

УДК 550.388.2

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ/СУББУРЬ НА ИОНОСФЕРУ. Ч. 1. (Обзор)

© 2013 г. Д. В. Благовещенский

Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург  
e-mail: [dvb@aanet.ru](mailto:dvb@aanet.ru)

Поступила в редакцию 20.02.2012 г.  
После доработки 23.11.2012 г.

Исследован результат воздействия магнитосферных бурь и суббурь на ионосферу – так называемый главный эффект. Он проявляется в том, что критическая частота и высота  $F$ -области во время возмущения изменяются следующим специфическим образом. Сначала происходит рост критической частоты перед активной фазой бури/суббури, затем ее спад во время активной фазы и снова рост после активной фазы. Высота  $F$ -области, наоборот, возрастает во время активной фазы и уменьшается после ее окончания. Предложен подход для краткосрочного прогнозирования (2–3 ч) развития бурь/суббурь как главных элементов возмущенной космической погоды.

DOI: 10.7868/S0016794013030036

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемые ниже геомагнитные возмущения имеют естественное (солнечное) происхождение. Они, как известно, наиболее существенно проявляются в высоких широтах, поэтому все дальнейшие рассуждения будут относиться преимущественно к полярным и субполярным регионам.

Физика околоземного пространства, особенно с точки зрения космической погоды, в настоящее время является областью значительного внимания ученых-исследователей и относится к числу важных, актуальных направлений в науке. Представления о космической погоде, т.е. о динамических, сильно меняющихся условиях в околоземной среде, включают в себя условия на Солнце, в межпланетном пространстве, системе магнитосфера–ионосфера–нижняя атмосфера Земли [Актаев, 2011]. Солнечные вспышки, пятна и т.п. вызывают в околоземном пространстве резкие изменения. Неблагоприятные условия космической погоды влияют на надежность работы как космических аппаратов, так и различных систем связи, навигации, энергетических линий и пр. Важнейшей задачей является предсказание и смягчение эффектов космической погоды.

Магнитосферные бури и суббури вызывают геомагнитные возмущения, следствием которых является широкий спектр неоднородностей и процессов в ионосфере Земли. Классическая картина ионосферного возмущения подтверждается многочисленными наблюдениями [Buonsanto, 1999; Gonzales et al., 1994; Prölss et al., 1991; Rodger et al., 1989; Yeh et al., 1994]. Однако физическая природа многих механизмов еще понятна недо-

статочно. Ионосферное возмущение продолжает оставаться наиболее сложным явлением в верхней атмосфере [Buonsanto, 1999; Gonzales et al., 1994; Laštovička, 2002]. Эффекты бурь/суббурь в ионосфере зависят от большого числа параметров, таких как местное время, широта, сезон, фаза солнечной активности, интенсивность бурь/суббурь и ряда других. В настоящее время для полного понимания эффектов бурь и суббурь в параметрах солнечно-магнитосферно-ионосферного взаимодействия применяется много усилий с использованием самых современных методов и средств. Это подтверждается содержанием таких проектов, как “Интербол” [Галеев и др., 1996], Space Weather [Baker, 1996; Buonsanto, 1999] и др.

Цель настоящего обзора состоит в том, чтобы осветить особенности воздействия геомагнитных бурь/суббурь на ионосферу. Однако здесь имеет место определенная специфика. Дело в том, что данный обзор является первой частью полного обзора, состоящего из двух частей. Вторая его часть будет в дальнейшем посвящена воздействию бурь/суббурь на распространение ДКМ радиоволн (КВ). Поэтому анализ влияния бурь/суббурь на ионосферу проводится не многопланово (в общем виде), а с точки зрения вариаций тех ионосферных параметров, которые наиболее существенны при распространении КВ, – критических частот, предельных частот, высот слоев и т.п. Здесь изложены лишь основные особенности высокоширотной ионосферы, поскольку не все стороны процессов, связанных с геофизическими возмущениями в высоких широтах, к настоящему времени поняты и объяснены. Значительное внимание уделено геофизическим вопросам, так как

именно они являются первопричиной всех аномальных явлений, приводящих, например, к ухудшению условий распространения ионосферных радиоволн.

## 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЗДЕЙСТВИЙ БУРЬ/СУББУРЬ НА ИОНОСФЕРУ

Активные области на Солнце, такие как вспышки и корональные дыры, являются, как известно, причиной большинства нестационарных процессов в межпланетной среде и магнитосфере Земли. Энергия солнечных возмущений выделяется в виде электромагнитного и корпускулярного излучений, ударных волн и выбросов вещества. Начало взаимодействия ударной волны с магнитосферой определяет момент зарождения ее возмущения, появляется внезапное начало магнитных бурь SSC в виде скачка  $H$ -компоненты геомагнитного поля за счет поля токов, текущих по поверхности магнитосферы. Для магнитных бурь характерна чрезвычайно высокая возмущенность магнитосферы [Buonsanto, 1999; Gonzalez et al., 1994; Khazanov, 2011]. Ионосферная буря – это глобальное возмущение ПЭС, электронной концентрации в максимуме  $F$ -области и высоты максимума во время геомагнитной бури в результате различных динамических и химических процессов: высыпания энергичных частиц, изменения электрических полей и токовых систем, движущихся атмосферных возмущений, термосферной циркуляции, изменения состава и т.д. Несмотря на то, что ионосферная буря является объектом исследования в течение десятилетий, до сих пор нет полного объяснения ее эффектов. Состояние ионосферы во время бури зависит от большого числа переменных, таких как местное время, геомагнитная широта, сезон, солнечная активность, время начала бури, время бури (время, прошедшее с начала бури), интенсивность бури и предбуриевой активности (большие бури редко изолированы). Кроме того физика, контролирующая глобальную ионосферу и атмосферу, осложняется тем, что геомагнитные возмущения недостаточно предсказуемы. В настоящее время статистическая картина бури уже в определенной степени известна. Длительные уменьшения  $NmF2$  и ПЭС во время главной фазы бури, особенно на средних широтах, можно считать главным признаком бури в  $F2$ -слое ионосферы [Van et al., 2011]. Перед этой отрицательной фазой обычно наблюдается положительная, она может появиться во время главной фазы на низких широтах и зимой – на средних. Эта классическая картина ионосферной бури основана на статистическом исследовании, сделанном в обзорах [Buonsanto, 1999; Данилов, 1985] и подтверждена многими наблюдениями, например, [Goncharenko et al., 2007; Благовещен-

ский, 2011]. К сожалению, она редко совпадает с реальными отдельными бурями. Фазу не всегда можно определить, и иногда одна из них полностью отсутствует. Наиболее полно ионосферные бури исследованы в работе [Pröhl et al., 1991], где была сделана попытка классифицировать эффекты ионосферных бурь на субавроральных широтах в соответствии с их предполагаемыми источниками по данным наземных ионозондов. Выделены следующие эффекты: 1) положительные эффекты бурь, вызванные движущимися атмосферными возмущениями; 2) положительные эффекты, вызванные изменением крупномасштабной циркуляции термосферного ветра; 3) положительные эффекты, вызванные смещением к экватору кольца авроральной ионизации; 4) отрицательные эффекты, вызванные перемешиванием состава нейтрального газа; 5) отрицательные эффекты, вызванные смещением к экватору области провала. В работе [Cander and Mihajlovic, 1998] проведен анализ ионосферных эффектов геомагнитных бурь в европейском регионе, где критическая частота слоя  $F2$  оказывается много выше или ниже медианного уровня в зависимости от сезона и времени начала возмущения, и создана модель прогнозирования поведения ионосферных параметров во время бури. Глобальный отклик на магнитную бурю по данным сети ионозондов исследовался в работе [Yeh et al., 1994]. Были отмечены низкоширотные сияния на большом пространстве в северном и южном полушариях. Длительное уменьшение ионизации на средних широтах есть наиболее выраженный эффект бури. Зона возмущений простиралась к экватору до геомагнитной широты менее  $10^\circ$  во время максимума главной фазы, вызывая временное подавление экваториальной аномалии. Наблюдались краткосрочные положительные фазы при появлении внезапного начала (SSC) и главной фазы бури после захода Солнца. В зависимости от локального времени SSC реакция ионосферы была различной в разных долготных секторах.

