нейтрального ветра в нижней термосфере над Скандинавией в период геомагнитного возмущения 9-10 сентября 2004 г., используя радарную систему EISCAT. Хотя возмущение было умеренным (Kp_{max} = 2), радар измерил большую амплитуду электрических полей, превосходящую 50 мВ/м. Соответственно, на высотах 100-120 км были измерены быстрые направленные вверх движения со скоростями, превышающими 30 м/с. Они ассоциировались с нагревом ионосферы. Была получена сложная картина горизонтального ветра с ветрами, направленными к экватору и полюсу, сменяющими друг друга. Oyama et al. (2008) предположили, что обмен энергией между ионосферой и нижней термосферой приводит к существенной модуляции как горизонтальных, так и вертикальных движений в нижней термосфере. Временные вариации ветра в нижней термосфере в период умеренных возмущений сильно зависят от высоты. Высотные зависимости ветра заставляют предположить, что количественные соотношения между притоком энергии и ветрами в возмущенные периоды сложнее, чем думали раньше, и необходимо их дальнейшее исследование.

Комбинация ионосферных данных из различных источников (ПСЭ, спутниковые измерения и измерения с помощью наземных ионозондов) использовались Ngwira et al. (2012) для изучения ионосферных эффектов сильной магнитной бури 24-27 июля 2004 г. (Dst_{min} = -180 нТ). Наиболее хорошо выраженные эффекты бури были видны в низких и средних широтах южного полушария, как в спутниковых, так и в наземных данных. Существенной особенностью этой ионосферной бури были сильные положительные фазы, наблюдавшиеся 25 и 27 июля 2004 г. и длившиеся более 7 часов каждая. Рост foF2 сопровождался ростом hmF2. Последний факт, как предполагается, вызван быстрым проникновение направленных на восток электрических полей из магнитосферы благодаря благоприятным условиям в ММП (компонента Bz была направлена на юг в течение более чем 9 часов). Рост h_mF2 был вызван ExB дрейфом плазмы, поднимавшим плазму максимума слоя F2 в область более низкой рекомбинации.

В настоящее время совершенно очевидно, что морфология экваториальной и низкоширотной области F существенно отличается от таковой на других широтах, поскольку магнитное поле почти параллельно поверхности Земли (Kelley et al., 2006). Schunk and Sojka (1996) показали, что в магнито-спокойных условиях ионосферная плазма днем дрейфует вверх под действием электрического поля динамо, направленного на восток, в то время как ночью наблюдается обратная картина. Schunk and Sojka (1996) показали также, что когда магнитная активность резко изменяется (бури), происходит быстрое проникновение магнитосферных электрических полей из высоких в низкие широты и электрические поля, вызванные воздействием механизма динамо из-за генерируемых бурей нейтральных ветров, появляются в экваториальной области.

В параграфе 2 уже отмечалось, что проникновение магнитосферных электрических полей на ионосферные высоты считается основной причиной положительной фазы, наблюдаемой во время магнитных возмущений в низких (и иногда в нижней части средних) широт. Однако, анализируя очень сильную бурю 6 ноября 2001 г. (Dst_{min} = -300 нТ), Maruyama and Nakamura (2004) показали, что NmF2 временно уменьшается в ответ на проникновение направленного на восток электрического поля прежде, чем начать расти. В то же время, ПСЭ начало расти почти сразу. Jin and Maruyama (2008) исследовали возможные механизмы этого эффекта с помощью численного моделирования. Они показали, что эффект в NmF2 может возникать при электрическом поле с амплитудой, боль-

шей, чем несколько мВ/м и вызывается двумя процессами, сопровождающими подъем максимума слоя F2: возрастанием диффузионных потоков в верхней ионосфере и движением плазмы под действием ExB дрейфа по направлению к области более внешних L оболочек. Рост ПСЭ был приписан дополнительному образованию плазмы ниже поднявшегося максимума слоя F2.

Роль электрических полей в формировании положительной фазы ионосферных бурь в экваториальных широтах рассматривалась в ряде публикаций (см., например, Wolf et al. (2007), Fuller-Rowell et al. (2002), Maruyama et al. (2005), и Sun et al. (2012)). Упрощенная общая картина выглядит следующим образом. Имеется два источника возмущенного электрического поля: быстрое проникновение электрического поля и возмущенное динамо поле. Первое генерируется конвекцией солнечного ветра-магнитосферы. Возмущенное динами поле генерируется термосферными ветрами, включая как относительно быструю компоненту (2-3 часа после внезапного начала бури SSC) так и относительно медленную (3-12 часов после SSC). Суммарный ExB дрейф вызывает эффекты подъема слоя F2, упоминавшиеся выше. Поле быстрого проникновения возмущает низкоширотную ионосферу почти немедленно после SSC. Действие возмущенного динамо поля начинается через несколько часов после SSC и может длиться более 12 часов. Взаимодействие этих двух механизмом очень сложно и может приводить к сложной картине поведения слоя F2 (Maruyama et al., 2005; Sun et al., 2012). Анализируя данные низкоширотных ионозондов в Китае в течение 50 интенсивных бурь, Sun et al. (2012) показали, что дрейф сильнее в дневное время, чем ночью, но не смогли обнаружить какой-нибудь выраженной зависимости от сезона.

Аналогичное исследование роли проникающих электрических полей во время бури 23 мая 2002 г. ($SYM\text{-}H_{min}$ = -110 nT) было выполнено Galav et al. (2011) на основе данных о ПСЭ. Наблюдался рост ПСЭ днем, который был приписан проникновению возмущенного динамо поля, тогда как в день после бури было зарегистрировано ночное уменьшение ПСЭ. Считается, что это уменьшение было вызвано дополнительным эффектом уменьшения отношения $[O]/[N_2]$ в термосферном газе.

David et al. (2011) провели анализ сильной бури 7-8 сентября 2002 г. (Dst_{min} = -180) с помощью TDIM модели (Utah State University Time Dependent Ionospheric Model). Результаты моделирования оказались в очень хорошем согласии с наземными наблюдениями и результатами измерений ПСЭ (см. рис. 1 из David et al. (2011)). Авторы показали, что магнитосферное электрическое поле с направленной на восток компонентой, которое проникает на средние широты, действительно увеличивает скорость ионообразования, и это объясняет наблюдаемое увеличение N_e. Однако так бывает не всегда. Lu et al. (2008) анализировали умеренную геомагнитную бурю 10 сентября 2005 г. (Dst_{min} = -60), используя наблюдения методом некогерентного рассеяния (ISR) и численное моделирование с использованием модели TIEGSM (Thermosphere-Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model). Они показали, что дневная положительная фаза ионосферной бури, наблюдавшаяся с помощью радаров в Millstone Hill и Arecibo и демонстрировавшая необычное поведение со временем, была связана с вертикальным дрейфом (сначала направленным вверх, а позже – вниз), вызванным нейтральным меридиональным ветром, а не проникновением магнитосферных электрических полей.

К тем же заключениям относительно положительной фазы бури 10 сентября 2005 г. пришли Goncharenko et al. (2007). Днем электронная концентрация возрастала после 0800 LT, причем возрастание длилось 9 часов и захватило высоты выше ~230 км. На высоте 300 км максимальное возрастание N_e достигло фактора 3 и сопровождалось уменьшением электронной температуры на ~1000 K и сильным направленным вверх дрейфом. Goncharenko et al. (2007) показали, в частности, что уменьшение электронной концентрации, наблюдавшее ISR радарами в Millstone Hill и Arecibo было частью глобальной картины, наблюдавшейся в ПСЭ. Рост ПСЭ достигал фактора 2 и охватывал средние и низкие широты. Goncharenko et al. (2007) предположили, что комбинация механизмов участвовала в образовании положительной фазы: электрические поля проникновения привели к росту N_e на субавроральных и средних широтах, перемещающиеся атмосферные/ионосферные возмущения (ПАВ/ПИВ) играли важную роль в средних и низких широтах, тогда как рост отношения $[O]/[N_2]$ мог также внести вклад в наблюдаемую положительную фазу в средних и низких широтах.

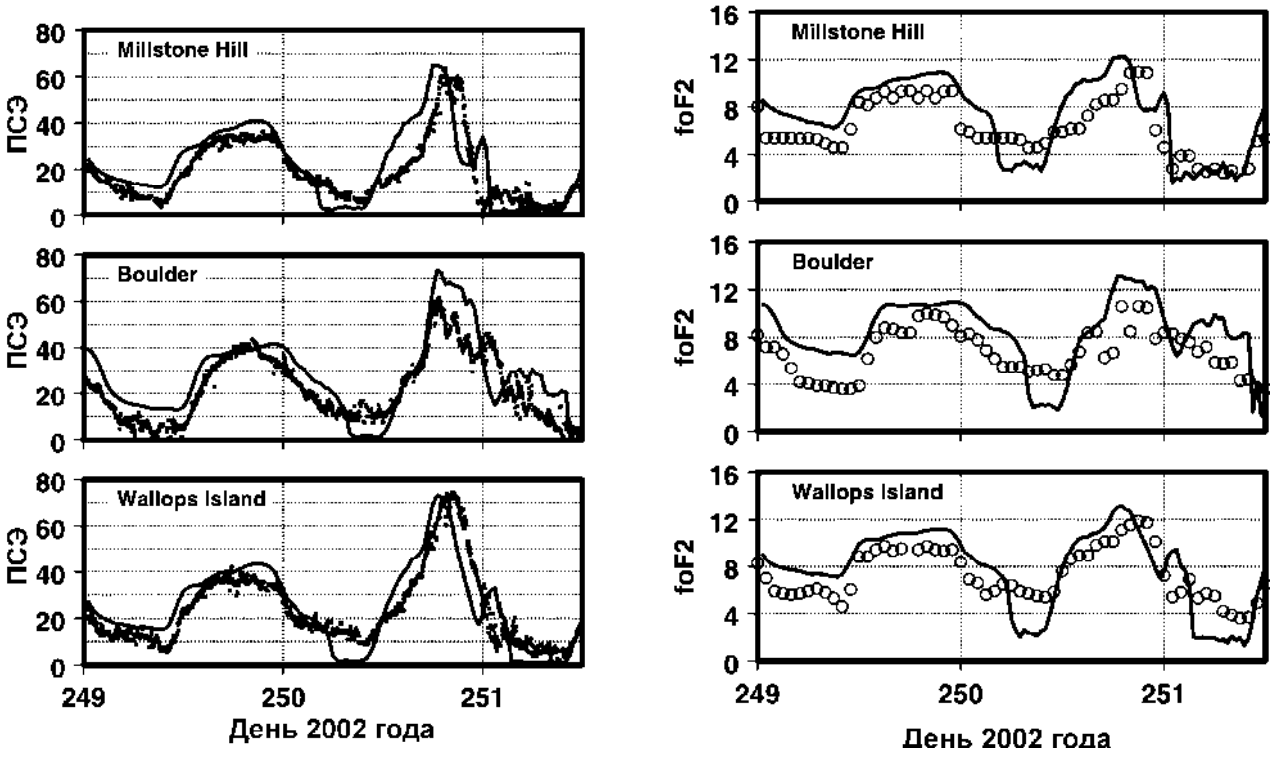

Рис. 1. Слева: наблюдения (значки) и модельные (сплошные кривые) величины ПСЭ в течение 2.5 дней в тех различных пунктах: Millstone Hill (42.6°N, 288.5°E), Boulder (40°N, 254.7°E) и Wallops Island (37.9°N, 284.5°E). Справа: наблюдаемые с помощью ионозондов (значки) и модельные (сплошные кривые) значения foF2 в течение 2,5 дней в тех же трех пунктах (из работы David et al. (2011)).

Несколько качественных эмпирических моделей электромагнитного воздействия на термосферу, включая электрический потенциал и поток Пойнтинга, использовались Deng et al. (2008) совместно с моделью NCAR TIEGCM для исследования влияния высокоширотного воздействия на нейтральную температуру, состав и электронную концентрацию. Было получено, что полная энергия потока Пойнтинга примерно на 30% больше, чем суммарный простой джоулев нагрев. Рассматривались различные методы распределения потока Пойнтинга по высоте. Различные распределения скорости нагрева вызывают различие в среднем по полярной области нагреве на единицу массы, достигающее 40% на высоте 160 км. Соответственно, различие в средней по полярной области температуре для трех разных случаев близко к 30–50 K. Эти результаты заставляют предположить, что не только полное количество вносимой энергии, но и способ, каким эта энергия распределяется с высотой, существенен для влияния магнитосферы на термосферу и ионосферу.

Предполагая импульсный тип притока тепла на широтах аврорального овала, Bhatnagar et al. (2006) исследовал реакцию экзосферной температуры T_{ex} на этот приток в зависимости от его энергии, геомагнитной активности и широты. Было показано, что можно описать существенные особенности наблюдений. Было найдено, что величина T_{ex} в высоких широтах пропорциональна скорости введения энергии и обратно пропорциональна градиенту плотности атмосферы.

Lei et al. (2008) исследовали реакцию термосферы и ионосферы на сильную геомагнитную бурю 14-15 декабря 2006 г. (Dst_{min} = -147 нТ), используя численное моделирование с помощью модели CMIT (Coupled Magnetosphere Ionosphere Thermosphere) 2.0. Результаты моделирования сравнивались с глобальными ионосферными картами ПСЭ, данными ионозондов на четырех ионосферных станциях и наблюдениями методом некогерентного рассеяния на радаре в Millstone Hill. В целом модель CMIT оказалась способной описать временные и пространственные вариации эффектов ионосферной бури. Анализ отдельных членов уравнения непрерывности показал, что изменения электрических полей играют главную роль в формировании наблюдаемых положительных эффектов ионосферной бури над Южной Америкой, причем полученные результаты согласуются с другими исследованиями в этой регионе (см. также ниже в этом параграфе).

Интересное заключение, к которому пришли Lei et al. (2008), состоит в том, что различие в величине увеличения N_e над Северной и Южной Америкой может быть объяснено наклоном профилей электронной концентрации в двух полушариях. В южном полушарии электронная концентрация медленно уменьшалась с высотой, тогда как это уменьшение было гораздо более быстрым в северном (зимнем) полушарии. Таким образом, электрические поля не могли вызвать сильного роста Ne, поднимая плазму вверх, и положительные эффекты бури были слабее в южном полушарии, чем в северном, хотя рост h_mF2 был сильнее в южном полушарии. Долготная зависимость ПСЭ для пунктов с той же геомагнитной широтой наблюдалась Kil et al. (2011), которые восстановили ПСЭ для спокойных дней из измерений прибором TIMED/GUVI.