В отличие от бурь магнитосферные суббури [Lyons, 1996] представляют собой быстропротекающие процессы, при которых существенное, но далекое от максимума количество энергии, полученной из взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой, поступает в авроральную ионосферу и магнитосферу. Суббури имеют место, если скорость накапливаемой в магнитосфере энергии значительно перекрывает скорость потерь. Проявлениями магнитосферной суббури являются: магнитная суббурия, суббурия в полярных сияниях, ионосферная суббурия и т.д. Магнитная суббурия, или бухта в записи горизонтальной составляющей геомагнитного поля  $H$ , является следствием развития авроральных электроджетов, или струйных токов, текущих на высотах области  $E$  ионосферы в зоне полярных сияний. Отрицательные бухтообразные возмущения про-

исходят утром и ночью за счет западного электроджета, а положительные — вечером за счет восточного электроджета. Интенсивной и изолированной суббуре предшествует поворот  $B_z$  ММП к югу, после чего в магнитосфере усиливается крупномасштабное электрическое поле конвекции. Период нарастания возмущенности от момента появления признаков до начала взрывной фазы является предвзрывной фазой суббури. А началом суббури считается момент приближения неоднородного потока солнечного ветра к границам магнитосферы. Плазма через полярные каспы юга и севера проникает вплоть до уровня ионосферы, а через входной слой — внутрь магнитосферы. Происходит рост интенсивности вторгающихся частиц в дневные каспы на полуденных широтах  $\sim 78^\circ$ . Затем область возмущения распространяется к высоким и низким широтам, а также вдоль вечерней и утренней сторон аврорального овала в виде двух потоков до их встречи в полуденном секторе (через 20–30 мин после начала возмущения в полуденном секторе). Начальное вторжение плазмы малой энергии в области каспов и дальнейшее ее движение может не сопровождаться вариациями магнитного поля. Этим объясняется запаздывание развития авроральных электроджетов относительно начала возмущения в полуденном секторе. Изолированная магнитосферная суббуря имеет три фазы: роста, экспансии (взрыва) и восстановления. Эффект фазы роста состоит в переходе магнитосферы к неустойчивости. Во время фазы роста магнитное поле переходит от формы диполя к конфигурации хвоста. Это сильное изменение структуры магнитного поля вызывает образование тонкого токового слоя вблизи Земли, в плазменном слое. Когда формируется тонкий токовый слой, то развивается параллельное электрическое поле и ускоряет электроны вдоль силовых линий. Для идентификации начала фазы взрыва используются следующие факты: авроральные брейкапы, резкое уменьшение в отрицательных бухтах на высоких широтах, начало  $Pi2$  на низких широтах и бездисперсионная инжекция. Проявления авроральной интенсификации и начало отрицательной магнитной бухты сопутствуют друг другу и, как правило, имеют место в полуденной ионосфере авроральной зоны. Происходят изменения в ионосферном электрическом поле или соответственно в ионосферной конвекции. Проявление этого электрического поля еще изучено не до конца.

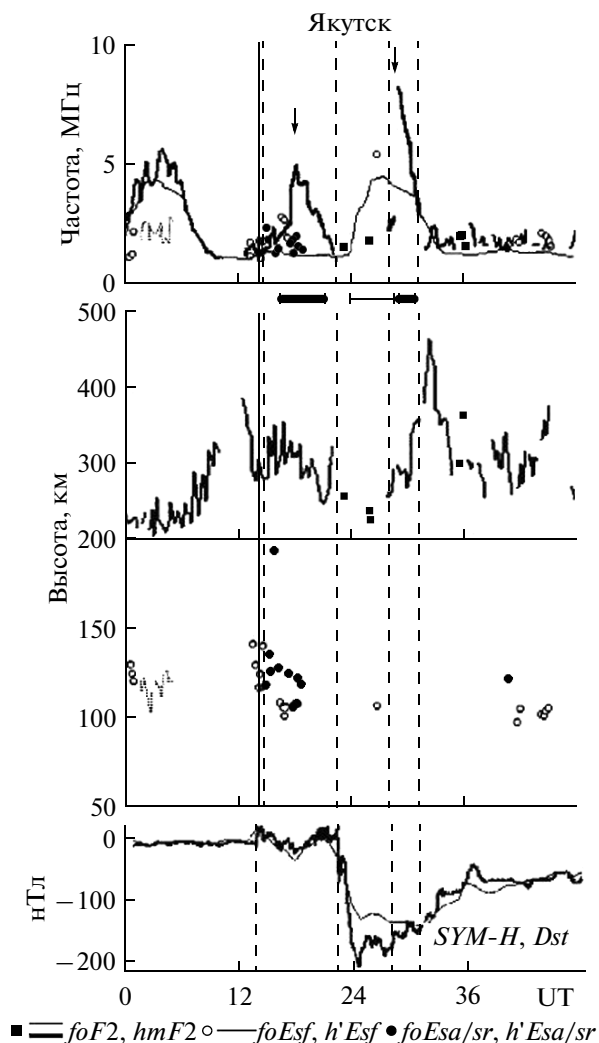
### 3. ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИОНОСФЕРЫ

Здесь будут рассмотрены, как указано выше, именно те параметры, которые играют наиболее существенную роль при ионосферном распро-

странении радиоволн: критические частоты, предельные частоты, высоты слоев и т.п.

**3.1. Геомагнитные бури.** Ионосферные эффекты, вызванные геомагнитными бурями, рассматривались в разные годы с различного рода позиций в большом количестве публикаций, например, [Афраймович и др., 2001; Данилов и Морозова, 1991; Buonsanto, 1991; Danilov and Laštovička, 2002; Fox et al., 1998; Goncharenko et al., 2007; Jin et al., 2008; Ma et al., 2002; Szuszczewicz et al., 1998; Yeh et al., 1994]. Выделить среди них наиболее удачные и полноценные не представляется возможным. К сожалению, до сих пор, несмотря на достигнутые успехи, не выработано четких и определенных закономерностей в поведении параметров ионосферы во время геомагнитных бурь. Существуют только выявленные тенденции, которые могут выполняться в определенных рамках. Это, конечно, связано с большим многообразием бурь по форме, интенсивности, продолжительности и т.д. Сами бури никогда не повторяются, хотя и могут быть похожи друг на друга. Тем не менее, накопленный экспериментальный материал в принципе позволяет описать на качественном уровне поведение ионосферных параметров во время магнитной бури. Рассмотрим в качестве типичного примера характерных вариаций ионосферных параметров некоторые результаты одной из последних работ [Золотухина и др., 2011].

На рисунке 1 представлены вариации критических частот ( $foF2$ ), высот максимума слоя  $F2$  ( $hmF2$ ), предельных частот ( $foEs$ ) и высот максимума спорадических слоев ( $hmEs$ ) по данным ионозонда Якутск (исправленная геомагнитная широта  $\varphi' = 52.3^\circ$ ) для “классической” магнитной бури 14–15 декабря 2006 г. Тонкой линией на рисунке показаны изменения  $foF2$  как результат усреднения по магнитоспокойным дням 5 и 17 декабря. Интервал, выделенный первыми двумя вертикальными штриховыми линиями, является положительным ионосферным возмущением с активацией авроральных высыпаний, второй интервал между второй и третьей штриховой линиями является отрицательным возмущением. Второе положительное возмущение лежит в интервале между третьей и четвертой штриховыми линиями. Важно заметить, что сразу же после второго положительного возмущения (четвертая штриховая линия) все ионосферные параметры, определенные по данным ионозонда, близки к наблюдаемым в магнито спокойное время. Как следует из рис. 1, для первого положительного ионосферного возмущения от момента SSC до момента резкого уменьшения  $Dst$ -индекса характерен рост  $foF2$  относительно среднего значения (тонкая линия) и возникновение спорадических  $E$ -слоев. Последние вызваны высыпанием жестких ( $Esa$ ) и мягких ( $Esr$ ) заряженных частиц. Рост  $foF2$  и переход от плоских ( $Esf$ ) к  $Esa$  и  $Esr$ -слоям начина-



**Рис. 1.** Вариации ионосферных параметров в Якутске во время магнитной бури 14–15 декабря 2006 г. (три верхних панели). Сплошная вертикальная линия – момент SSC. Штриховые вертикальные линии – границы трех интервалов ионосферных возмущений: положительного, отрицательного и снова положительного (обозначены тремя горизонтальными отрезками линий разной толщины). Нижняя панель – вариации *SYM-H* и *Dst*-индексов (толстая и тонкая линии соответственно).

ется в 15:00 UT 14 декабря. Повышенные значения  $foF2$  наблюдаются в течение ~8 ч до момента начала резкого уменьшения *Dst*-индекса. Максимум  $foF2$  обозначен стрелкой. Второй этап возмущения с максимумом развития бури характеризуется значительным понижением электронной концентрации *F2*-слоя. Во время второго положительного возмущения на спаде возмущения имеет место резкий рост  $foF2$  (обозначен стрелкой на рисунке). Что касается высоты максимума ионосферного *F2*-слоя, то этот параметр согласно рис. 1 резко растет перед первым положительным возмущением и сразу же после второго. Во время

первого положительного возмущения высота слоя имеет повышенные значения.

Таким образом, на основе данного рассмотрения можно сделать следующие главные выводы. Значения критической частоты  $foF2$  заметно возрастают за ~8 ч до момента резкого спада *Dst*-индекса, т.е. перед началом активной фазы бури и на фазе ее восстановления. Во время активной фазы бури значения  $foF2$  резко уменьшаются. Высоты слоя *F2* приобретают повышенные значения перед началом активной фазы бури, во время этой фазы значения высот несколько уменьшаются, и далее к концу активной фазы сначала имеет место рост высот, а затем на фазе восстановления – спад. Описанные закономерности характерны не только для рассмотренной бури 14–15 декабря 2006 г., но и для других аналогичных магнитных бурь, т.е. они являются, как указано в работе [Благовещенский, 2011], в определенной степени обобщенными. Остановимся еще на двух иллюстрациях в поддержку обобщенных закономерностей.

На рисунке 2 представлены изменения параметров  $foF2$  и  $foEs$  по данным ионозондов Черчилль и Саус Юист с геомагнитными координатами соответственно  $69^\circ \text{ N}$ ;  $330^\circ \text{ E}$  и  $56^\circ \text{ N}$ ;  $75^\circ \text{ E}$  во время геомагнитной бури 19–21 января 1989 г. [Milan et al., 1997]. По данным ст. Черчилль на верхней панели можно видеть рост значений  $foF2$  с 02:00 до 12:00 UT 20 января до начала активной фазы бури (~14:00 UT) по сравнению со средним значением  $foF2$  за период эксперимента, см. рис. 2. Здесь также наблюдается рост значений  $foEs$  с 04:00 до 07:00 UT, т.е. перед началом активной фазы бури. Далее с 14:00 UT 19 января и до примерно конца дня 20 января наступает отрицательное ионосферное возмущение. Однако на спаде этого возмущения в интервале 17:00–19:00 UT 21 января возникает положительный пик  $foF2$ . По данным ст. Саус Юист на средней панели можно видеть рост значений  $foF2$  с 08:00 до 14:00 UT 20 января, т.е. за 6 ч до момента начала активной фазы бури. По этой станции рост значений  $foEs$  имеет место с 08:00 до 11:00 UT 20 января. Как и для верхней панели, отрицательное возмущение здесь продолжается с 14:00 UT 20 января до конца дня 21 января. Положительный пик  $foF2$  21 января возникает на спаде возмущения в интервале с 12:00 до 16:00 UT. Таким образом, общий характер представленных на рис. 2 вариаций параметров ионосферы по двум ионозондам во время магнитной бури 19–21 января 1989 г. качественно одинаков и соответствует обобщенным закономерностям, о которых упомянуто выше, в конце описания рис. 1.

Рисунок 3 демонстрирует некоторые результаты комплексных измерений на спутниках и на поверхности Земли по данным работы [Aarons et al., 1991]. Одна из целей этой публикации – изу-

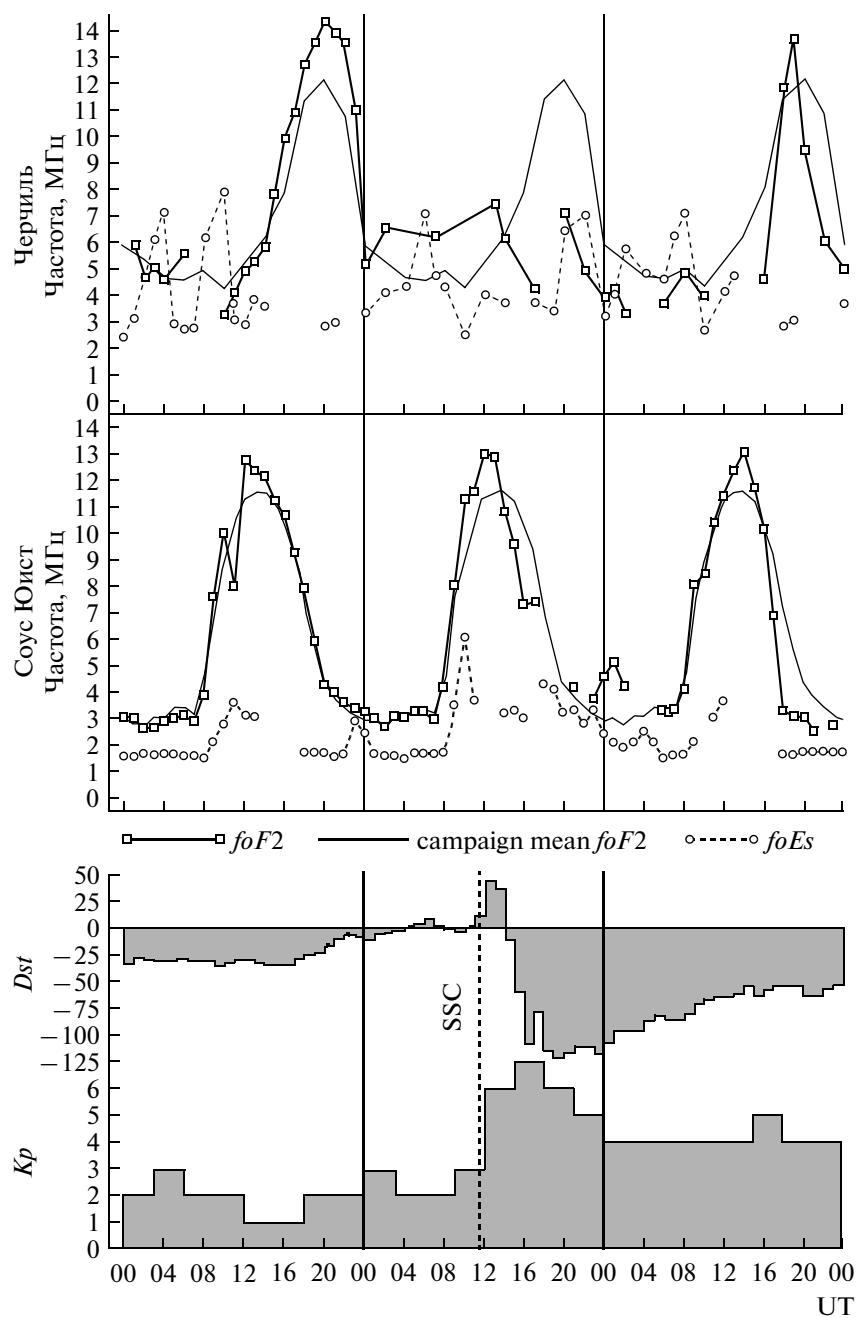


Рис. 2. Вариации ионосферных параметров (указаны под средней панелью) по данным ионозондов Черчилль ( $59^{\circ}$  N;  $266^{\circ}$  E) и Саус Юист ( $57^{\circ}$  N;  $353^{\circ}$  E) во время магнитной бури 19–21 января 1989 г. Внизу –  $Dst$  и  $Kp$ -индексы.