Та же самая проблема более предпочтительных условий для дневного усиления во время бури над американским долготным сектором рассматривалась Sojka et al. (2012). Они использовали модель конвекции Волланда, три параметра которой обладают зависимостью от *Kp*, предложенной Heelis et al. (2009) для того, чтобы эта зависимость согласовалась с измерениями на спутнике DMSP (Defense Meteorological Satellite Program), выполненными во время выдающейся бури 6 ноября 2001 г. (Dst_{min} = -300 нТ). Используя такое электрическое поле в качестве драйвера для ионосферной модели TDIM и анализируя его влияние на разных долготах, Sojka at al. (2012) обнаружили, что действительно наблюдается долготная асимметрия которая благоприятна для роста ПСЭ в американском секторе. Они изучали также роль термосферных ветров в условиях бури и обнаружили, что они потенциально дают такой же эффект с собственной долготной зависимостью, которая может либо усиливать, либо ослаблять эффект распространяющегося электрического поля.

Процесс эволюции ионосферной бури наблюдался во время сильной магнитной бури 22 сентября 1999 г. (Dst_{min} = -160 нТ) над регионом восточной Австралии (140°E-170°E), используя измерения ПСЭ на семи станциях GPS (Yizengaw et al., 2004). Авторы обнаружили преобладание отрицательной фазы в средних и высоких широтах и положительной фазы в низких широтах. Последняя, как предполагается, была вызвана быстрым проникновением на ионосферные высоты направленных к востоку электрических полей магнитосферного происхождения. Это проникновение электрических полей вызывает почти мгновенное возрастание ПСЭ на всех широтах. Направленное к полюсу дневное распространение уменьшенной ионизации в долине экваториальной аномалии ионизации (ЭАИ) образует пояс уменьшенной ионизации, который вызывает временное подавление ЭАИ в начале фазы восстановления бури.

Mendillo and Narvaes (2009, 2010) проанализировали поведение foF2 во время 206 геомагнитных бурь в течение 20-го солнечного цикла (1964-1976 гг.) на двух ионосферных станциях - Wallops Island и Hobart. У станций близкие географические и геомагнитные широты, но они расположены, соответственно, в северном и южном полушариях. Основной результат этого исследования гласит, что “в среднем буревые возмущения (процент отклонений от месячных медиан) демонстрируют хорошее согласие на обеих станциях в различных условиях ”. Некоторые различия, найденные для конкретных бурь, могут быть вызваны как сезонными различиями (помимо летне-зимнего различия между полушариями) и не зеркальной морфологией геомагнитного поля в каждом полушарии.

Низкоширотные ионосферно-магнитосферные возмущения во время умеренной магнитной бури 5 апреля 2010 г. (Dst_{min} = -85 nT), связанной с корональной дырой, исследовались в работе Shimes et al. (2013). Высокоскоростные потоки солнечного ветра, распространявшиеся от корональной дыры, наблюдались на спутнике SOHO 10 апреля. Ионосферные эффекты изучались на основе данных GPS, полученных на двух станциях Helwan и Aswan в Египте. Положительная фаза ионосферной бури (вертикальное ПСЭ, ВПСЭ превышало спокойный уровень) наблюдалась 15-17 апреля 2010 г. Shimes et al. (2013) пришли к заключению, что направленное на восток электрическое поле динамо вызвало увеличение электронной концентрации в среднеширотной ионосфере за счет направленного вверх движения частиц плазмы и уменьшение электронной концентрации в экваториальной ионосфере за счет усиления фонтан-эффекта (Yizengaw et al.,2005). Во время бури направленный к полюсу ветер днем был ослаблен, или даже менял направление на обратное, что также могло внести вклад в развитие положительной фазы ионосферной бури. Направленное на восток поле быстрого проникновения было связано с направленной на юг Bz компонентой ММП и увеличило регулярное направленное на

восток электрическое поле динамо днем во время главной фазы магнитной бури.

Статистический анализ крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (КМПИВ) в Европе был выполнен Borries et al. (2009), которые использовали данные о полном содержании электронов, полученные из измерений GNSS. Анализировались геомагнитные бури над Европой в период с 2001 по 2007 гг. Список событий включал 37 бурь в широком диапазоне интенсивностей возмущений. Применение Фурье- и вейвлет-анализа позволило выявить типичные свойства КМПИВ, генерируемых бурей. Было обнаружено, что КМПИВ характеризуются средней длиной волны 2000 км, средним периодом 59 мин и средней фазовой скоростью 684 м/с, и распространяются главным образом на юг. Поскольку наблюдается явная корреляция амплитуд КМПИВ и индекса *AE*, предполагается, что исследованные КМПИВ в основном возбуждаются за счет джоулева нагрева в авроральной области.

Jesus et al. (2010) исследовали экваториальное F-рассеяние (Equatorial Spread F, ESF), включая пузыри ионосферной плазмы и динамику поведения ионосферной области F в южно-американском секторе во время сильной геомагнитной бури в декабре 2006 г. (Dst_{min} = -147 нТ). Пузыри ионосферной плазмы наблюдались после необычного подъема области F в период перед усиления поля перед сменой знака (PRE). Этот необычный подъем области F в период PRE предположительно связан с быстрым проникновение электрического поля магнитосферного происхождения. В течение возмущенных в геомагнитном отношении ночей на станциях São José и Port Stanley в области F наблюдались сильные колебания, вызванные прохождением ПИВ. Наблюдения GPS ВПСЭ в ночь с 14 на 15 декабря 2006 г. зарегистрировали как положительную, так и отрицательную фазы бури в южно-американском секторе, которые возможно были вызваны, соответственно, изменениями крупномасштабной циркуляции ветра и отношения $[O]/[N_2]$.

Foster and Rideout (2007) анализировали степень сопряженности эффектов буревых возмущений электронной концентрации (БВК) в обоих полушариях. Они использовали сочетание спутниковых и наземных наблюдений, чтобы исследовать степень магнитной сопряженности связанной со специфическими свойствами БВП. Foster and Rideout (2007) обнаружили, что основные особенности четко повторяются в обоих сопряженных полушариях: плюмажи БВК появляются в магнито-сопряженных областях обоих полушарий, положения полярной границы плюмажей БВК хорошо сопряжены и проникающее магнитное поле наблюдается в магнито-сопряженных областях. Однако локальные процессы (прежде всего – динамические) в каждом полушарии могут приводить к собственному перераспределению возмущенной электронной плотности, приводя к различным широтным и долготным распределениям.

3.2 Очень сильные и выдающиеся бури

Kil et al. (2003) исследовали реакцию ионосферы на очень сильную бурю 15 июля 2000 г. (Dst_{min} = -300 нТ), используя глобальные карты ПСЭ и измерения концентрации ионов, состава и скорости дрейфа на космических аппаратах DMSP F13 и F15. Был обнаружен четко выраженный сезонный эффект, который характеризуется доминированием отрицательной фазы ионосферной бури в летнем (северном) полушарии и хорошо выраженной положительной фазой в зимнем (южном) полушарии. Северная отрицательная фаза быстро продвигалась к экватору ночью и даже проникла в противоположное полушарие во время главной фазы бури. Наблюдаемые характеристики отрицательной фазы оказались в хорошем качественном согласии с расчетами по глобальной модели. Положительная фаза бури преобладала в низких и средних широтах южного полушария и бала наиболее хорошо выражена ночью. Kil et al. (2003) утверждают, что очень хорошее временное и пространственное согласие возрастания концентрации ионов с уменьшением скорости направленного вниз ионного дрейфа указывает на то, что поддержание слоя F2 ночью в высоких широтах индуцированными бурей направленными к экватору нейтральными ветрами являлось главной причиной положительной фазы ионосферной бури.

Долготные особенности и роль некоторых обычных физических механизмов реакции ионосферы на выдающуюся геомагнитную бурю, которая произошла 13 марта 1989 г. (Dst_{min} = -589 нТ), были рассмотрены Mansilla (2004). Использовались данные трех цепочек ионосферных станций, расположенных в интервалах географических долгот 10°W-15°E, 55°E-85°E и 135°E-155°E. Длительные эффекты отрицательной фазы ионосферной бури, которые наблюдались со времени главной фазы геомаг-

нитной бури, были главной особенностью, обнаруженной на средних широтах. Эффекты отрицательной фазы распространялись во время главной фазы геомагнитной бури на низкие широты в том долготном секторе, где буря началась в дневные часы (135°E – 155°E). Возможным источником генерации и поддержания отрицательной фазы бури на низких широтах мог быть приход нейтральных меридиональных ветров, несущих измененный нейтральный состав. Это предполагает сильное проникновение возмущения состава в низкие широты во время выдающихся геомагнитных бурь. Такое предположение подтверждается измерениями в области ЭАИ во время сильных геомагнитных бурь, где наблюдались значительные уменьшения отношения [O]/[N2], приводившие к такой же отрицательной фазе, как и на средних широтах (Mansilla, 2003). Mansilla (2004) объясняет задержанную положительную фазу ионосферной бури на средних широтах эффектом ПАВ, двигающихся к экватору со скоростью около 440 м/с.

Глобальная реакция foF2 на очень сильную геомагнитную бурю 15 июля 2000 г. (Dst_{min} = -300 нТ) рассматривалась Mansilla (2007). Для анализа использовались данные 22 ионосферных станций. Станции были расположены в четырех долготных областях: 10°W-35°E, 60°E-120°E, 130°E-170°E, и 250°E-295°E. Это позволило наблюдать эффекты бури в обоих полушариях на долготах, где SSC пришелся на различные моменты дня.

Анализ подтвердил принципиальное положение схемы, описанной в параграфе 2: отрицательное возмущение в летнем полушарии распространялось к низким широтам, но было ограничено высокими и частично средними широтами в зимнем полушарии. Наиболее интенсивная (-(70-80)% на станциях Juliusruh и Chilton) и наиболее длительная (~30 часов) отрицательная фаза наблюдалась на станциях в секторе 10°W-35°E, где геомагнитное возмущение началось в послеполуденные часы. В зимнем полушарии (австралийский сектор, область 130°E-170°E) наблюдалась отрицательная фаза на высокоширотных станциях (Hobart и Canberra), тогда так на низкоширотных станциях (Norfolk и Townsville) наблюдалась положительная фаза.

В целом согласно Mansilla (2007) наблюдавшаяся сильная и длительная отрицательная фаза в летнем полушарии была вызвана распространением воздуха с уменьшенным отношением [O]/[N_2] из области полярного нагрева в низкие широты. Что касается положительных фаз, наблюдавшихся с некоторой задержкой в области 250°E-295°E, то они могли быть вызваны ПАВ, генерируемыми направленными к экватору меридиональными ветрами. Было найдено, что скорость распространения ПАВ составляла около 110 м/с.

Не было сделано определенных выводов о природе положительных фаз рассматриваемой бури в средних широтах зимнего полушария. Они могли быть вызваны как задержкой индуцированной солнечным нагревом циркуляции противоположной циркуляцией, индуцированной бурей, так и эффектом даунвеллинга.

Некоторые эффекты, наблюдавшиеся Mansilla (2007) в течение бури 15 июля 2000 г. (например, длительные положительные фазы в средних широтах и отрицательные фазы в низких широтах в зимнем полушарии) не находят своего объяснения в рамках схемы, описанной в параграфе 2.

Используя наблюдения на спутнике DE-2, Mansilla (2010) исследовал реакцию высокоширотной ионосферно-термосферной системы во время двух геомагнитных бурь: сильной бури 6 августа 1982 г. (Dst_{min} = -155 nT) и очень сильной – 21 сентября 1982 г. (Dst_{min} = -210 nT). Результаты наблюдений на спутнике DE-2 позволили сравнить одновременные измерения вызванных бурей возмущений в составе газа, электронной концентрации и температуре. Во время главной фазы была обнаружена хорошая корреляция между уменьшением отношения [O]/[N_2] и отрицательной фазой ионосферной бури в соответствии с классической схемой и результатами Prolls (1995). Степень уменьшения [O]/[N_2] получена пропорциональной интенсивности бури. Однако во время фазы восстановления это соотношение нарушалось: отношение [O]/[N_2] восстанавливалось медленнее, чем N_e. Отмечено, что уменьшение концентрации электронов иногда вызывается увеличением концентрации молекулярного азота N_2 и не всегда связано с одновременным увеличением концентрации N_2 и уменьшением концентрации атомного кислорода.

Mahrous (2007) предложил новый метод совместного рассмотрения буревых эффектов, наблюдаемых на нескольких ионосферных станциях, вводя коррекцию, соответствующую различным местным временам SSC на разных станциях. Рассматривалась сильная буря 21 октября 1999 г. (Dst_{min} = -230 нТ). Используя данные 11 ионосферных станций, Mahrous (2007) получил среднее поведение δfoF2 со временем, которое ясно показало известную особенность ионосферной бури: длительную

отрицательную фазу во время главной фазы геомагнитного возмущения. Анализ показал также, что имеются две положительных гармоники поведения δfoF2 до SSC (см. ниже параграф 3.3).

Yizengaw et al (2005) провел детальное исследование поведения ионосферы во время выдающейся магнитной бури 31 марта 2001 г. (Dst_{min} = -380 нТ). Использовалась комбинация данных ПСЭ, наземных ионозондов и некоторых спутниковых измерений. Цепочка станций GPS около меридиана 150°E была использована для покрытия большого интервала широт от каспа до экваториальной области. Результаты можно сформулировать следующим образом (Yizengaw et al., 2005).

Результаты наблюдений различными методами дали согласующуюся картину. Наблюдалась значительная возмущенная зона в высоких и средних широтах с очень сильным ростом ПСЭ до 230% в высоких и до ~120% в средних широтах. Длительная отрицательная фаза ионосферной бури была зарегистрирована особенно во время фазы восстановления магнитной бури. Сильный рост ночной ионизации в средних широтах за счет плазмосферно-ионосферного взаимодействия, вызванного усилением направленного вниз ExB дрейфа, привел к сильному истощению плазмосферы. Наземные станции GPS зарегистрировали перемещающиеся ионосферные возмущения в ПСЭ. Томографическая реконструкция позволила выявить интересную структуру ПИВ. Она указывает на распространяющиеся к экватору пальцеобразные особенности ионизации с протяженностью по высоте ~600 км и шириной 300-400 км. Аналогичные особенности электронной концентрации в ионосфере наблюдались также на высоте 900 км измерителем ионного дрейфа на спутнике DMSP-13. Были зарегистрированы существенные сцинтилляции в ПСЭ на авроральных и субавроральных широтах, совпадавшие с прохождением ПИВ из высокоширотной области.

Детальный анализ поведения ионосферы во время трех выдающихся геомагнитных бурь был выполнен Kane (2005). Для изучения поведения foF2 во время бурь 29-30 октября 2003 г., 20-21 ноября 2003 г. и 13-14 марта 1989 г. использовались данные 83 ионосферных станций глобальной сети. Первое событие реально состояло из двух бурь (часто называемых бурями Дня Всех Святых) с максимальной магнитудой величин *Dst*, равной 363 and 401 нТ. Эти величины для двух других бурь составляли, соответственно, 472 и 589 нТ. Данные ионозондов были усреднены по долготным группам с центрами на 66°W, 12°E, 135°E и 135°W.