чить характер неоднородностей в  $F$ -области ионосферы размерами от нескольких сотен метров до 10 км во время геомагнитных бурь. Интенсивность неоднородностей определялась методом просвечивания ионосферы сигналами со спутника и приемом их на Земле (радиомерцания). Сам спутник позволял, в частности, измерять электронную температуру ( $T_e$ ) и электронную плотность ( $N_e$ ). Для нас здесь главный интерес представляют данные вариаций  $N_e$  во время магнитной бури 19–20 сентября 1984 г. Из рисунка видно, что

на двух широтах  $60$  и  $53^{\circ}$  CGL (CGL – исправленная геомагнитная широта) значения  $N_e$  положительны относительно величины  $N_e = 10^5 \text{ см}^{-3}$ , начиная за  $\sim 6$ – $7$  ч до  $24:00$  UT 19 сентября. Момент  $24:00$  UT, согласно данным магнитометра ст. Оттава на рисунке, является началом активной фазы бури. После  $24:00$  UT наблюдается интервал отрицательных значений  $N_e$ , который продолжается до  $13:00$  UT 20 сентября. После  $13:00$  UT значения  $N_e$  снова положительны в течение несколь-

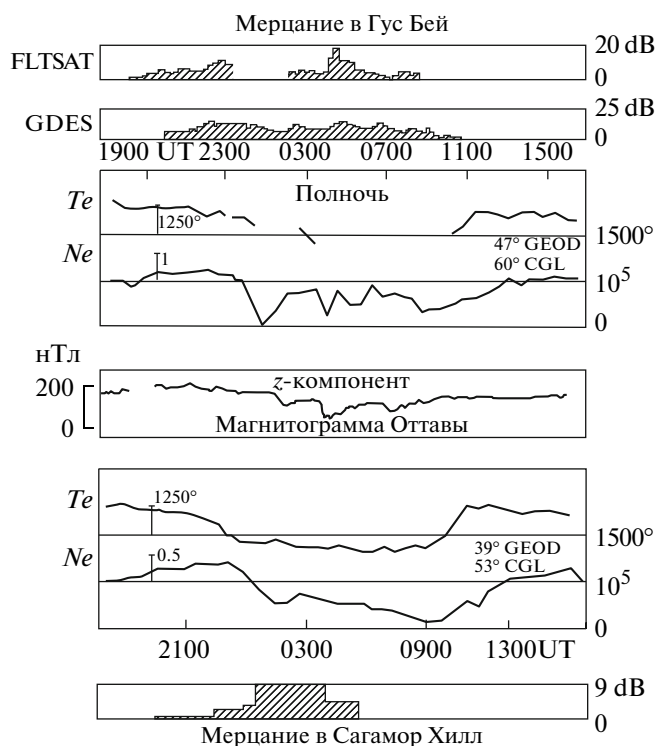


Рис. 3. Данные за период магнитной бури 19–20 сентября 1984 г. Панели сверху вниз: 1 и 2 – спутниковые радиомерцания в Гус Бэй; 3 – электронная температура  $T_e$  и электронная концентрация  $N_e$  на широте 60° CGL; 4 – магнитограмма Оттавы; 5 –  $T_e$  и  $N_e$  на широте 53° CGL; 6 – радиомерцания в Сагамор Хилл.

ких часов. Поскольку вариации электронной плотности  $N_e$  на высоте спутника косвенно связаны с вариациями критической частоты  $foF2$  во время бури, то можно достаточно уверенно предположить следующее. Изменения электронной плотности (концентрации)  $N_e$  на высоте спутника ~800 км практически в точности повторяют изменения критической частоты  $F$ -области ионосферы во время магнитной бури, т.е. подчиняются обобщенным закономерностям, упомянутым выше.

3.2. *Магнитосферные суббури.* Эффекты магнитосферных суббурь в ионосфере изучаются уже несколько десятилетий, но к настоящему моменту они исследованы далеко не полностью. Скорее всего, это вызвано, во-первых, стремлением геофизиков лучше понять процессы в магнитосфере и на дальних рубежах околоземного пространства во время суббурь, чем в ионосфере. Во-вторых, преимущественное внимание уделяется эффектам магнитных бурь в ионосфере, поэтому объем проведенных исследований для суббурь меньше, чем для магнитных бурь. Следовательно, ощущается определенная нехватка подобных исследований. Тем не менее, накоплен экспериментальный и теоретический материал по суббурям и их влия-

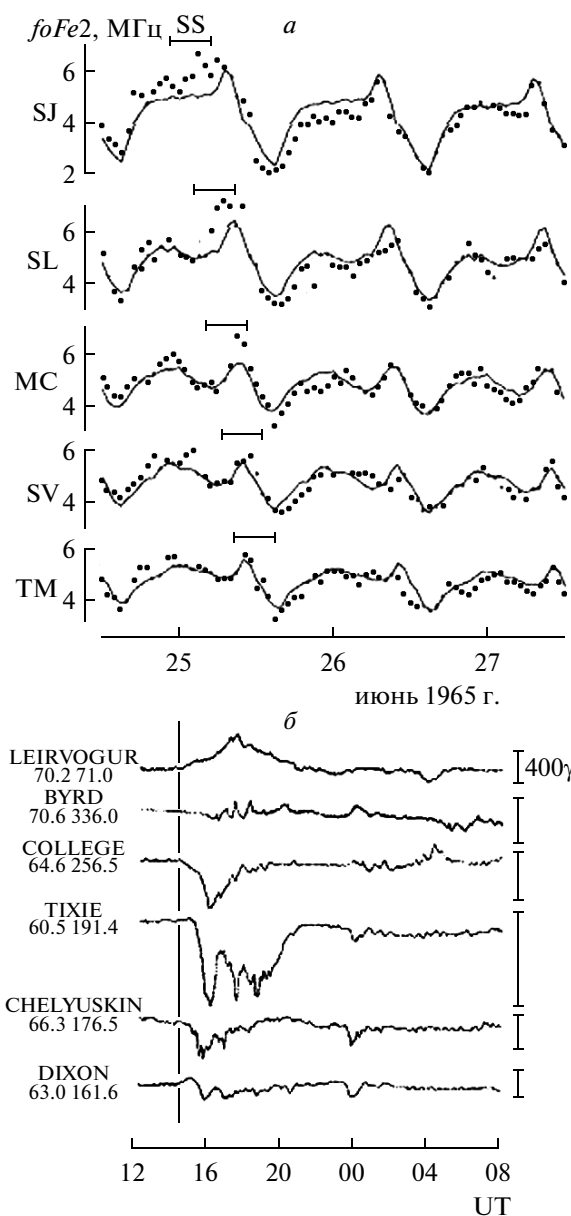


Рис. 4. *a* – Графики критической частоты  $foF2$  как функции местного времени в С.-Джонсе, Слау, Москве, Свердловске и Томске. Сплошные кривые – месячные медианы. Горизонтальные отрезки (SS) указывают протяженность суббуревой активности 05 ч.

*б* – Магнитограммы, показывающие суббурю 25 июня 1965 г. с 15:00 (момент  $T_0$ ) до 20:00 UT (момент  $T_e$ ).

нию на ионосферу. Ряд результатов представлен, например, в работах [Беспрозванная и др., 1988; Blagoveshchensky et al., 2006; Borovsky et al., 1993; Fairfield, 1992; Gauld et al., 2002; Lewis et al., 1998; Lyons, 1996; Park, 1974; Pirog et al., 2000; Rostoker et al., 1980].

Рисунок 4 из работы [Park, 1974] демонстрирует эффекты суббури 25 июня 1965 г. в ионосфере,

верхняя панель (а), и параметры самой суббури, нижняя панель (б). На панели (а) показаны вариации  $foF2$  для среднеширотных ионозондов с различными долготами: Сент-Джонс, Слау, Москва, Свердловск и Томск. Сплошные кривые – месячные медианы. Горизонтальные отрезки (SS-substorm) показывают активную фазу суббури длительностью 5 ч вблизи каждого ионозонда. Эту активную фазу (15:00–20:00 UT) с амплитудой ~400 нТл можно видеть из панели (б), где представлены магнитограммы 6-ти станций, расположенных в авроральной зоне. Из рисунка 4а следует, что для большинства ионозондов перед активной фазой суббури значения  $\Delta foF2$  (отклонения  $foF2$  от медианы) положительны в течение нескольких часов, во время активной фазы они отрицательны, и в конце активной фазы и после нее они снова положительны в течение нескольких часов. Здесь важно подчеркнуть, что подобное поведение было отмечено выше для магнитных бурь.

Рисунок 5, как обобщение и видоизменение данных на рис. 4, иллюстрирует усредненную картину вариаций  $\Delta foF2/foF2_{\text{мед}}$ , полученную по 39-ти ионозондам из интервала от 20 до 60° геомагнитной широты северного полушария. Сначала были подсчитаны отклонения ежечасных значений  $foF2$  от месячной медианы (в процентах) для каждого ионозонда во время суббури 25 июня в интервале 15:00–20:00 UT. Полученные проценты были затем усреднены по всем ионозондам для каждого местного времени. Число ионозондов, использованных для каждого местного времени, указано сверху рисунка. Усреднение по менее, чем 4-м ионозондам, показано штриховой линией. Обозначим момент начала активной фазы суббури 15:00 UT как  $T_0$  (onset), а момент окончания активной фазы 20:00 UT как  $T_e$  (end). Тогда из рис. 5 следует, что начиная за ~8 ч до момента  $T_0$  и далее вплоть до него наблюдается первый максимум в значениях  $\Delta foF2/foF2_{\text{мед}}$ . Затем в период максимума суббуревой активности 15:00–18:00 UT имеет место существенный минимум в значениях  $\Delta foF2/foF2_{\text{мед}}$ . Второй максимум этих значений с 19:00 до 21:00 UT имеет место перед моментом  $T_e$  и после него. Следует заметить, что гистограмма на рис. 5 построена только по единственной суббуре 25 июня 1965 г. Таким образом, главный итог анализа рис. 5 состоит в том, что характер изменений  $\Delta foF2/foF2_{\text{мед}}$  во время суббури соответствует характеру изменений  $foF2$  во время магнитных бурь на рисунках 1 и 2.

Что касается высоты максимума ионосферного слоя  $F2$  ( $hmF2$ ), то в работе [Park, 1974] был рассмотрен единственный пример вариаций этого параметра во время суббури 25 июня 1965 г. по данным ионозонда Уоллопс Айленд (49.3° N; 352.1° E геомагнитных координат). Вариации  $hmF2$  относительно месячной медианы, т.е.  $\Delta hmF2$ , имеют

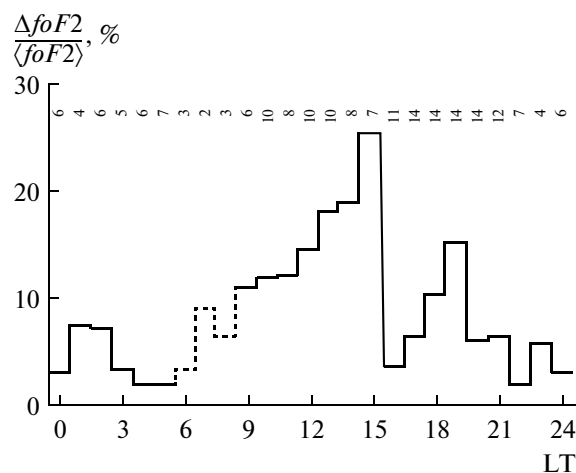


Рис. 5. Гистограмма, показывающая отклонение  $foF2$  от месячной медианы в процентах как функцию местного времени во время суббуревоего периода 15:00–20:00 UT 25 июня 1965 г. Данные по 39-ти станциям ВЗИ использованы в промежутке от 20 до 60° N геомагнитной широты. Число станций, использованных для получения среднего процента отклонений для каждого часа местного времени, показано сверху графика. Штриховой линией показаны усреднения для числа ионозондов менее четырех.

следующий характер. Перед моментом  $T_0$  наблюдается небольшой отрицательный минимум  $\Delta hmF2$ , затем к моменту  $T_0$  происходит нарастание  $\Delta hmF2$  от отрицательных к существенно положительным значениям, далее в промежутке  $T_0$ – $T_e$  (максимум активной фазы суббури) наблюдается минимум  $\Delta hmF2$ , но положительный. Затем после минимума следует снова максимум  $\Delta hmF2$  перед моментом  $T_e$  и после него спад до отрицательного минимума с последующим ростом снова к положительным значениям. График рассмотренных вариаций  $\Delta hmF2$  очень похож на график значений  $\delta hmF2$  (здесь  $\Delta$  и  $\delta$  равнозначны) на рис. 6 справа сверху для ионозонда Юлиусру. Таким образом, анализ показывает, что характер изменений  $\Delta hmF2$  во время суббури имеет определенное сходство с характером этих вариаций для магнитной бури на рис. 1.

Рисунок 6 из работы [Blagoveshchensky et al., 2006] демонстрирует данные измерений  $\delta foF2$  и  $\delta hmF2$  (отклонения от медианы) на цепочке среднеширотных ионозондов Юлиусру, Рим и Афины с геомагнитными широтами 54.4°, 36.4° и 31.3° соответственно во время магнитосферной суббури 27 октября 2003 г. Эта суббуря является изолированной и умеренной по интенсивности,  $AE_{\text{макс}} = 500$  нТл. Она имеет продолжительность 3 ч от  $T_0 = 15:30$  до  $T_e = 18:30$  UT. Общим для всех трех ионозондов является подъем значений  $foF2$  за несколько часов перед моментом  $T_0$  ( $\delta foF2$  положительны). Затем в промежутке  $T_0$ – $T_e$  имеет место минимум значений  $\delta foF2$  и далее снова максимум