Пример поведения foF2 (как в относительных, так и в абсолютных единицах) для двух событий 2003 г. приведены на Рис. 2, взятом из работы Kane (2005). На рис. 2 видно, что в целом в течение события октября 2003 г. (левые панели) наблюдался широтный эффект с отрицательной фазой в средних и низких широтах и положительной фазой в высоких широтах. Эта картина была лучше всего выражена в европейском регионе. Поразительной особенностью всей картины является тот факт, что ΔfoF2 (как положительные, так и отрицательные) были очень высокими по абсолютной величине и достигали 5-6 МГц. Вторая удивительная особенность поведения foF2 состоит в присутствии на многих станциях сильной положительной фазы до начала бури. Мы вернемся к проблеме предбуревой положительной фазы ниже в параграфе 3.3.

В широком диапазоне широт австралийского сектора (панель C) во время событий в октябре 2003 наблюдались очень сильные и длительные отрицательные возмущения. Это понятно с точки зрения принципиальной концепции, описанной в параграфе 2 (октябрь условно может рассматриваться как лето для большинства австралийских станций), но амплитуды (достигавшие 5 МГц) и длительность (достигавшая двух суток) были очень велики по сравнению с отрицательной фазой во время обычных бурь.

Подобная картина но с несколько более слабой и короткой отрицательной фазой наблюдалась в австралийском секторе и в течение события в ноябре 2003 г. В американском и европейском секторах во время этого события (правые панели на рис. 2) величины ΔfoF2 были существенно ниже по абсолютной величине и широтный ход (если он был) не был выражен столь ясно. На некоторых станциях видна длительная (двое уток) и достаточно сильная положительная фаза. Поразительная особенность: на станции Dyess (32°N, 100°W) зарегистрирована сильная ($\Delta foF2 \geq 5$ МГц) и длительная (около 20 ч) отрицательная фаза, которая не ожидалась на таких широтах зимой.

Согласно Kane (2005) для наиболее сильной геомагнитной бури 13 марта 1989 наблюдаются еще более сильные отклонения от «нормального» (т.е. предсказываемой моделью) поведения. Это подтверждает результаты более ранних публикаций, касающихся этого явление (см.

например Batista et al. (1991); Morton et al. (1991); Rich and Dening (1992); Yeh et al. (1992)). Основная особенность бури 13 марта 1989 г. состояла в очень сильной и очень длительной отрицательной фазе, которая началась почти одновременно с SSC и на некоторых станциях длилась 4 суток (Kane, 2005). Наиболее сильные отрицательные отклонения от спокойных величин достигали ΔfoF2 = 6-7 МГц. Почти та же картина наблюдалась в большом широтном интервале от высоких широт северного полушария до высоких широт южного. Поскольку это был период равноденствия, отсутствие межполушарного различия не удивительно, но амплитуда отрицательной фазы и почти полное (с небольшими исключениями) отсутствие положительной фазы создает уникальную картину, не соответствующую модельным ожиданиям.

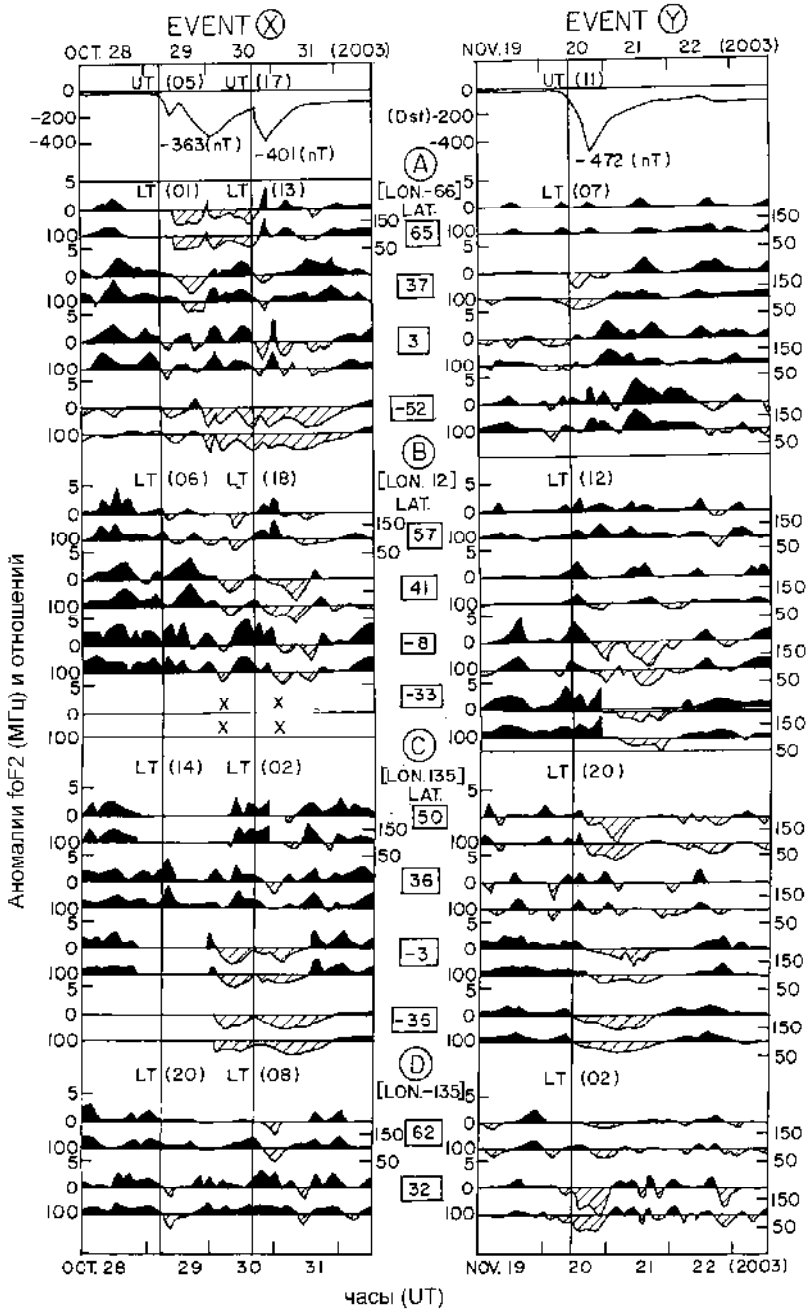

Рис. 2. Данные для события X (28–31 октября 2003 г.) в левой половине и для события Y (19–22 ноября 2003 г.) в правой половине. Величины *Dst* (верхние панели), аномалий foF2 (в МГц) и отношений (одно под другим) для усреднения по станциям для различных средних широт (с севера на юг, указаны в середине рисунка) и средних долгот: (A) 66°W, (B) 12°E, (C) 135°E, and (D) 135°W. Вертикальными линиями показаны начала бурь. Положительные отклонения зачернены, отрицательные отклонения заштрихованы (из работы Kane (2005)).

Kil et al. (2011) поднял вопрос о том, действительно ли изменения параметров слоя F2, наблюдаемые на спутниках, отражают только зависящее от фазы бури поведение со временем foF2 (hmF2) – смену положительных и отрицательных фаз, вызванную физическими механизмами. На основании анализа данных спутника Challenging Minisatellite Payload (CHAMP) и наблюдений ПСЭ во время выдающейся геомагнитной бури 20 ноября 2003 г. (Dst_{min} = -472 нТ) Kil et al. (2011) показали, что экваториальная граница отрицательной фазы демонстрирует кажущиеся движения к полюсу и к экватору. Однако это поведение отрицательной фазы не обязательно вызвано временными вариациями буревых процессов, а может быть результатом коротации пространственно неоднородных ионосферных возмущений (связанных главным образом с вариациями нейтрального состава термосферы). Очень важно принимать во внимание этот вывод при анализе наземных измерений совместно со спутниковыми данными.

Hetcht et al. (2008) исследовали изменения состава термосферы и высыпаний частиц в период той же самой выдающейся геомагнитной бури 20-21 ноября 2003 г. (Dst_{min} = -472 нТ) и сравнивали эти изменения с таковыми, наблюдавшимися в период слабо возмущенной геомагнитной активности 17 ноября 2003 г. (*Kp* =4-5) и в промежуточный спокойный период (*Kp* = 2-3). Использованные данные были получены от (1) наземных магнетометров, риометра, сканирующего допплеровского сенсора Фабри-Перо и фотометров со станций на Аляске, (2) фотометров с канадских пунктов, (3) датчиков частиц на спутниках NOAA POES и DMSP и (4) сенсора далекого ультрафиолета TIMED/GUVI. Изменения состава, связанные с вторжением авроральных частиц и джоулевой энергией, показали наличие более сильного уменьшения концентрации атомного кислорода 20 ноября 2003 г. чем в другие ночи.

Изменения [O]/[N_2], предсказываемые моделью NRLMSIS, не передают полностью изменения состава, вызванные геомагнитной активностью. В период низкой геомагнитной активности ночью 19 ноября 2003 г. модельные и наблюдаемые данные близки и показывают, что этой ночью изменения были небольшими. В ночь сильной бури 20 ноября 2003 г. модель передает общий тренд уменьшения [O]/[N_2] в течение ночи, но недооценивает амплитуду эффекта. Однако наибольшее различие было 17 ноября (короткий всплеск магнитной активности), когда модель и наблюдения дают сильное отличие в период максимального потока энергичных частиц. Эта разница, скорее всего, связана с кратковременностью джоулева нагрева в эту ночь по сравнению с длительными периодами интенсивного джоулева нагрева 20 ноября. В течение ночей с наибольшими изменениями состава вклад джоулевой энергии доминирует над вкладом энергии авроральных частиц (Hetcht et al., 2008).

Используя результаты эксперимента ROCSAT-1/IPEI, Dmitriev and Yeh (2008) исследовали увеличения концентрации ионов в верхней ионосфере низких широт во время очень сильной бури 15-16 июля 2000 г. (Dst_{min} = -300 нТ) и выдающейся бури 29-31 октября 2003 г. Было показано, что концентрация ионов очень сильно возросла (до двух порядков величины) во время главной фазы геомагнитных бурь и достигла пиковых значений во время максимумов бурь. Увеличения концентрации ионов были в основном локализованы в области Южно-Атлантической аномалии (SAA) которая характеризуется очень интенсивными потоками энергичных частиц. Динамика радиации в околоземном пространстве исследовалась на основании данных SAMPEX/LEICA по электронам с E >0.6 MeV и протонам с E >0.8 MeV на высоте около 600 км. Во время магнитных бурь поток энергичных частиц в области SAA и ее окрестности возрос более чем на три порядка величины. Положение области возросших потоков совпадает с областями увеличения концентрации ионов. Таким образом, наряду с прямым проникновением электрических полей (см. ниже), ионизация ионосферы возросшими потоками энергичных частиц, высыпающимися из радиационных поясов, также вносит вклад в образование буревых повышений концентрации ионов.

Zhao et al. (2013) анализировали положительные фазы ионосферной бури, вызванной выдающейся магнитной бурей 20 ноября 2003 г., используя комбинацию данных GPS ПСЭ и данных меридиональной цепи ионозондов, расположенных вдоль меридиана ~280°E в Южной Америке. Оба типа данных (ПСЭ и foF2) демонстрировали значительное увеличение в средних и низких широтах в долготной области 280°E в течение главой фазы магнитной бури. Максимальный рост содержания электронов в верхней ионосфере был в 3,2-7,7 раз сильнее, чем в нижней ионосфере в месте расположения ионозондов. Высота максимума слоя F2 превысила 400 км и была на 100 км больше, чем в

покойный день. Это могло быть вызвано непрерывным направленным на восток электрическим полем и генерируемыми во время бури направленными к экватору ветрами. Zhao et al. (2013) не подтвердили заключение Yizengaw et al. (2006) о «необычной» реакции верхней ионосферы в североамериканском секторе во время рассматриваемой бури.

В параграфе 3.1 рассматривались эффекты проникновения магнитосферных электрических полей в ионосферу во время умеренных бурь. Было показано, что эти электрические поля ответственны за положительные фазы ионосферной бури, наблюдаемые в низких и умеренно низких широтах. Однако, во время выдающихся геомагнитных событий существуют электрические поля, проникающие в ионосферу и связанные непосредственно с ММП. Tsurutani et al. (2008) исследовали эффекты быстро проникающих электрических полей (БПЭП) во время выдающейся магнитной бури 30-31 октября 2003 г. БПЭП вызывают положительные и отрицательные фазы ионосферной бури в дневное и ночное время, соответственно. Дневная фаза характеризуется переносом плазмы из приэкваториальной области выше по высотам и широтам, формируя гигантский фонтан плазмы, который является частью так называемого дневного ионосферного супер-фонтана. Он образуется при направленной на юг Bz компоненте ММП. При направленной на север Bz компоненте, БПЭП может вызывать днем негативную фазу ионосферной бури. Роль By компоненты ММП в этом процессе пренебрежимо мала (Tsurutani et al., 2008).

Экстремальная реакция ионосферы на сильные электрические поля во время выдающейся магнитной бури 29 и 30 октября 2003 г. (Dst_{min} = -401 нТ) исследовалась Manucci et al (2005). Из-за усиления межпланетного электрического поля дневное полное содержание электронов возросло в течение 2-5 часов на ~40% и ~250% во время событий 29 октября 2003 г. и 30 октября 2003 г., соответственно,. 30 октября 2003г. содержание электронов над спутником CHAMP (~400 км) возросло на средних широтах (±30^o геомагнитной широты) примерно на порядок. Предполагается, что электрические поля быстрого проникновения были возможной причиной этих возрастаний количества электронов. Поля вызвали подъем вверх ионосферы в дневное время и диффузию экваториальной плазмы вдоль магнитных силовых линий в более высокие широты, создав эффект «дневного супер-фонтана».

Maruyama et al. (2007) выполнил численное моделирование, основанное на комбинации моделей первого принципа, с тем, чтобы ответить на принципиальный вопрос: могут ли длительные возмущения электрических полей быть вызваны эффектом проникновения и можем ли мы понять относительную важность проникновения по сравнению с возмущенным динамо процессом в поддержании длительных электрических полей? Они сравнили результаты численного моделирования с наблюдениями во время выдающейся магнитной бури 31 марта 2001 г. (Dst_{min} = -380 нТ) и сильной магнитной бури 17-18 апреля 2002 г. ($SYM\ H_{min}$ = - 160нТ).

Результаты работы Maruyama et al. (2007) можно схематически представить следующим образом. На ранней стадии бури (t < 12 ч) днем эффект проникновение доминирует и может обладать долгим временем жизни если Bz компонента ММП велика и отрицательна. Ночью эффекты быстрого проникновения и возмущенного динамо сравнимы. На более поздней стадии (t >12 ч) днем поле проникновения с меньшей вероятностью следует за вариациями солнечного ветра и ММП. Механизм возмущенного динамо определяет дневной дрейф в гораздо большей степени, чем на более ранней стадии.

Gilles et al. (2011) выполнили статистический анализ параметров Super Dual Auroral Radar Network (Super-DARN), измеренных во время геомагнитных бурь. Буревые события были разделены на три класса: интенсивные, сильные и слабо-умеренные. Анализировались три параметра: число ионосферных эхо, зарегистрированных радарами в северном полушарии, и компоненты дрейфа ионосферной плазмы, измеренные вдоль луча зрения радара. Для всех трех классов бурь получено уменьшение числа ионосферных эхо на ранней стадии фазы восстановления. Общее число эхо в классах сильных и умеренно слабых бурь также уменьшалось во время главной фазы, но класс интенсивных бурь вел себя иначе. Для интенсивных бурь наблюдалось уменьшение числа эхо до главной фазы, но это число быстро восстанавливалось к концу главной фазы. Некоторое различие между интенсивными, сильными и слабо-умеренными бурями было найдено также и в конвекции плазмы через полярную шапку с дневной стороны на ночную

Наблюдения, выполненные аппаратурой Retarding Potential Analyzer (RPA) на борту индийского спутника SROSS-C2, анализировались Subrahmanyan et al. (2005) для периодов четырех сильных и очень сильных геомагнит-

ных бурь в 1997–2000 гг. Было обнаружено, что ЭАИ была ослаблена в течение 12–24 ч после начала бури. Было обнаружено также, что ослабление ЭАИ было главным образом вызвано связанным с динамо ослаблением направленных на восток электрических полей, вызывающих экваториальный фонтан в дневное время. Меридиональные ветры также играли важную роль в перераспределении ионизации в области ЭАИ. Таким образом, широтное распределение ионизации во время бури в этой области, наблюдавшееся со спутника SROSS-C2, можно легче понять, учитывая изменения ExB дрейфа совместно с меридиональными ветрами.

Реакция ионосферной области F в области экваториальных и низких широт в бразильском секторе во время очень сильной геомагнитной бури 6-7 апреля 2000 г. (Dst_{min} = -288 нТ) было исследовано de Abreu et al. (2010). Анализировались величины ВПСЭ и флуктуаций фазы на основании наблюдений GPS, проведенных в четырех пунктах. Во время быстрого уменьшения *Dst* 6 апреля 2000 г., наблюдалось быстрое проникновение электрических полей магнитосферного происхождения, приведшее к уменьшению ВПСЭ на экваториальной станции (Imperatriz) и к сильному уменьшению ВПСЭ на низкоширотной станции (Porto Alegre). Это привело к сильным фазовым флуктуациям в ночь с 6 на 7 апреля 2000 г. во всех четырех пунктах в пределах 6°-30°S.

Во время фазы восстановления (днем 7 апреля 2000 г.) наблюдения ВПСЭ дали положительную фазу ионосферной бури на всех четырех станциях, причем эффект возрастал от станции Imperatriz (6°S) к станции Porto Alegre (30°S). Согласно de Abre et al. (2010) этот эффект мог быть вызван направленным к экватору меридиональным ветром. Во время фазы восстановления (днем 8 апреля 2000 г.) наблюдения ВПСЭ указывают на положительную фазу ионосферной бури на низкоширотных станциях, возможно связанную с усилением экваториальной ионосферной аномалии.

Используя аппаратуру GPS, Sahai et al. (2011) исследовали ионосферные эффекты нескольких очень сильных геомагнитных бурь над Южной Америкой (Бразилия и Аргентина). Были выбраны четыре периода с Dst_{min} < -250 нТ в 2000-2004 гг. Исследование преследовало две цели. Во-первых, выяснить вызывают ли очень сильные бури образование неоднородностей в экваториальной ионосфере (включая явления ESF). Во-вторых, сравнить наблюдаемые вариации ВПСЭ с моделью TIMEGCM. Исследование показало, что поведение ВПСЭ отличалось для 6-и анализируемых событий с низким Dst_{min}. Общими для всех событий были следующие особенности. Наблюдаемые ВПСЭ демонстрировали сильный рост и флуктуации вскоре после SSC, и модельные величины ВПСЭ были в целом ниже наблюдаемых. Что касается ESF, то они были зарегистрированы в периоды 29-30 и 30-31 октября 2003 г. и 7-8 ноября 2004 г. Согласно Sahai et al. (2011) эти ESF указывают на большую широтную протяженность плазменных пузырей. В событиях 20 ноября 2003 г. и 10 ноября 2004 г. не было зарегистрировано ESF (не было фазовых флуктуаций сигналов GPS). Но ESF наблюдались после очень сильной бури 6 апреля 2000 г.

Подобный анализ эффектов выдающейся бури 7-10 ноября 2004 г. ($SYM\text{-}H_{min}$ = -400 нТ) в южноамериканском секторе был выполнен de Siqueira et al. (2011). Анализировались данные наблюдений совместно с данными наземных магнитометров, измерениями дрейфа в Jicamarca и данными дигизонда в Sao Luis. Основные характеристики поведения ПСЭ были такими же, как и обнаруженные Sahai et al. (2011). Наиболее неожиданным результатом исследования было отсутствие ЭАИ в первый день бури 7 ноября 2004 г. Но расширение и интенсификация ЭАИ наблюдались 9 ноября 2004 г., равно как и задержка ЭАИ в послезаходные часы 7, 8 и 10 ноября. Siqueira et al. (2011) объяснили уменьшенные величины ВПСЭ 10 ноября 2004 г. (когда не было электродинамического воздействия), введя понятие «позднего времени» бури, обусловленной возмущенными ветрами и изменениями состава.

Две интенсивных магнитных бури, случившихся в 2000 г., были проанализированы Nogueira et al. (2011). Для изучения того, как магнитная буря влияет на интенсивность ЭАИ, анализировались критическая частота слоя F2 и ПСЭ, измеренные в Бразилии двумя дигизондами (в Cachoeira Paulista, расположенной возле максимума ионизации ЭАИ, и в Sao Luis, расположенной в долине ЭАИ) и приемниками GPS в экваториальных и низких широтах. В период очень сильной бури 23-27 ноября 2001 г. (Dst_{min} = -224 нТ) наблюдалось усиление ЭИА в вечерние часы 25, 26 и 27 ноября 2001 г., которое должно быть вызвано усилением направленного на восток электрического поля динамо, которое проявилось в возмущенном вертикальном дрейфе. В период выдающейся бури 31 марта 2001 г. (Dst_{min} = -380 нТ) поведе-

ние ЭИА было в принципе таким же, как и поведение во время бури в ноябре 2001 г. с несколько более сильными флуктуациями ΔfoF2 и ΔПСЭ. Важной особенностью поведения ЭИА в течение обеих бурь было увеличение ΔfoF2 в утренние часы. Эта особенность также очень похожа на результаты наблюдений во время выдающейся бури 29-30 октября 2003 г., описанные Batista et al. (2006). Nogueira et al. (2011) заявили, что ЭИА мажет значительно усиливаться электрическими полями прямого проникновения даже в утренние часы в зависимости от местного времени усилений бури.

Manucci et al. (2008) исследовали быструю реакцию ионосферы в дневное время в период четырех выдающихся геомагнитных бурь (29 октября 2003 г., 30 октября 2003 г., 20 ноября 2003 г. и 7 ноября 2004 г.), используя метод наложенных эпох. Они обнаружили, что три из четырех исследованных бурь соответствовали качественно ожиданиям, что значительное увеличение ПСЭ происходит вскоре после значительного увеличения Ey компоненты (с восхода на заход) межпланетного электрического поля (МЭП), что подчеркивает важность неэкранированного проникновения электрических полей. В то же время, буря 20 ноября 2003 г. качественно ведет себя по-другому. Проникновение электрического поля в ионосферу задержано на 6 ч по сравнению с тремя другими бурями. Общее заключение Manucci et al. (2008) состоит в том, что глобальные ионосферные бури определяются предысторией условий солнечного ветра и существовавшими ранее и развивающимися условиями в ионосфере, термосфере и магнитосфере. Понимание и возможно предсказание поведения ионосферы на ранних стадиях геомагнитных бурь существенно зависит от предыстории БПЭП.

Fejer et al. (2007) использовали данные HP в Jicamarca, магнитометрические наблюдения и измерения с помощью ионозонда в Бразилии (Sao Luis) для изучения возмущений экваториального зонального магнитного поля и их связи с солнечным ветром и параметрами магнитосферы в период выдающейся магнитной бури 7-12 ноября 2004 г. ($SYM\text{-}H_{min}$ = -400 нТ). Наиболее неожиданным результатом исследования было то, что экваториальные дневным измерения показали большие и быстро меняющиеся возмущения направленных на восток и на запад токов, которые в целом коррелировали со скоростью изменения *Dst* индекса. Эти сильные возмущения электрических полей не совместимы с предположением о том, что экваториальные зональные поля быстрого проникновения пропорциональны электрическим полям солнечного ветра и обладают большим временем жизни во время главной фазы бури (см. выше в этом параграфе).

Развитие ЭАИ-подобных явлений во время выдающейся бури 29-30 октября 2003 г. исследовалось Horvath and Lowell (2010). Для этого использовались прямые измерения плотности плазмы, электронной температуры и скорости вертикального дрейфа V_Z на борту спутника DMSP. Также использовались ионосферные параметры foF2 и hmF2, измеренные на 18 низкоширотных и среднеширотных ионосферных станций. Horvath and Lowell (2010) обнаружили характерные особенности ЭАИ, проявлявшиеся в ранние утренние часы 29-30 октября 2003 г. и в районе местного полудня 30 октября. Они характеризовались широкой экваториальной долиной и двумя пиками, расположенными на ~±30°N (геомагнитной), что указывает на прямую циркуляцию типа супер-фонтана. Horvath and Lowell (2010) представили наблюдательное доказательство того, что не циркуляция супер-фонтана, а крупномасштабные ПИВ и сильные всплески направленного к экватору ветра были ответственны за образование особенностей ЭАИ в раннем утреннем секторе. Признаки ПИВ, обнаруженные в данных ионозонда и магнетометра, также указывают на отсутствие эффекта прямого супер-фонтана в развитии характеристик ЭИА в районе местного полудня. Из всех этих результатов авторы заключили, что сильное увеличение низкоширотной и среднеширотной плотности плазмы в местном утреннем секторе 29 и 30 октября и в районе полудня 30 октября были вызваны совместным эффектом крупномасштабных ПИВ и сильных направленных к экватору ветров, а не развитием ЭИА, поскольку не было прямой фонтанной циркуляции.

Используя сеть GPS с высоким разрешением над Японией, Unnikrishnan et al. (2005) исследовали крупномасштабные увеличения ПСЭ наблюдаемые днем в периоды сильных бурь 12–13 февраля 2000 г. (Dst_{min} = -133 нТ), 23 сентября 1999 г. (Dst_{min} = -160 нТ), 29-30 октября 2003 г. (Dst_{min} = -401 нТ) и 21 ноября 2003 г. (Dst_{min} = -472 нТ). Было обнаружено, что эти увеличения распространялись к югу со скоростью > 350 м/с. Unnikrishnan et al. (2005) зарегистрировали некоторые особенности поведения этих увеличений: их взаимодействие с расширившимися горбами ЭИА, влияние БПЭП на их амплитуду, и их подобие КМПИВ. Авторы утверждают, что их наблюдения выявляют роль направленного к экватору нейтраль-

ного ветра, который поднимает высоту слоя F2 в область низкой рекомбинации днем, что в свою очередь, приводит к росту величин ПСЭ.

Вариации GPS ПСЭ использовались Sharma et al. (2011) для изучения эффектов очень сильной геомагнитной бури 15 мая 2005 г. (*SYM-H*$_{min}$ = -300 nT) в ионосфере в трех широко разнесенных точках (в пределах 55°E-105°E), имеющих одну и ту же геомагнитную широту (15°N). Основные результаты этого исследования таковы. Временные вариации ПСЭ, вызванные геомагнитной бурей в трех пунктах в дневное время, характеризовались двумя выраженными увеличениями. Первое было вызвано подъемом ионосферной плазмы, вызванным БПЭП. Второе увеличение характеризуется широким максимумом, на который накладывались волнообразные модуляции. Считается, что эти модуляции являются проявлением ПАВ с периодом 45–55 мин. Предполагается, что увеличение отношения [O]/[N_2] в термосфере в широком диапазоне долгот в низких широтах в тот же период, когда наблюдались также модуляции ПСЭ, связано с эффектом апвеллинга, вызванного направленными к экватору нейтральными ветрами.

Специальное исследование было посвящено КМПИВ в течение интенсивных магнитных бурь 2003-2005 гг. (Ding et al., 2008). Использовались данные по ПСЭ с более чем 600 приемников GPS расположенных в Северной Америке между 25°N и 55°N. В целом наблюдалось 135 событий, и были вычислены их средние характеристики. Амплитуды вариаций ПСЭ, вызванных этими КМПИВ, лежали в пределах ±3.5 TECU. Средние величины периодов, горизонтальных скоростей и азимутов составляли 1.8 ч, 300 м/с и 187^o (7^o к западу от юга), соответственно. Из всех 135 событий КМПИВ 35 случаев (26%) произошли в ночное время с их возможным источником в регионе Северной Америки, судя по вариациям магнитной H компоненты, наблюдавшимся в этом регионе. Максимум появления КМПИВ в полдень не был обнаружен Tsugawa et al. (2004), которые провели статистический анализ КМПИВ над Японией и обнаружили, что они чаще наблюдаются ночью, чем в дневное время. Согласно Ding et al. (2008) это можно объяснить различием в широте Северной Америки и Японии, поскольку Северная Америка расположена гораздо ближе к области аврорального источника.

Аналогичное исследование было проведено Song et al. (2012). Используя данные по ПСЭ, полученные на глобальной сети GPS в регионах Северной Америки, Европы и Восточной Азии, авторы исследовали КМПИВ во время выдающейся магнитной бури 7-10 ноября 2004 г. (*SYM-H*$_{min}$ = -400 нТ). Четыре явления КМПИВ были зарегистрированы в Северной Америке, четыре в Европе и три в Восточной Азии. Были обнаружены две новых особенности распространения КМПИВ. Одной особенностью было широтное распределение азимутов распространения КМПИВ. КМПИВ имели тенденцию к более сильному отклонению к западу от юга по мере того, как они перемещались к более низким широтам. Вторая особенность состояла в том, что в различных областях КМПИВ имели разные средние горизонтальные фазовые скорости. Средняя горизонтальная фазовая скорость КМПИВ была 422±36 м/с, 381±69 м/с и 527±21 м/с в Северной Америке, Европе и Восточной Азии, соответственно.