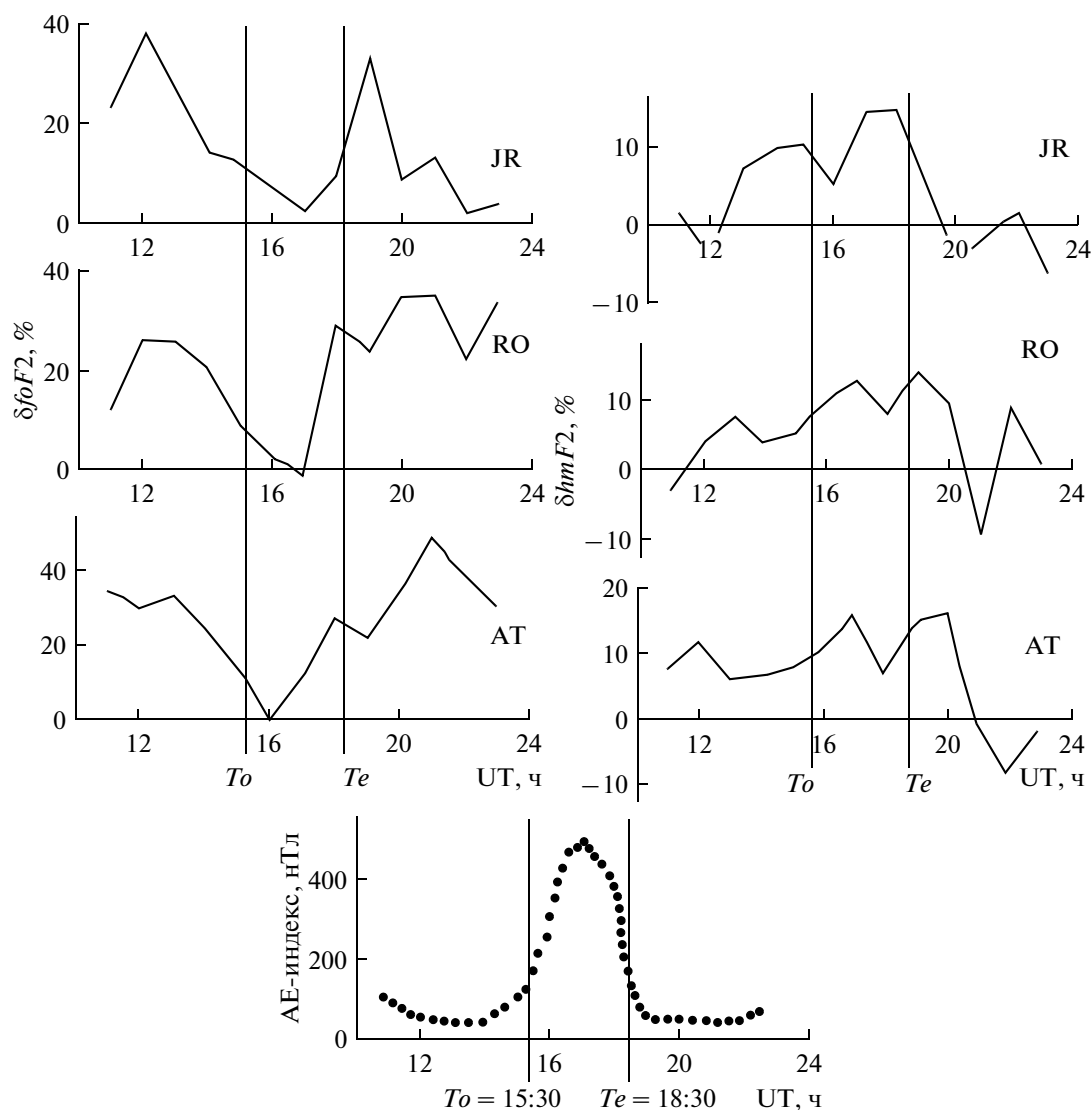


Рис. 6. Вариации значений  $\delta foF2$  и  $\delta hmF2$  на цепочке среднеширотных станций Юлиусру, Рим и Афины за период суббури 27 октября 2003 г.

$\delta foF2$  в районе  $T_0$  и после него. Очевидно, что характер вариаций  $\delta foF2$  на рис. 6 качественно совпадает с характером вариаций  $\Delta foF2/foF2_{\text{мед}}$  на рис. 5. Однако вариации значений  $\delta hmF2$  отличаются от вариаций  $\delta foF2$  на рис. 6. А именно, рост значений  $\delta hmF2$  до момента в районе  $T_0$  происходит постепенно, затем в промежутке  $T_0 - T_e$  наблюдается небольшой минимум и к моменту  $T_e$  образуется вновь максимум, который с течением времени уменьшается до отрицательных значений  $\delta hmF2$ . Из рисунка 6 видно, что между вариациями  $\delta foF2$  и  $\delta hmF2$  в определенной степени существует антикорреляция. На это же обстоятельство указано в работе [Park, 1974]: существует тенденция для  $hmF2$  уменьшаться, когда  $NmF2$  увеличивается и наоборот.

На рисунках 5 и 6, как было указано выше, представлены значения  $\Delta foF2$  для двух разных конкретных суббурь. Видно, что  $\Delta foF2$  положительны в течение всего интервала существования каждой суббури. Однако более обширные эксперименты показывают, что для различных ионозондов и различных суббурь значения  $\Delta foF2$  могут быть отрицательными, хотя общий характер их изменений в течение суббури остается прежний — рост  $\Delta foF2$  перед моментом  $T_0$ , спад этих значений внутри интервала  $T_0 - T_e$  и снова рост  $\Delta foF2$  возле момента  $T_e$  с дальнейшим спадом. Отрицательные значения  $\Delta foF2$ , скорее всего, можно объяснить заметной изменчивостью слоя  $F2$  ионосферы ото дня ко дню.

На рисунке 7 представлено схематическое изображение усредненных вариаций ионосфер-



ных параметров  $\Delta foF2$ ,  $\Delta foEs$ ,  $\Delta hmF$  и  $\Delta hmEs$  во время обобщенной суббури [Благовещенский, 2011]. Здесь  $\Delta$  есть отклонение параметра за суббуревую период от медианы. Значения  $foF2$  и  $foEs$  – критическая и предельная частоты слоя  $F2$  и спорадического слоя  $Es$  ионосферы,  $hmF$  и  $hmEs$  – высоты этих слоев. Усреднение производилось методом наложения эпох по 72-м суббурям продолжительностью  $To - Te = 2-3$  ч, где  $To$  и  $Te$  – начало и конец активной фазы суббури. Исходными являются данные ионозондов, расположенных в интервале геомагнитных широт  $40-70^\circ$  Европы, центральной Сибири и Северной Америки. Кривые на рис. 7 демонстрируют только качественный характер вариаций, поскольку ионозонды различны по техническим характеристикам и находятся на различных широтах и долготах. Суббури для усреднения выбирались преимущественно в ночном секторе суток зимы и равноденствия 1993–1999 гг. Что касается спорадических слоев  $Es$ , то для высокоширотных ионозондов вероятность их появления высока, тогда как для более низкоширотных ионозондов возможно их отсутствие. Второе отличие высокоширотных ионозондов от среднеширотных состоит в следующем. Если высокоширотный ионозонд в силу своего положения попадает в зону авроральной активности во время активной фазы суббури, то авроральные потоки могут создать дополнительную ионизацию, приводящую к росту значений  $\Delta foF2$  в промежутке  $To - Te$ . И вместо минимума в значениях  $\Delta foF2$  может появиться максимум. Поэтому картина вариаций  $\Delta foF2$  на рис. 7 искажится. Но это случается иногда. В целом на рис. 7 представлены общие специфические вариации указанных выше параметров ионосферы за период суббури, перед ней и после. Условно назовем главным эффектом (ГЭ) в ионосфере во время суббури следующую совокупность характерных вариаций параметров [Благовещенский и др., 1996].

1. На предварительной фазе суббури и до нее имеют место рост значений  $foF2$  и уменьшение значений высот  $hmF2$  (относительно спокойной медианы) перед моментом начала взрывной фазы  $To$  за  $\sim 4$  часа.

2. Во время взрывной фазы наблюдается снижение величин  $foF2$  и рост  $hmF2$  даже более медианы сразу после  $To$ .

3. Повторение явлений первого пункта происходит на фазе восстановления, но сравнительно слабо.

Из общего количества рассмотренных данных по всем ионозондам ГЭ имеет место в 90% всех случаев. В остальных 10% он не проявляется. Чтобы ГЭ состоялся, параметры суббури должны удовлетворять, как правило, следующим условиям.