3.3 Предбуревые возрастания N_e и foF2

Kane (1973a, b; 1975) был первым, кто указал на то, что иногда наблюдается положительная фаза ионосферной бури до SSC магнитной бури. Данилов и Белик (1991) и Danilov and Belik (1992) подчеркнули существование этого эффекта и впервые представили на одном рисунке методом наложенных эпох примеры нескольких бурь с предбуревым эффектом (см. также Danilov (2001)). Анализируя возможные причины предбуревых возрастаний foF2, Данилов и Белик (1991) и Danilov and Belik (1992) предположили, что эффект может зарождаться в области дневного каспа, поскольку последний первым начинает движение к экватору, когда приближается магнитная буря, иногда за несколько часов до SSC.

В последствии эффекты предбуревой положительной фазы как в foF2, так и в ПСЭ наблюдались многими авторами (см. ниже). Левая часть рис. 2 (взятого из Kane (2005)) дает прекрасный пример проявления положительных возмущений 28 октября 2003 г. в день, предшествующий началу выдающейся магнитной бури. Тот факт, что более или менее похожие (по форме и амплитуде) положительные фазы наблюдаются на большинстве ионосферных станций, исключает возможность предположения о том, что эффект является случайным. В течение одного 3-х часового периода 28 октября 2003 г. индекс Kp достигал 5-, но Kane (2005) сомневается в том, что это могло быть причиной сильных и длительных положительных фаз, видимых на рис. 2. В правой

части рис. 2 (выдающаяся буря 20-21 ноября 2003 г.) на некоторых станциях, особенно в секторах B и C, также видны достаточно сильные предбуревые положительные фазы в ΔfoF2 и δfoF2.

Некоторое предбуревое возрастание foF2 видно на рисунках в статье Araujo-Pradere and Fuller-Rowell (2002) (см. рис. 3 из работы Kane (2005)), но они не обсуждают этого эффекта.

Kane (2005) сделал попытку сравнить поведение foF2, наблюдаемое до и во время сильной бури 6-7 апреля 2000 г. (Dst_{min} = - 200 нТ) с предсказаниями эмпирической модели STORM (Araujo-Pradere and Fuller-Rowell, 2002). Результаты сравнения представлены на рис. 3 (взятом из работы Kane (2005)) и показывают, что модель плохо описывает поведение foF2 после SSC и ничего не говорит о сильных положительных фазах до SSC, зарегистрированных на обеих станциях. Danilov (2001) и Kane (2005) подчеркивали, что присутствие предбуревых возрастаний foF2 может быть использовано как предвестник геомагнитных возмущений. Однако, согласно Kane (2005) предбуревые эффекты могут частично иметь метеорологическую природу. Насколько известно автору данной статьи, с тех пор эта мысль не получила дальнейшего развития, или подтверждения.

Согласно Mansilla (2007) перед очень сильной бурей 15 июля 2000 г. (Dst_{min} = -300 нТ) положительные фазы с амплитудой, достигающей 30%, наблюдались на среднеширотных станциях Hobart и Canberra (южное полушарие) и Ленинград и Wallops Island (северное полушарие). Mansilla (2007) считает, что этот эффект может быть вызван высыпанием в высоких широтах мягких частиц, поскольку «в это время еще нет ни вызванной бурей циркуляции, ни изменений состава».

Во время очень сильной бури 24 ноября 2001 г. (Dstmin = -224 nT) Nogueira et al. (2011) обнаружили возрастание параметров ΔfoF2 и ΔВПСЭ примерно в 2000 LT 23 ноября, тогда как буря началась в 0400 LT 24 ноября. Рисунок 2 в работе Nogueira et al. (2011) показывает, что по крайней мере до полуночи 23/24 ноября все магнитные параметры (*Dst*, *AE*, Bz, Ey) были на совершенно спокойном уровне.

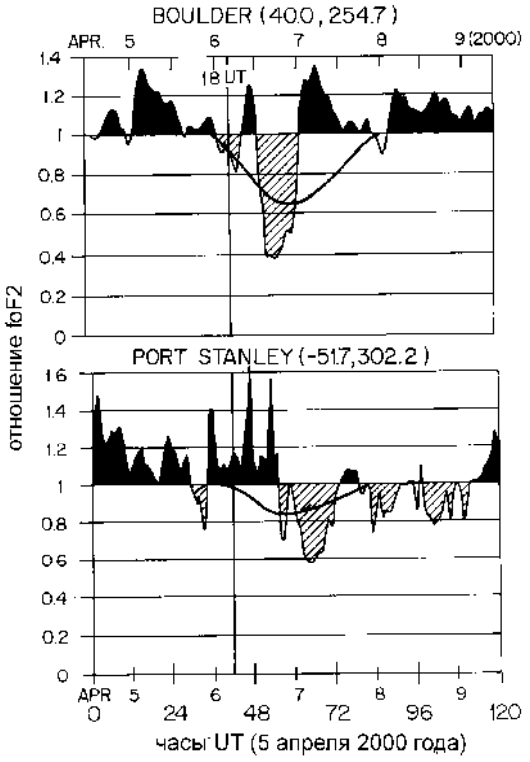

Рис. 3. Величины отношений foF2 для периода 5–9 апреля 2000 г. (буря произошла 6–7 April) для станций Boulder и Port Stanley (взято из работы Araujo-Pradere and Fuller-Rowell, 2002). Толстой кривой показано предсказание с помощью их эмпирической модели STORM, а заполненной кривой – наблюдения. Положительные отклонения зачернены, а отрицательные – заштрихованы (из работы Kane (2005)).

Buresova and Laštovička (2007) проанализировали 65 сильных геомагнитных бурь, наблюдавшихся в период 1995–2005 гг. и искали случаи предбуревых возрастаний, используя данные восьми ионосферных станций, расположенных в европейском регионе. Они обнаружили, что примерно 20-25% бурь сопровождались достаточно сильными предбуревыми возрастаниями. Buresova and Laštovička (2007) обнаружили также, что предбуревое возрастание foF2 происходит как днем, так и ночью, и выявили сезонные вариации частоты появления предбуревых возрастаний NmF2. Они имеют тенденцию чаще появляться в летнее полугодие. Число событий достаточно мало, поэтому Buresova and Laštovička (2007) предложили рассматривать полученное сезонное распределение предбуревых явлений только как тенденцию. Однако эта сезонная вариация (если она, действительно, существует) очень важна для поиска источников предбуревых явлений, поскольку она показывает,

что эти явления не связаны с сезонными вариациями появления сильных геомагнитных бурь – большинство геомагнитных бурь происходит в периоды равноденствий. Buresova and Laštovička (2007) не смогли найти какой-нибудь систематической широтной зависимости появления предбуревых явлений. Не было обнаружено также соответствующих изменений hmF2. Пример предбуревого эффекта во время выдающейся бури в День Всех Святых в 2003 г. приведен на рис. 4, взятом из работы Buresova and Laštovička (2007).

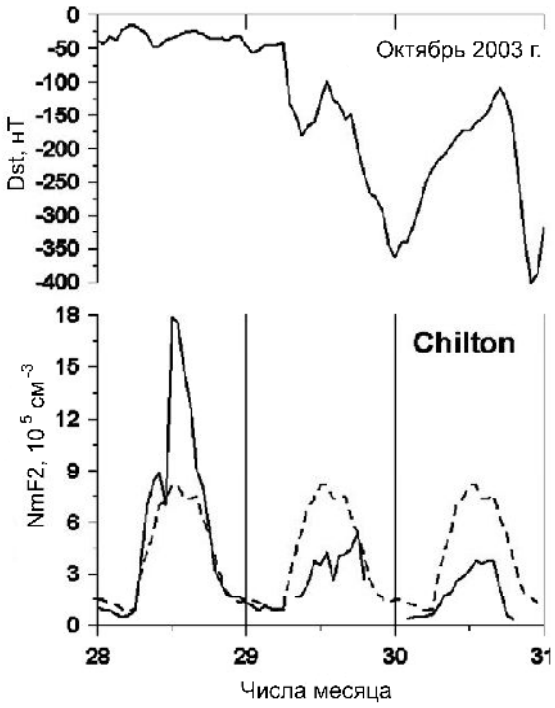

Рис. 4. Эффекты геомагнитных супер-бурь конца октября 2003 в N_mF2 на станции Chilton. Сверху приведена реакция N_mF2 (ежечасные значения): сплошная кривая соответствует измеренным величинам, штриховая кривая – месячной медиане. Сильное предбуревое увеличение происходит в середине дня, предшествующего буре (Из работы Buresova and Laštovička (2007)).

Используя данные 12 ионосферных станций северного полушария, покрывающих весь интервал долгот, Buresova and Laštovička (2008) проанализировали 15 выдающихся бурь за период 1995–2005 гг. Они обнаружили, что все рассмотренные бури в европейском регионе сопровождались значительным (>20%) ростом foF2 перед началом бури. Новым элементом изучения предбуревого эффекта была попытка определить высотный профиль предбуревого возрастания, в частности наличие эффекта в ионосферных слоях F1 и E. Buresova and Laštovička (2008) не обнаружили систематического эффекта предбуревого возрастания N_e в слое F1. Также не было никакого предбуревого возрастания и в области E. Фактически, Buresova and Laštovička (2008) обнаружили, что предбуревое возрастание ограничено слоем F2. Широтная протяженность предбуревого возрастания была найдена равной 120°–240° на основе сравнения одновременных измерений foF2 в Европе, Северной Америке и Восточной Азии.

Buresova and Laštovička (2007) отвергли несколько потенциально возможных механизмов предбуревого возрастания NmF2, но не смогли найти механизма, который был бы основной причиной наблюдаемых предбуревых возрастаний. Они высказали предположение, что, возможно, нет одного доминирующего механизма, и в каждом конкретном событии может быть свой главный механизм.

Mikhailov and Perrone (2009) проанализировали критически результаты предыдущих публикаций Danilov (20001), Buresova and Laštovička (2007, 2008) и Kane (2005), касающихся проблемы предбуревых увеличений foF2. Они классифицировали этот эффект как «иллюзию» и объяснили наблюдаемые предбуревые возрастания несколькими «нормальными» факторами такими, как рост авроральной активности, или длительный (несколько дней) рост критической частоты, не связанный с рассматриваемой бурей.

Для выявления поведения ионосферных возрастаний при низкой магнитной активности перед бурями в низких широтах Liu et al. (2008a) проанализировали отобранные низкоширотные явления возрастания, используя измерения ПСЭ приемниками GPS глобальной и региональной сети. Она анализировали поведение ПСЭ во время бурь 10 февраля 2004 г. ($SYM\text{-}H_{min}$ = -100 нТ), 21 января 2004 г. ($SYM\text{-}H_{min}$ = -140 нТ) и 4 марта 2001 г. ($SYM\text{-}H_{min}$ = -75 нТ). Они обнаружили, что низкоширотные возрастания при длительном периоде низкой геомагнитной активности до бури наблюдались для всех трех рассмотренных бурь. Увеличение ПСЭ, ΔПСЭ, были порядка 20-30 TECU перед бурей 10 февраля 2004 г. Отклонения ПСЭ от медианы около 20-30 TECU наблюдались в течение 1.5 дней перед бурей 21 января 2004 г. и около 30-40 TECU перед бурей 4 марта 2001 г.. Очень важный факт, обнаруженный Liu et al. (2008a) состоял в том, что эффект носил региональный характер: вышеуказанные величины ΔПСЭ наблюдались лишь в узкой полосе долгот с центром на 120°E. Этот факт очень важен

для исследования природы предбуревого эффекта. Локальный характер увеличения ПСЭ, обнаруженный Liu et al. (2008a) делает более трудной связь этого увеличения с изменениями глобальных параметров космической погоды и льет воду на их связь с региональными эффектами, вероятно типа «воздействия снизу» (например, осцилляций планетарных волн).

Liu et al. (2008b) исследовали увеличение электронной концентрации перед тремя другими геомагнитными бурями (21 апреля 2001 г. (Dst_{min} = -120 нТ), 29 мая 2003 г. (Dst_{min} = -150 нТ) и 22 сентября 2001 г. (Dst_{min} = -60 нТ)), используя наблюдения с помощью ионозондов и измерения ПСЭ вдоль меридиана 120°E в азиатско-австралийском секторе. Все три события демонстрируют совершенно одинаковые особенности. Сильные предбуревые возрастания foF2 и ПСЭ наблюдались одновременно для этих бурь. Возрастания демонстрировали широтную зависимость и имели тенденцию появления в низких широтах с максимумами возле северного и южного горбов экваториальной аномалии ионизации (ЭАИ) и минимумами в области экватора. Авторы утверждают, что широтная зависимость, которую они получили, отличается от результатов, полученных Buresova and Laštovička (2007), которые не нашли широтного эффекта в европейском регионе. Однако различие в широтных и долготных интервалах, рассматривавшихся в обеих статьях, может дать естественное объяснение различию полученных зависимостей.

Существование региональных эффектов в предбуревых возрастаниях foF2 и ПСЭ было также подтверждено Saranya et al. (2011). Они исследовали предбуревые эффекты над экваториальной станцией Trivandrum и низкоширотной станцией Waltair для 18 бурь с Dst_{min} < -100 нТ в период 2000-2005 гг. Было обнаружено, что обычно наблюдается существенное возрастание foF2 и ПСЭ перед началом бури над станцией Waltair, тогда как над станцией Trivandrum никакого возрастания не наблюдается. Saranya et al. (2011) пришли к выводу, что индекс *Dst* не влияет на явление предбуревого возрастания. Поскольку предбуревое возрастание наблюдалось как днем, так и ночью, ясно, что солнечные вспышки не могут быть основным двигателем механизма, ответственного за предбуревой эффект. В отличие от Buresova and Laštovička (2007), Saranya et al. (2011) обнаружили, что hmF2 также возрастал во время предбуревых возрастаний NmF2. Они предположили (в согласии с предположением Mikhailov and Perrone (2009), см. выше), что источник предбуревого возрастания может быть связан с остаточными эффектами предыдущих магнитных возмущений, сохранившихся во внешних оболочках магнитосферы. Однако этот механизм представляется неприемлемым по крайней мере для объяснения многих предбуревых возрастаний, когда до рассматриваемого события был длинный (недели и месяцы) период абсолютно спокойной геомагнитной активности.

Некоторые особенности реакции ионосферы, наблюдавшиеся в экваториальной и среднеширотной областях на две очень сильные геомагнитные бури 19-23 октября 2001 г. и 13-17 мая 2005 г. ($SYM\text{-}H_{min}$ = -300 нТ), рассматривались Adekoya et al. (2012). Особый упор был сделан на связь предбуревых явлений с поведением ионосферы во время самой бури. Они обнаружили, что умеренные вариации ионосферного слоя F2 в предбуревой период могут предвещать сильное ионосферное возмущение в течение главной фазы геомагнитной бури. Реакция ионосферного слоя F2 в низких и средних широтах не отличается существенно в период главной фазы бури и в предбуревой период. Ионосферная реакция в течение предбуревого периода выглядит удивительной. Adekoya et al. (2012) обнаружили, что слабые и умеренные отрицательные фазы наблюдались в пердбуревой период на всех станциях в низких и средних широтах.

Adekoya and Chukwuma (2012) предприняли исследование умеренной геомагнитной бури 2-6 апреля 2004 г. (Dst_{min} = -101 нТ), используя данные наземных ионозондов в средних широтах. Последние были разбиты на высокие средние и низкие средние широты. Авторы обнаружили, что поведение foF2 в течение главной фазы магнитной бури завит от поведения foF2 в предбуревой период (различным образом для разных широтных зон). На низко-среднеширотных станциях положительно-отрицательная фаза в поведении N_e (ПО буря), сформировавшаяся в предбуревой период, предвещает интенсивную отрицательную бурю во время главной фазы магнитной бури. На высоко-средних и низко-средних широтах ПО и ОП ионосферные бури в предбуревой период предвещают сильную отрицательную фазу и интенсивную положительную фазу, соответственно, во время главной фазы магнитной бури.

Анализируя глобальную ионосферную реакцию на умеренную геомагнитную бурю 3 августа 2010 г. (Dst_{min} = -90 нТ) в трех долготных секторах (Азия/Тихий океан, Европа/Африка и

Америка) Mansilla and Zossi (2012a) (см. выше параграф 3.1) получили, что одним из главных ионосферных эффектов рассматриваемой бури был тот факт, что за 4-5 часов до бури японские, австралийские и американские станции зарегистрировали хорошо выраженный рост foF2 независимо от местного времени.

Анализируя очень сильную бурю 23-27 ноября 2001 г. (Dst_{min} = -224 nT), Nogueira et al. (2011) (см. также выше в предыдущем параграфе) отметили возрастание как foF2 так и ВПСЭ примерно за 10 часов до начала бури. В течение этого времени индекс *AE* указывал на наличие в течение нескольких часов существенной авроральной активности. Наблюдалось несколько последовательных скачков *AE* с амплитудами от 500 до 800 нТ и продолжительностью порядка часа или менее. Проникающие электрические поля восточного направления, связанные со скачками *AE,* накладывались на нормальное электрическое поле также восточного направления, что вызвало усиление ЭАИ как видно из роста ΔfoF2 и ΔПСЭ в этот период. Хотя буря произошла только в ~0400 LT 24 ноября, вертикальный дрейф слоя F2 уже демонстрировал флуктуации в течение ночи, возможно как следствие возмущений в высоких широтах. В результате индексы ЭИА, ΔfoF2 и ΔВПСЭ демонстрировали некоторые флуктуации еще до резкого поворота Bz на юг.

Благовещенский и Калишин (2009) провели детальное исследование положительных фаз ионосферных бурь, предшествующих SSC. Они представили многочисленные примеры положительных ионосферных возмущений, начинающихся за 6-8 ч до взрывной фазы геомагнитной бури и обсудили возможные механизмы их образования. Они пришли к выводу, что обычные механизмы, действующие в период главной фазы магнитной бури, не могут обеспечить необходимого возрастания foF2 перед бурей. Благовещенский и Калишин (2009) предположили, что механизмы предбуревых возрастаний связаны с влиянием быстрых частиц foreshok области солнечного ветра на земную магнитосферу. Принципиальным здесь является то, что канал проникновения энергии солнечного ветра в магнитосферу отличается от канала, действующего во время самой бури. Этот канал обеспечивает перенос энергии через входной слой в магнитосферу и через дневной касп в ионосферу (как предполагалось в работе Danilov and Belik (1992)). Согласно Благовещенскому и Калишину (2009) рост foF2 в предбуревой период может использоваться для предсказания надвигающейся геомагнитной бури.

Проблема влияния ионосферных бурь на распространение радиоволн выходит за рамки данной статьи. Мы отсылаем читателя к обзору Благовещенского (2013) и детальному исследованию Blagoveshchensky et al. (2008), в котором рассматривается влияние бурь на распространение КВ радиоволн, а также к статьям, посвященным влиянию бурь на работу систем GPS (Prikryl et al., 2011; Zhang et al., 2009; Venkateswara et al., 2010) и ссылкам в указанных работах.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткий обзор наиболее важных результатов касающихся поведения ионосферы во время «обычных» бурь, представленный в параграфе 3.1, показывает, что исследования 2000-х годов почти не принесли новых идей, касающихся морфологии и физики ионосферных бурь. Действительно, основные положения схемы, разработанной ранее в кратко описанной в параграфе 2, были подтверждены и в ряде случаев получили развитие. Два основных момента, отличающих исследования 2000-х – это широкое использование данных GPS ПСЭ для исследования морфологии ионосферных бурь и моделирование поведения ионосферы в период магнитных бурь, используя современные теоретические модели.

Привлечение данных ПСЭ для изучения поведения ионосферы во время бурь очень важно. Оно позволяет существенно расширить количество анализируемых данных для каждой бури и обеспечить гораздо лучший пространственный охват явления, чем это было возможно при использовании только данных ионозондов. Однако здесь возникает одна проблема. Поведение максимума слоя F2 и ПСЭ не всегда показывает одинаковые особенности. Дело в том, что электронная концентрация на высотах максимума слоя может быть более чувствительна к изменениям нейтрального состава, температуры термосферного газа и нейтральных ветров, тогда как электродинамические эффекты (электрические поля быстрого проникновения, потоки плазмы из плазмосферы) оказывают сильное влияние на больших высотах (400-800 км), которые вносят существенный вклад в величину ПСЭ. Например, согласно Zhao (2012) во время выдающейся бури 29-30 октября 2003 г. максимальное уве-

личение электронного содержания в верхней атмосфере произошло в 3,2–7,7 раз сильнее, чем в нижней ионосфере. Различие в поведении foF2 и ПСЭ со временем может отсутствовать, и тогда, действительно, большой объем данных о ПСЭ может существенно помочь воспроизвести пространственную картину характеристик ионосферной бури. Но если разница существует, данные ПСЭ могут дать неправильную картину, которая не будет соответствовать реальной картине поведения foF2. Стоит напомнить, что в прикладных аспектах ионосферных исследований нас, прежде всего, интересует точное знание поведения критической частоты слоя F2, определяющей условия распространения КВ радиоволн.

Что касается моделирования, оно существенно помогает в поисках процессов, определяющих те или другие особенности ионосферной бури, но не может пока предсказывать полностью поведение foF2 или ПСЭ в течение всей ионосферной бури, если она достаточно продолжительна. Проблема состоит в том, что слишком много процессов, включая как воздействие извне (межпланетная среда, магнитосфера, радиационные пояса) так и влияние внутренних атмосферных процессов (воздействие снизу, нагрев атмосферного газа, термосферные ветра и перемещающиеся атмосферные возмущения) управляют окончательным поведением foF2 и ПСЭ во время (и до) магнитной бури. Например, согласно Hetch et al. (2008), изменения $[O]/[N_2]$, предсказываемые моделью NRLMSIS, не передают полностью изменения состава, вызванные геомагнитной активностью.

Эмпирическое моделирование выглядит более перспективным для решения проблемы предсказания поведения foF2 и ПСЭ, но и у него есть свои проблемы. Принципиальная проблема состоит в выборе индекса (или индексов) геомагнитной активности для использования в качестве входного параметра в моделях, нацеленных на такое предсказание. Необходимо упомянуть попытку Araujo-Pradere и Fuller-Rowell (2001, 2002) создать эмпирическую модель буревой коррекции ионосферы. Она была включена в модель IRI (Bilitza, 2001), однако она не в состоянии воспроизвести многие особенности конкретных ионосферных бурь.

Наиболее типичной особенностью поведения ионосферы во время очень сильных и выдающихся бурь является наличие сильной и продолжительной отрицательной фазы. Амплитуда δfoF2 может достигать –(70-80)%, а абсолютное уменьшение ΔfoF2 может составлять 5 МГц и более. Продолжительность такой отрицательной фазы может составлять от 20 часов до четырех дней. В летнем полушарии такое отрицательное ионосферное возмущение может распространяться от высоких широт до экватора и даже проникать в зимнее полушарие. Это предполагает наличие во время выдающихся геомагнитных бурь сильного расширения области возмущенного состава вплоть до низких широт. Это предположение подкрепляется спутниковыми измерениями области горбов ЭАИ во время интенсивных геомагнитных бурь, в которых наблюдались существенные понижения отношения [O]/[N2], вызывающие такой же эффект отрицательной фазы, как и в средних широтах (Mansilla, 2003). Указанное выше движение отрицательной фазы обеспечивается сильными направленными к экватору меридиональными ветрами, которые генерируются в полярной области. Степень уменьшения $[O]/[N_2]$ оказалась пропорциональна интенсивности бури. Однако во время фазы восстановления эта связь нарушается: отношение $[O]/[N_2]$ восстанавливается медленнее, чем N_e. Mansilla (2010) обнаружил, что уменьшение электронной концентрации иногда вызывается увеличением концентрации молекулярного азота N_2 и не всегда связано с увеличением концентрации N_2 и одновременным уменьшением концентрации атомного кислорода (см. выше параграф 2.2).

Обычно отрицательная фаза сменяется положительной во время главной фазы геомагнитной бури. Положительная фаза, как считается вызвана ПАВ, принесенными тем же самым направленным к экватору меридиональным ветром.

Однако некоторые эффекты, наблюдаемые во время выдающихся бурь (например, длительная положительная фаза на средних широтах и отрицательные фазы в низких широтах в зимнем полушарии) не находят своего естественного объяснения в рамках схемы, основанной на рассмотрении горизонтальной динамики и изменений нейтрального состава. Например, длительные (двое суток) достаточно сильные положительные фазы наблюдались на некоторых станция во время события в ноябре 2003 г. В то же время, на станции Dyess (32^oN, 100^oW) зарегистрирована сильная ($\Delta foF2 \geq 5$ МГц) и длительная (около 20 ч) отрицательная фаза, которая не ожидается на таких широтах зимой. Видимо, в формировании ионосферной бури должны принимать участие принципиально различные группы процессов связанные с

ионосферно-магнитосферной электродинамикой.

Изменения $[O]/[N_2]$, предсказываемые моделью NRLMSIS, не могут полностью описать изменения состава, вызванные геомагнитной активностью. Например, в период 17-20 ноября 2003 г., модель хорошо описала небольшие изменения во время низкой геомагнитной активности и отразила общую тенденцию уменьшения $[O]/[N_2]$ во время выдающейся бури 20 ноября 2003 г., но недооценила амплитуду эффекта. Однако наибольшее рассогласование наблюдалось 17 ноября (короткий всплеск магнитной активности), когда модельные и наблюдательные данные демонстрируют сильное расхождение (Hetcht et al., 2008).

Во время очень сильных и выдающихся бурь наблюдается сильное возрастание электронной концентрации в верхней ионосфере. Это возрастание концентрации локализовано, главным образом, в области южно-атлантической аномалии (ЮАА), для которой характерны очень интенсивные потоки энергичных частиц. Таким образом, помимо быстрого проникновения межпланетного электрического поля, ионизация ионосферы усиленным высыпание энергичных частиц из радиационных поясов также ответственна за возрастание концентрации ионов во время бури.

В параграфе 3.2 были рассмотрены проникновения магнитосферного электрического поля в ионосферу во время умеренных бурь. Было показано, что эти электрические поля ответственны за положительные фазы ионосферной бури, наблюдаемые в низких и средних широтах. Однако во время выдающихся геомагнитных событий имеются электрические поля, проникающие в ионосферу и связанные непосредственно с МЭП (БПЭП). БПЭП вызывают положительные и отрицательные фазы ионосферной бури в дневное и ночное время, соответственно. Дневная фаза характеризуется переносом плазмы из приэкваториальной области вверх по высоте и широте, образуя гигантский плазменный фонтан, который составляет часть так называемого дневного ионосферного супер-фонтана (Tsurutani et al., 2008).

Электрические поля прямого проникновения чувствительны к межпланетному электрическому полю. Во время выдающихся магнитных бурь межпланетное электрическое поле значительно усиливается и усиливает БПЭП. Последнее вызывает сильное увеличение дневного электронного содержания (на 250% во время бури Дня Всех Святых согласно Manucci et al (2005)), поднимая ионосферу в дневное время и экваториальную плазму за счет диффузии вдоль магнитных силовых линий в более высокие широты и создавая тем самым эффект «дневного супер-фонтана»

Возникает важный вопрос об относительной роли полей проникновения по сравнению с возмущенным процессом динамо в поддержании длительных событий возмущения поля. Чтобы ответить на этот принципиальный вопрос, Maruyama et al. (2007) провели численное моделирование. Полученные результаты можно схематически представить следующим образом. На ранней стадии бури ($t < 12$ ч) днем доминирует эффект проникновения, который может обладать большим временем жизни когда Bz компонента ММП велика и отрицательна. Ночью эффекты быстрого проникновения и возмущенного динамо сравнимы. На более поздней стадии ($t > 12$ ч) днем менее вероятно, что поле проникновения следует за вариациями солнечного ветра и ММП. Механизм возмущенного динамо контролирует дневной дрейф в гораздо большей степени, чем на ранней стадии.

Общеизвестно, что ЭАИ должна быть лучше развита во время выдающихся геомагнитных событий. Электрические поля быстрого проникновения появляются на ионосферных высотах почти одновременно с SSC (Abreu et al, 2010). Однако наблюдения показывают, что усиление ЭАИ задерживается. Согласно Siqueira et al. (2011) наиболее неожиданным результатом этого исследования было отсутствие ЭИА в первый день бури 7 ноября 2004 г.. Но расширение и усиление ЭИА из-за электрических полей прямого проникновения наблюдалось 9 ноября 2004 г.. Subrahmanyan et al. (2005) также обнаружил, что ЭАИ была ослаблена в течение12–24 ч после начала бури. Во время очень сильной бури 23-27 ноября 2001 г. (Dst_{min} = -224 нТ) усиление ЭАИ наблюдалось только в вечерние часы 25, 26 и 27 ноября 2001 г. (Nogueira, et al., 2011). С другой стороны, Horvath and Lowell (2010) пришли к заключению, что значительное увеличение концентрации плазмы в низко-средних широтах в местном утреннем секторе 29 и 30 октября 2003 и около местного полудня 30 октября 2003 г. было вызвано совместным эффектом крупномасштабных ПИВ и направленных к экватору сильных нейтральных ветров, а не развитием

ЭАИ, т. к. не было прямой фонтанной циркуляции.