1. Амплитуда в  $AE$ -индексах в максимуме не менее 250–300 нТл.

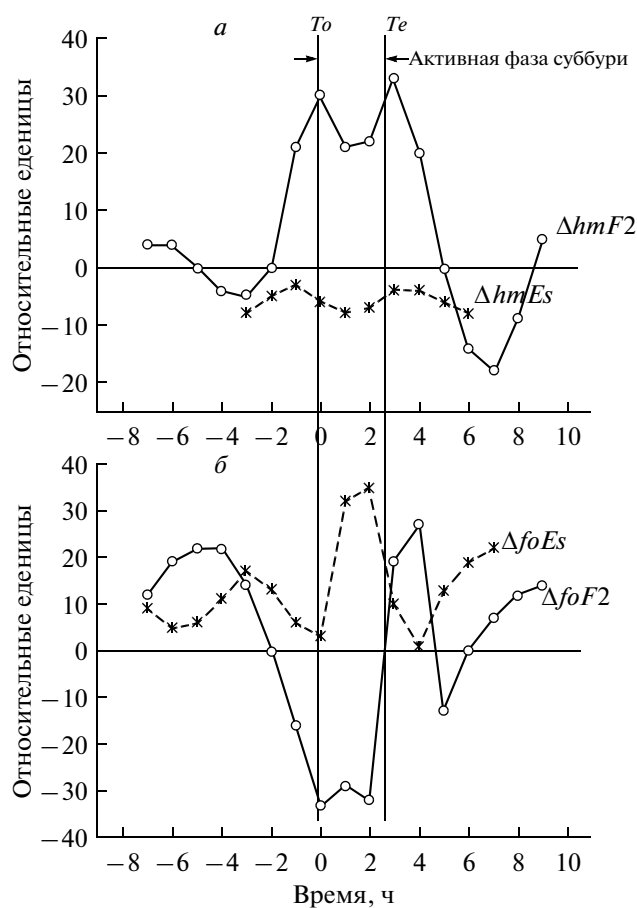


Рис. 7. Усредненные по 72-м суббурям и различным ионозондам относительные вариации ионосферных параметров за период обобщенной суббури:  $\Delta hmF2$  и  $\Delta hmEs$  (панель а) и  $\Delta foF2$  и  $\Delta foEs$  (панель б).

2. Одиночная суббури на спокойном фоне продолжительностью 5–7 ч, протяженность суббури 2–4 ч.

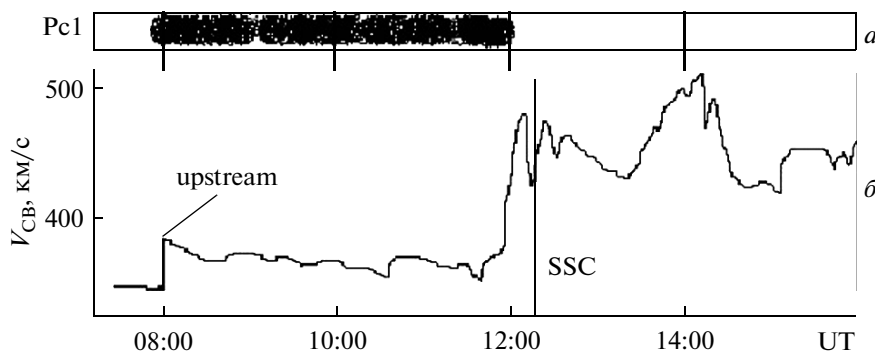
3. Резкое начало взрывной фазы.

4. Вечерне-ночной сектор местного времени в пределах 20–05 ч.

5.  $Bz$ -компонента межпланетного магнитного поля преимущественно должна быть меньше нуля.

Смысл последнего условия заключается в том, что поведение  $Bz$  для всех 90% случаев с наличием ГЭ характеризуется переходом от положительного значения к отрицательному, как правило, за 1–2 ч перед моментом  $To$  и возвращением к положительному значению после окончания суббури. Для 10% случаев, когда ГЭ не наблюдается, хотя все перечисленные выше условия его существования выполняются, но значения  $Bz$  положительны в течение всего времени развития суббури.

На основе анализа существенным является то, что фактически проявления ГЭ имеют место не только во время суббурь, но, как следует из рисунков 1 и 2, ГЭ возможен и для магнитных бурь.



**Рис. 8.** Эффекты магнитной бури с SSC 22 сентября 1999 г.: *a* – интервал появления волн  $Pc1$  (черный цвет) по данным обс. Соданкюля; *б* – вариации скорости солнечного ветра  $V_{СВ}$  по данным спутника WIND, где *upstream* – область форшока.

**3.3. Процессы в ионосфере перед активной фазой бури/суббури.** Основное внимание будет уделено малоизученным процессам в ионосфере Земли, предшествующим началу развития активной фазы бури/суббури (момент  $T_0$ ). Эти процессы вызывают описанные в предыдущих разделах положительные возмущения критической частоты  $foF2$ , т.е. подъемы значений  $\Delta foF2$ , которые согласно рисункам 1, 2 и 7 имеют место за 6–8 ч до момента  $T_0$ .

Магнитосферное возмущение, как указывалось выше, образуется в результате взаимодействия магнитосферы с неоднородным потоком плазмы солнечного ветра. Когда фронт межпланетной ударной волны от Солнца входит в контакт с магнитосферой Земли, возникает внезапный магнитный импульс SI, или SSC – внезапное начало магнитной бури. Происходит сжатие магнитосферы. Результатом сжатия может служить, в частности, появление электромагнитных волн типа  $Pc1$ , существующих в диапазоне 0.2–5 Гц. Частоты  $Pc1$  близки к гирочастотам протонов. Считается, что генерация этих волн связана с развитием неустойчивостей протонных образований, а местоположение областей генерации  $Pc1$  связано с положением плазмопаузы [Пудовкин и др., 1976]. Нестационарность  $Pc1$  обусловлена радиальным перемещением разных участков плазмопаузы. Согласно работам [Гульельми и др., 2001; Kangas et al., 2001], возбуждение  $Pc1$  может происходить не только после SI, но и до него. Дело в том, что перед ударными волнами, распространяющимися в бесстолкновительной плазме, существуют так называемые предударные области. Примером подобной области может служить плазменно-волновая турбулентность, образующаяся перед фронтом околоземной ударной волны, или турбулентность перед межпланетной ударной волной. Последняя турбулентность будет воздействовать на магнитосферу **за некоторое время** до момента образования SI, вызывая появление волн  $Pc1$ . В работе [Kangas et al., 2001] указано, что эти  $Pc1$  пульсации, на-

блюдаемые перед SSC, являются проявлениями воздействия межпланетной предударной областью (*upstream*) на геомагнитное поле. Рисунок 8а из работы [Kangas et al., 2001] иллюстрирует появление  $Pc1$  пульсаций, инициируемых этой областью, за 4 ч до SSC, показанного на рис. 8б.