Анализируя быструю реакцию дневной ионосферы на четыре геомагнитных бури и используя метод наложенных эпох, Manucci et al. (2008) обнаружили, что три из четырех исследованных выдающихся бурь указывали на важность неэкранированного проникновения электрических полей. В четвертой буре проникновение электрических полей в ионосферу было задержано на шесть часов по сравнению с тремя другими бурями. Manucci et al. (2008) заключили, что глобальные ионосферные бури определяются предысторией условий солнечного ветра, а также предшествующими и текущими условиями в ионосфере, термосфере и магнитосфере. Понимание и, возможно, предсказание поведения ионосферы на ранних стадиях геомагнитной бури существенно зависит от предыстории БПЭП.

Однако Fejer et al. (2007) обнаружил, что сильные возмущения электрических полей не совместимы с предположением, что экваториальные поля быстрого проникновения пропорциональны электрическим полям солнечного ветра и обладают долгим временем жизни во время главной фазы бури.

Sojka et al (2012) исследовали также роль термосферного ветра в буревых условиях и обнаружили, что он является потенциально таким же по величине эффектом с собственной долготной зависимостью, которая может усиливать или гасить эффект усиления электрического поля.

Таким образом, мы видим, что картина быстрого проникновения электрических полей в ионосферу и их роль в образовании положительных возмущений на низких широтах и явления ЭАИ все еще очень противоречива. Это очевидно связано с многочисленными и физически сложными процессами, участвующими во взаимодействии между межпланетным пространством, магнитосферой, ионосферной и нейтральной атмосферой.

До 2000 г. эффект предбуревого увеличения foF2 упоминался в работах Kane (1973a,b; 1975) и Danilov and Belik (1992). Предыдущее десятилетие принесло ряд исследований, посвященных этому явлению.

Было показано, что предбуревой эффект наблюдается не только в foF2 при наземных измерениях с помощью ионозондов, но также и в данных ПСЭ. Было также показано (см. рис. 2 выше), что сильная положительная фаза может наблюдаться в течение целого дня предшествующего SSC на многих ионосферных станциях в различных широтных и долготных зонах.

Делались попытки найти изменения геомагнитной активности в течение этих предбуревых периодов. В некоторых случаях были обнаружены небольшие вариации или краткий всплески индексов *Kp* или *AE* (Kane, 2005; Nogueira et al., 2011), но многие авторы заявляли, что геомагнитная активность в период предбуревых явлений была абсолютно спокойной в течение нескольких дней.

Резюмируя результаты исследований предбуревых возрастаний, описанные в параграфе 3.3, можно утверждать следующее. В настоящее время нет сомнений в том, что эффект существует. Предбуревые возрастания происходят примерно в 25-30% обычных бурь и почти при всех выдающихся бурях. Наиболее важным является вопрос о том, всегда ли имеется какой-нибудь вид геомагнитных возмущений (короткие всплески геомагнитных индексов, или остатки геомагнитных возмущений, произошедших раньше), или предбуревые увеличения могут происходить на абсолютно спокойном геомагнитном фоне. Как следует из параграфа 3.3, имеются сторонники обеих точек зрения. Дополнительная трудность состоит в том, что такие возрастания могут не быть связаны прямо с геомагнитной активностью, но отражать некоторое взаимодействие между ионосферой и нейтральной атмосферой (воздействие снизу). Однако, став на эту позицию, нам придется предположить, что имеются какие-то механизмы, которые позволяют нейтральной атмосфере «чувствовать» приближение геомагнитного возмущения. Никаких идей на этот счет до сих пор предложено не было.

Автору данного обзора представляется более привлекательной точка зрения, впервые описанная в работах Данилова и Белик (1991) и Danilov and Belik (1992) и поддержанная и развитая Благовещенским и Калишиным [2009], что предбуревые возрастания foF2 и ПСЭ могут быть связаны с неким иным каналом проникновения энергии из межпланетного пространства и магнитосферы в ионосферу. Если это действительно так, то поведение foF2 в предбуревой период может служить своего рода сообщением о характере предстоящих геомагнитной буре и ионосферном возмущении, как было получено в работе Adekoya and Chukwuma (2012).

Автор благодарит А. В. Константинову за помощь в подготовке рукописи.

REACTION OF F REGION TO GEOMAGNETIC DISTURBANCES (REVIEW)

A.D. Danilov

The F2-region reaction to geomagnetic storms usually called as an ionospheric storm is a rather complicated event. It consists of so called positive and negative phases, which have very complicated spatial and temporal behavior. The main morphological features of ionospheric storms and the main processes governing their behavior were understood at the end of the 1900s and described in a series of review papers. During the recent decade there were many publications dedicated to the problem of ionospheric storms. In this paper a concept of ionospheric storm morphology and physics formulated at the end of the 1990s is briefly summarized and the most interesting results obtained in the 2000s are described. It is shown that the main features of the studies of the previous decade were: the use of GPS TEC data for analyzing the ionospheric storm morphology, attraction of sophisticated theoretical models for studying the processes governing ionospheric behavior in disturbed conditions, and accent to analysis of ionospheric behavior during prominent events (very strong and great geomagnetic storms). Also a special attention was paid to the pre-storm enhancements in foF2 and TEC.

KEYWORDS: IONOSPHERE , PLASMOSPHERE , TEC, STORM

ЛИТЕРАТУРА

Благовещенский, Д.В., Калишин, А.С., Механизм возрастания критической частоты ионосферы до начала суббури, Геомагнетизм и аэрономия, 49(3), 213-223, 2009.

Благовещенский Д.В., Влияние геомагнитных бурь (суббурь) на КВ распространение (обзор), Геомагнетизм и аэрономия, 53(3) 2013 (в печати).

Данилов, А. Д., Белик Л. Д. Термосферно-ионосферное взаимодействие во время геомагнитных бурь, Геомагнетизм и аэрономия, 31(2), 209-222, 1991.

Калегаев В.В., Макаренков Е.В., Динамика магнитосферных токовых систем во время магнитных бурь разной интенсивности, Геомагнетизм и аэрономия, 46(5), 604-613, 2006.

Михайлов, А. В., Ионосферные возмущения и их прогнозирование, Энциклопедия низкотемпературной плазмы, Серия В, Том 1-3, часть 2, стр. 182-210, «Янус-К», Москва, 2010.

Михайлов, А. В., Терехин, Ю. Л., Михайлов В. В., Отслеживает ли слой F2 уровень постоянного давления?, Геомагнетизм и аэрономия, 29, 1035-1043, 1989.

de Abreu, A.J., Sahai, Y., Fagundes, P.R., Becker-Guedes, F., de Jesus, R., Guarnieri, F.L., Pillat, V.G., Response of the ionospheric F-region in the Brazilian sector during the super geomagnetic storm in April 2000 observed by GPS, Adv. Space Res., 45(11), 1322-1329, 2010.

Adekoya, B.J., Chukwuma, V.U., The effects of geomagnetic storm on middle latitude ionospheric F2 variations during storm of April (2-6), 2004, Indian J. Rad. Sci. Space Phys. 41(6), 606-616, 2012.

Adekoya, B.J., Chukwuma, V.U., Bakare, N.O., David, T.W., On the effects of geomagnetic storms and pre storm phenomena on low and middle latitude ionospheric F2, Astrophysics and Space Sci., 340(2), 217-235, 2012.

Adeniyi, J.O., Magnetic storm effect on the morphology of the equatorial F2-layer, J. Atmos. Terr. Phys., 48, 695-702 , 1986.

Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J., Evaluation of the STORM time ionospheric empirical model for the Bastille Day event, Solar Phys., 204, 315-322, 2001.

Araujo-Pradere, E.A., Fuller-Rowell, T.J.: STORM: An empirical storm-time ionospheric correction model, 2. Validation, Radio Sci. 37, 5, 1071, doi:10.1029/2002RS002620, 2002.

Burton, R.K., McPherron, R.L., Russel, C.T., An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst*, J. Geophys. Res., 80 (A12), 4204-4214, 1975.

Batista, I.S., Abdu, M.A., Souza, J.R., Bertoni, F., Matsuoka, M.T., Camargo, P.O., Bailey, G.J., Unusual early morning development of the equatorial anomaly in the Brazilian sector during the Halloween magnetic storm, J. Geophys. Res., 111 (A5), 307.1–307.10, 2006.

Batista, I. S., de Paula, E. R., Abdu, M. A., Trivedi, N. B., Greenspan, M. E., Ionospheric effects of the March 1989 magnetic storm at low and equatorial latitudes, J. Geophys. Res. 96, 3 943–13 952, 1991.

Bhatnagar, V.P., Tan, A., Ramachandaran, R., On the response of the exospheric temperature to the auroral heating impulse during geomagnetic disturbances, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 68,1237–1244, 2006

Bilitza, D. International Reference Ionosphere, Radio Sci., 36(2), 261-275, 2001

Blagoveshchensky, D.V., Kalishin, A.S., Sergeyeva, M. A.,Space weather effects on radio propagation: study

of the CEDAR, GEM and ISTP storm events, Ann. Geophys., 26, 1479–1490, 2008

Borries, C., Jakowski, N., Wilkenet, V., Storm induced large scale TIDs observed in GPS derived TEC, Ann. Geophys., 27, 1605-1612, 2009.

Buonsanto, M.J., Ionospheric storms – A review, Space Science Reviews, 88, 563-601, 1999.

Buresova, D., Laštovička , J., Pre-storm enhancements of foF2 above Europe. Adv. Space Res. 39, 1298–1303. 2007.

Buresova, D., Laštovička, J.: Pre-stormelectron density enhancements at middle latitudes, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 70, doi:10.1016/j.jastp 2008.01.014.2008.

Burton, R.K., McPherron, R.L., Russel, C.T., An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst, J. Geophys. Res., 80(A12), 4204-4214, 1975.

Danilov, A. D.: F-2 region response to geomagnetic disturbances, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 63, 441–449, 2001.

Danilov A. D., Belik, L.D., Thermospheric composition and the positive phase of an ionospheric storm, Adv. Space Res. 12(10), 257-260, 1992.

Danilov, A.D., Laštovička , J., Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. Int. J. Geomag. Aeron., 2, 209-224, 2001.

David, T.V., Adedakun, V.O., Effects of local time on the F2-region response to the Geomagnetic Storm on January 28, 1985, J. Natural Applied Sci., 5(3), 244-250, 2009.

David, M., Sojka, J. J., Schunk, R.W., Liemohn, M.W., Coster, A. J., Dayside midlatitude ionospheric response to storm time electric fields: A case study for 7 September 2002, J. Geophys. Res., 116, A12302, doi:10.1029/2011JA016988, 2011.

Deng, Y., Maute, A., Richmond, A.D., Roble, R.G., Analysis of thermospheric response to magnetospheric inputs, J. Geophys. Res., 113, A04301, doi:10.1029/2007JA012840, 2008

Ding, F., Wan, W., Liu, L., Afraimovich, E.L., Voeykov, S.V., Perevalova, N.P., A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during major magnetic storms over the years 2003–2005, J. Geophys. Res. 113, A00A01, doi:10.1029/2008JA013037, 2008

Dmitriev, A., Yeh, H.-C., Storm-time ionization enhancements at the topside low-latitude ionosphere, Ann. Geophys., 26, 867-876, 2008.

Fejer, B. G., Jensen, J. W., Kikuchi, T., Abdu, M.A., Chau, J. L., Equatorial Ionospheric Electric Fields During the November 2004 Magnetic Storm, J. Geophys. Res. 112, A10304, doi:10.1029/2007JA012376, 2007

Field, P.R., Rishbeth, H., Moffett, R.J., Idenden, D.W., Fuller-Rowell, T. J., Millward, G.H., Aylward, A.D. , Modeling composition changes in F-layer storms, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 60 (5), 523-543, 1998.

Foster, J.C., Rideout, W., Storm enhanced density: magnetic conjugacy effects, Ann. Geophys., 25, 1791–1799, 2007.

Fuller-Rowell, T.J., Codrescu, M.V., Moffett, R.J., Quegan S., Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms, J. Geophys. Res., 99, 3893-3914, 1994.

Fuller-Rowell, T.M., Millward, G.H., Richmond, A.D., Codrescu, M.V., Storm-time changes in the upper atmosphere at low latitudes, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 64, 1383–1391, 2002.

Galav, P., Sharma, S., Pandey, R., Study of simultaneous penetration of electric fields and variation of total electron content in the day and night sectors during the geomagnetic storm of 23 May 2002, J. Geophys. Res., 116, A12324, doi:10.1029/2011JA017002, 2011.

Gillies, D. M., McWilliams, K. A., St. Maurice, J.-P., Milan, S. E., Global-scale observations of ionospheric convection during geomagnetic storms, J. Geophys. Res, 116, A12238, doi:10.1029/2011JA017086, 2011.

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., 69,1253–1272, 2007.

Gonzalez, W.D., Tsurutani, B.T., Gonzalez, A.L.C., Interplanetary origin of geomagnetic storms, Space Sci. Rev., 88(3-4), 529-562, 1999.

Heelis, R. A., Sojka, J.J., David, M., Schunk, R.W., Stormtime density enhancements in the middle latitude dayside ionosphere, J. Geophys. Res., 114, A03315, doi:10.1029/2008JA013690, 2009.

Hecht, J.H., Mulligan, T., Strickland, D. J., et al., Satellite and ground-based observations of auroral energy deposition and the effects on thermospheric composition during large geomagnetic storms: 1. Great geomagnetic storm of 20 November 2003, J. Geophys. Res. 113, A01310, doi:10.1029/2007JA012365, 2008

Horvath, I., Lovell, B. C., Large-scale traveling ionospheric disturbances impacting equatorial ionization anomaly development in the local morning hours of the Halloween Superstorms on 29–30 October 2003, J. Geophys. Res., Space Physics (1978–2012), 115(4), DOI: 10.1029/2009JA014922, 2010.

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., Space Physics (1978–2012), 108(A1), DOI: 10.1029/2002JA009782, 2003.

de Jesus, R., Sahai, Y., Guarnieri, F.L., et al., Effects observed in the ionospheric F-region in the South

American sector during the intense geomagnetic storm of 14 December 2006, Adv. Space Res. 46(7), 909-920, 2010.

Jin, H., Maruyama, T., Temporary decrease in daytime F-region peak electron density due to eastward electric field penetration during magnetic storm, J. Geophys. Res., 113, A05305, doi:10.1029/2006JA011928, 2008.

Kalegaev, V.V., Ganushkina, N.Yu., Pulkkinen, T.I., Kubyshkina, M.V., Singer, H.J., Russell, C.T., Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms, Ann. Geophys., 26(2), 523-533, 2005.

Kane, R.P., Storm-time variations of F2, Ann. Geophys., 29, 25–42, 1973a.

Kane, R.P., Global evolution of F2-region storms, J. Atmos. Terr. Phys., 35, 1953–1966, 1973b.

Kane, R.P., Global evolution of the ionospheric electron content during some geomagnetic storms, J. Atmos. Terr. Phys., 37, 601–611, 1975.

Kane, R.P., Ionospheric foF2 anomalies during some intense geomagnetic storms, Ann. Geophys., 23, 2487-2499, 2005.

Kelley, M. C., Makela, J. J., de la Beaujardiere, O., Convective ionospheric storms: A major space weather problem, Space Weather, 4, S02C04, doi:10.1029/2005SW000144, 2006.

Kil, H., Paxton, L.J., Kim, K.H., Park, S., Zhang, Y., Oh, S.J., Temporal and spatial components in the storm-time ionospheric disturbances, J.Geophys. Res., 116, A11315, doi:10.1029/2011JA016750, 2011.

Lei, J., Wang, W., Burns, A.G., Solomon, S.C., Richmond, A.D., Wiltberger, M., Goncharenko, L.P., Coster, A., Reinisch, B.W., Observations and simulations of the ionospheric and thermospheric response to the December 2006 geomagnetic storm: Initial phase, J. Geophys. Res. 113, A01314, doi:10.1029/2007JA012807, 2008

Liu, L., Wan, W., Zhang, M.-L., Zhao, B., Case study on total electron content enhancements at low latitudes during low geomagnetic activities before the storms, Ann. Geophys., 26, 893–903, 2008a.

Liu, L., Wan, W., Zhang, M-L., Zhao, B., Ning, B., Pre-storm enhancements in NmF_2 and total electron content at low latitudes, J. Geophys. Res.: Space Physics (1978–2012), 113(A2), DOI: 10.1029/2007JA012832, 2008b.

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. 113, A08304, doi:10.1029/2007JA012895, 2008

Mahrous, A., Global Ionospheric Response to the Magnetic Storm of 21 October 1999, Australian J. Basic Applied Sci., 1(4), 678-686, 2007

Mansilla, G.A., Disturbances at F2-region heights of equatorial anomaly during geomagnetic storms, J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 65(9), 987-995, 2003.

Mansilla G.A., Mid-latitude effects of a great geomagnetic storm, J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 66(12), 1085-1091, 2004.

Mansilla, G.A., Ionospheric effects of an intense geomagnetic storm, Studia Geophys. Geodet., 51(4), 563-574, 2007.

Mansilla, G.A., Thermosphere–ionosphere response at middle and high latitudes during perturbed conditions: A case study, J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 70, 1448–1454, 2008

Mansilla, G.A., Some effects in the upper atmosphere during geomagnetic storms, Adv. Space Res., 47(6), 930-937, 2010.

Mansilla, G.A., Zossi, M. M., Ionospheric response to the 3 August 2010 geomagnetic storm at mid and mid-high latitudes, Adv. Space Res., 51(1), 50-60, 2012a.

Mansillo G.A., Zossi M. Thermosphere-ionosphere response to a severe magnetic storm: A case study, Adv. Space Res., 49(11), 1581-1586, 2012b.

Mannucci, A.J. , Tsurutani, B.T., Iijima, B.A., Komjathy, A., Saito, A., Gonzalez, W. D., Guarnieri, F.L., Kozyra, J.U., Skoug, R., Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29–30, 2003 ‘‘Halloween Storms’’, Geophys. Res. Lett. 32, L12S02, doi:10.1029/2004GL021467, 2005

Mannucci, A.J., Tsurutani, B.T., Abdu, M.A., Gonzalez, W.D., Komjathy, A. Echer, E., Iijima, B. A., Crowley, G., Anderson, D., Superposed epoch analysis of the dayside ionospheric response to four intense geomagnetic storms, J. Geophys. Res., 113, A00A02, doi:10.1029/2007JA012732, 2008

Maruyama, T., Ma, G., Nakamura, M., Signature of TEC storm on 6 November 2001 derived from dense GPS receiver network and ionosonde chain over Japan, J. Geophys. Res., 109, A10302, doi:10.1029/2004JA010451, 2004.

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., 32 (L17105), 2005.

Maruyama, N., Sazykinb, S., Spirob, R.W. et al., Modeling storm-time electrodynamics of the low-latitude ionosphere–thermosphere system: Can long lasting disturbance electric fields be accounted for?, J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 69, 1182–1199, 2007.

Mendillo, M., Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content, Rev. Geophys., 44, RG4001, doi:10.1029/2005RG000193, 2006.

Mendillo, M., Narvaez, C., Ionospheric storms at geophysically-equivalent sites – Part 1: Storm-time patterns for sub-auroral ionospheres, Ann. Geophys., 27, 1679–1694, 2009

Mendillo, M., Narvaez, C., Ionospheric storms at geophysically-equivalent sites – Part 2: Local time storm patterns for sub-auroral ionospheres, Ann. Geophys., 27, 1449–1462, 2010.

Mikhailov A.V., Forster, M., Day-to-day thermosphere parameter variation as deduced from Millstone Hill incoherent scatter radar observations during March 16-22, 1990 magnetic storm period, Ann. Geophys., 15, 1429-1438, 1997.

Mikhailov, A.V., Foster, J.C., Daytime thermosphere above Millstone Hill during severe geomagnetic storms, J. Geophys. Res., 102 (A8), 17,275-17,282, 1997.

Mikhailov, A.V, Perrone, L., Pre-storm NmF2 enhancements at mid latitudes: Delusion or reality?, Ann. Geophys., 27, 1321-1330, 2009.

Mikhailov, A., Schlegel, K., Physical mechanism of strong negative storm effect in the daytime ionospheric F2 region observed with EISCAT, Ann. Geophys., 16(5), 602-608, 1998.

Mikhailov, A.V., Forster, M., Skoblin, M.G., Neutral gas composition changes and ExB vertical plasma drift contribution to the daytime equatorial F2-region storm effects, Ann. Geophys., 12, 226-231, 1994.

Mikhailov, A.V., Skoblin, M.G., Forster, M., Daytime F2-layer positive storm effect at middle and lower latitudes, Ann. Geophys. 13, 532-540, 1995.

Morton, Y. T., Mathews, J. D., Zhou, Q., Electron Concentration Configurations During the 13–14 March 1989 Geomagnetic Storm as Measured by Arecibo Incoherent Scatter Radar, Spring American Geophysical Union Meeting, Baltimore, MD, (28 May–1 June 1991), 1991.

Ngwira, C. M., McKinnell, L.-A., Cilliers, P. J., Coster, A. J., Ionospheric observations during the geomagnetic storm events on 24–27 July 2004: Long-duration positive storm effects, J. Geophys. Res. 117, A00L02, doi:10.1029/2011JA016990, 2012

Nogueira, P.A.B., Abdu, M.A., Batista, I.S., deSiqueira, P.M., Equatorial ionization anomaly and the rmospheric meridional winds during two major storms over Brazilian low latitudes, J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 73, 1535–1543, 2011.

Oyama, S., Watkins, B. J., Maeda, S., Shinagawa, H., Nozawa, S., Ogawa, Y., Brekke, V., Lathuillere, C. , Kofman, W., Generation of the lower-thermospheric vertical wind estimated with the EISCAT KST radar at high latitudes during periods of moderate geomagnetic disturbance, Ann. Geophys., 26, 1491–1505, 2008

Pavlov, A.V., The role of vibrationally excited nitrogen in the formation of the midlatitude negative ionospheric storms, Ann. Geophys., 12, 554-564, 1994.

Pavlov, A.V., Buonsanto, M.J., Comparison of model electron densities and temperatures with Millstone Hill observations during undisturbed period and the geomagnetic storms of 16-23 March and 6-12 April 1990, Ann. Geophys., 15, 327-344, 1997.

Prikryl, P., Spogli, L. , Jayachandran, P. T., et al., Interhemispheric comparison of GPS phase scintillation at high latitudes during the magnetic-cloud-induced geomagnetic storm of 5–7 April 2010, Ann. Geophys., 29, 2287–2304, 2011

Prolls, G.W., Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere: recent results obtained by satellite-borne gas analyzers, Rev. Geophys, Space Phys., 18, 183-202, 1980.

Prolls, G., Ionospheric F-region storms, in Handbook of Atmospheric Electrodynamics, Vol 2 (ed. by H. Volland), CRC Press/ Boca Raton, pp. 195-248, 1995.

Prolls, G.W., von Zahn, U., ESRO 4 gas analyzer results. 2. Direct measurements of changes in the neutral composition during an ionospheric storm., J. Geophys. Res., 79, 2335, 1974.

Rees, D., Observations and modeling of ionospheric and thermospheric disturbances during major geomagnetic storms: A review, J. Atmos. Terr. Phys., 57, 1433, 1995.

Rich, F.J., Denig, W.F., The major magnetic storm of 13–14 March 1989 and associated ionospheric effects, Can. J. Phys., 70, 510–525, 1992.

Rishbeth, H., Barron, R., Equilibrium electron distribution in the ionospheric F2-layer. J. Atmos. Terr. Phys. 18, 234-252, 1960.

Saranya, P. L., Venkatesh, K., Prasad, D. S. V. V. D., Rama Rao, P. V. S., Niranjan, K., Pre-storm behaviour of NmF_2 and TEC (GPS) over equatorial and low latitude stations in the Indian sector, Adv. Space Res., 48(2), 207-217. 2011.

Sahai, Y., De Abreu, A.J., Fagundes, P.R. et al., Effects of geomagnetic super storms on the ionospheric F region in the South American Sector using a GPS technique, Asian J. Phys. 20(4), 299-318, 2011

Schunk, R.W., and Sojka, J.J.: Ionosphere-thermosphere space weather issues, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 58(14), 1527-1574, 1996.

Schunk, R.W., Raitt, W.J., Banks, P.M., Effects of electric fields on the daytime high-latitude E and F regions, J. Geophys. Res, 80, 3121-3130, 1975.

Seaton, M.J., A possible explanation of the drop in F-region critical densities accompanying major ionospheric storms, J. Atmos. Terr. Phys., 8, 122-123, 1956.

Sharma, S., Galav, P., Dashora, N., Pandey R., Longitudinal study of the ionospheric response to the

geomagnetic storm of 15 May 2005 and manifestation of TADs, Ann. Geophys., 29, 1063–1070, 2011

Shimeis, A., Fathy, I., Amory-Mazaudier, C., Fleury , R., Mahrous, A.M., Yumoto K., Groves, K., Signature of the Coronal Hole on near the North Crest Equatorial 1 Anomaly over Egypt during the strong Geomagnetic Storm 5th April 2010, J. Geophys. Res. DOI 10.1029/2012 JAO 17753, 2013.

de Siqueira, P. M., de Paula, E. R., Muella, M. T. A. H., Rezende, L. F. C., Abdu, M. A. Gonzalez, W.D., Storm-time total electron content and its response to penetration electric fields over South America, Ann. Geophys., 29, 1765–1778, 2011

Sojka, J.J., David, M., Schunk, R.W., Heelis, R. A., A modeling study of the longitudinal dependence of storm time midlatitude dayside total electron content enhancements, J. Geophys. Res. 117, A02315, doi:10.1029/2011JA017000, 2012

Song, Q., Ding, F. , Wan, W., Ning, B., Liu, L., Global propagation features of large-scale traveling ionospheric disturbances during the magnetic storm of 7_10 November 2004, Ann. Geophys., 30, 683–694, 2012

Stephan, A.W., Meier, R.R., Paxton, L.J., Comparison of Global Ultraviolet Imager limb and disk observations of column O/N2 during a geomagnetic storm, J. Geophys. Res. 113, A01301, doi:10.1029/2007JA012599, 2008

Subrahmanyam, P., Jain, A.R., Singh, L., Garg, S. C., Role of neutral wind and storm time electric fields inferred from the storm time ionization distribution at low latitudes: in-situ measurements by Indian satellite SROSS-C2, Ann. Geophys., 23, 3289–3299, 2005

Sun, S.J., Ban, P.P., Chen, C., Xu, Z.W., Zhao, Z.W., On the vertical drift of ionospheric F layer during disturbance time: Results from ionosondes, J. Geophys. Res. 117, A01303, doi:10.1029/2011JA017106, 2012

Troshichev, O., Janzhura, A., Relationship between the PC and AL indices during repetitive bay-like magnetic disturbances in the auroral zone, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 71(12), 1340-1352, 2009.

Tsugawa, T., Saito, A., Otsuka, Y., A statistical study of large scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network in Japan, J. Geophys. Res., 109, A06302, doi:10.1029/2003JA010302, 2004.

Tsurutani, B.T., Verkhoglyadova, O.P., Mannucci, A.J., et al. Prompt penetration electric fields (PPEFs) and their ionospheric effects during the great magnetic storm of 30–31 October 2003, J. Geophys. Res., 113, A05311, doi:10.1029/2007JA012879, 2008

Turunen, T., Rao, M.N., Examples of the influence of strong magnetic storms on the equatorial F-layer, J. Atmos. Terr. Phys., 42, 323-330, 1980.

Unnikrishnan, K., Saito, A., Otsuka, Y., Yamamoto, M., Fukao, S., Transition region of TEC enhancement phenomena during geomagnetically disturbed periods at mid-latitudes, Ann. Geophys., 23, 3439–3450, 2005

Venkateswara Rao, N., Madhu, T., Lal Kishore, K., Geomagnetic Storm Effects on GPS Aided Navigation over Low Latitude South Indian Region, International J. Computer Sci. Network Security, 10(3), March 2010.

Wanliss, J.A., Dobias, P., Space Storm as a phase transition, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 69, 675-684, 2007.

Wanliss, J.A., Showalter, K., The high resolution global storm index: DST versus SYM-H. J. Geophys. Res. 111, A02202, 2006.

Wolf, R.A., Spiro, R.W., Sazykin, S., Toffoleto, F.R., How the Earth's inner magnetosphere works: An evolving picture, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 69, 288–302, 2007.

Yeh, K. C., Lin, K. H., Conkright, R. O., The global behavior of the March 1989 ionospheric storm, Canad. J. Phys., 70, 532–543, 1992.

Yizengaw, E., Dyson, P.L., Essex, E.A., Moldwin, M., Ionosphere dynamics over the Southern Hemisphere during the 31 March 2001 severe magnetic storm using multi-instrument measurement data, Ann. Geophys., 23, 707-721, 2005

Yizengaw, E., Moldwin, M.B., Komjathy, M.B., Mannucci, A.J., Unusual topside ionospheric density response to the November 2003 superstorm, J. Geophys. Res., 111, A02308, doi:10.1029/2005JA011433, 2006.

Yizengaw, E. , Essex, E.A., Birsa, The Southern Hemisphere and equatorial region ionization response for a 22 September 1999 severe magnetic storm, Ann. Geophys., 22, 2765–2773, 2004.

Zhao, B., Wan, W., Lei, J., Wei, Y., Sahai, Y., Reinisch, B., Positive Ionospheric Storm Effects at Latin America Longitude during the Superstorm of 20–22 November 2003: Revisit, Adv. Space Res., 51(1), 50-60, 2013.

Zhang, W., Zhang, D.H., Xiao, Z., The influence of geomagnetic storms on the estimation of GPS instrumental basis, Ann. Geophys. 27, 1613-1623. 2009.