Помимо  $Pc1$  существует также другое явление, создаваемое межпланетными предударными областями. Известно, что в них присутствуют пучки отраженных от фронта частиц, летящих от Солнца со скоростями более высокими, чем скорость ударной волны. В работах [Гульельми и др., 2001; Золотухина, 1983] показано, что области солнечного ветра перед ударной волной (от Солнца), связанные магнитным полем с последней, возмущены присутствием ударного фронта (возле Земли). Для околоземной волны этими возмущениями являются пучки отраженных ионов и электронов, так называемые диффузные и промежуточные частицы, а также электромагнитные волны, часть из которых регистрируется на поверхности Земли. Подобные корпускулярные и волновые явления наблюдаются на ИСЗ также и перед межпланетными ударными волнами в течение **нескольких часов**, предшествующих прохождению фронта межпланетной ударной волны. Средняя энергия отраженных и диффузных частиц составляет для протонов 5 кэВ и электронов 1–2 кэВ, хотя эти энергии могут достигать соответственно 30 кэВ и 100 кэВ. С приближением к моменту SI многократное отражение частиц солнечного ветра в промежутке между фронтами межпланетной и околоземной ударных волн усиливается и происходит дополнительное ускорение отраженных частиц. В результате до момента SI происходит рост потока высокоэнергичных частиц непосредственно перед фронтом магнитосферы. Можно уверенно полагать, что за **несколько часов** до SSC (5–6 ч) вблизи окрестности Земли в утреннем и полуденном секторах магнитосферы ( $LT \leq 14$  ч) может происходить рост интенсивности флуктуирующих потоков ионов и электронов с энергиями до

десятков кэВ. Далее ускоренные частицы солнечного ветра высыпаются в ионосферу Земли, вызывая следующие геофизические эффекты: дополнительную ионизацию, нагрев и повышенное поглощение за несколько часов до момента SI. Наиболее вероятной областью их появления следует считать ионосферную проекцию дневного каспа. Другой областью является авроральный овал, где возможно высыпание из входного слоя магнитосферы. Указанные эффекты ионизации, нагрева и поглощения могут служить ионосферными предвестниками SI.

В работах [Данилов и др., 1985; Данилов и Морозова, 1991] предлагается следующая нетрадиционная схема образования положительной фазы ионосферной бури ( $\Delta foF2 \geq 0$ ) до начала магнитного возмущения. Днем в области дневного каспа происходит высыпание мягких частиц. Их энергия поглощается на высотах 200–300 км. Поглощение, а также вызванные этими частицами токи, должны произвести разогрев области  $F$  ионосферы в каспе и направленную во все стороны меридиональную нейтральную циркуляцию. В соответствии с конвекцией возмущенный ветер от каспа через полярную шапку к экватору со скоростью  $V = 50$ – $100$  м/с переносит газ, обогащенный атомным кислородом. Это приводит к усилению ионизации  $F$ -слоя, что в условиях до начала магнитной бури, рассмотренных выше, однозначно вызовет положительное ионосферное возмущение ( $\Delta foF2 \geq 0$ ) вечером и в ночные часы. Указанное обстоятельство неоднократно экспериментально подтверждено: а) имеет место повышение электронной концентрации в области каспа во время высыпания частиц и появление движущегося через полярную шапку к экватору ветра, который отсутствует в спокойных условиях, при этом экваториальное каспа наблюдается увеличение электронной концентрации на 20–40%; б) положительные отклонения  $\Delta foF2$  весьма часто наблюдаются за **несколько часов** до начала магнитного возмущения [Данилов и др., 1985; Данилов и Морозова, 1991; Ondoh and Obu, 1980]. Эти положительные значения  $\Delta foF2$  связаны с высыпаниями частиц в касп до высыпания авроральных частиц и развития кольцевого тока, регистрируемого на поверхности Земли как начало магнитного возмущения [Gonzales et al., 1994]. Указанные высыпания в каспе ассоциируются с такими областями магнитосферы, как граничные слои. В то же время токи, вызывающие в  $E$ -области ионосферы джоулев нагрев, обусловлены иными областями (хвост магнитосферы—плазменный слой—продольные токи—джоулев нагрев—изменение состава и циркуляции). Следовательно, указанная гипотеза объясняет, почему возможно появление положительной фазы ионосферной бури до начала магнитного возмущения. В случае появления положительного возмущения и далее за ним последо-

вательно отрицательного, ионосферная буря как явление, следовательно, оказывается связанной с двумя совершенно разными областями магнитосферы и с совершенно разными каналами проникновения энергии солнечного ветра в полярную ионосферу. Например, канал, обусловленный высыпанием частиц в касп днем и нагрев ионосферы в каспе на уровне  $F$ -области, как указывалось, приводит ночью к положительным ионосферным возмущениям ( $\Delta foF2 \geq 0$ ). Другой канал, связанный с джоулевым нагревом в  $E$ -слое (хвост магнитосферы, плазменный слой и т.д.) приводит к отрицательным ионосферным возмущениям ( $\Delta foF2 \leq 0$ ) также ночью. Если оба явления (нагрев в каспе и джоулев нагрев) происходят одновременно, суммарный эффект в электронной концентрации будет зависеть от результата сложения противоположных (по изменению состава) эффектов.

Рассмотрим теперь наиболее полно все существующие механизмы.

*Дневные условия.* Здесь имеется несколько возможных механизмов роста  $foF2$  ( $\Delta foF2 > 0$ ) в течение нескольких часов перед началом магнитного возмущения.

а) Рост значений  $\Delta foF2$  в высоких и средних широтах до начала бури обусловлен подъемом слоя  $F2$  или увеличением  $hmF2$  под действием вертикального дрейфа. Последний образуется, во-первых, за счет возникновения электрических полей (хотя положительное  $Bz$  перед бурей этому не способствует) и, во-вторых, за счет меридиональных ветров, направленных к югу [Sun et al., 2012; Buonsanto, 1999; Данилов и Морозова, 1991].

б) Еще одним источником повышения ионизации могут быть высыпания частиц из плазмосферы, во-первых, за счет ее поджатия в результате поджатия магнитосферы и, во-вторых, за счет потоков плазмы вниз к ионосфере, вызванных электрическими полями, направленными к западу [Park, 1974]. Эти частицы и потоки плазмы ионизируют слой  $F2$  ионосферы, и механизм этой ионизации близок, по-видимому, к механизму образования SAR дуг. Наиболее вероятная область высыпания частиц – от средних широт до  $\Phi_L \sim 70^\circ$  с максимумом на широте  $\Phi_L \sim 50^\circ$  [Благовещенский, 2011; C.-S. Huang and Foster, 2002].

в) В зоне полярных сияний дополнительным источником усиления ионизации до SSC, как указывалось выше, могут быть высыпающиеся частицы из входного слоя магнитосферы.

*Ночные условия.* Здесь также существует несколько возможных механизмов роста  $foF2$  ( $\Delta foF2 > 0$ ).

а) Снос термосферного газа из дневного каспа через полюс на ночную сторону. Данный механизм, как указывалось выше, приводит к росту ионизации и положительным значениям  $\Delta foF2$ .

б) Воздействие электрических полей [С.-S. Huang and Foster, 2002]. В частности, электрические поля из дневного каспа могут проникать на ночную сторону.

в) Ночное высыпание холодной плазмы из плазмосферы, что может в принципе приводить к росту значений  $\Delta f_oF2$  в предвосходные часы [Данилов и Морозова, 1991].

г) Потоки частиц (ионы), высыпаящиеся из протоносферы в ионосферу во время возмущений, предваряющих SSC, воздействуют на  $F2$ -слой, в результате чего появляется положительное изменение  $\Delta f_oF2$ , главным образом ночью [Данилов и Морозова, 1991].

д) Высыпание частиц из хвоста магнитосферы, точнее из плазменного слоя, за счет поджатия магнитосферы до момента SSC. Помимо роста  $\Delta f_oF2$  это ведет к образованию в высоких широтах спорадических  $Esr$ -слоев за несколько часов до момента  $T_0$  [Pirog et al., 2000].

По данным [Buonsanto, 1999; Данилов и Морозова, 1991; Данилов и др., 1985; Prölss, 1993; Prölss et al., 1991; Rodger et al., 1989] положительная фаза ионосферных бурь ( $\Delta f_oF2 \geq 0$ ), как правило, наблюдается перед отрицательной фазой ( $\Delta f_oF2 \leq 0$ ). Причем положительная фаза может быть как перед SSC, так и после него. Первый случай мы рассмотрели выше. Возможные причины образования положительной фазы после SSC состоят в следующем: изменения крупномасштабной циркуляции термосферного ветра, перемещающиеся атмосферные возмущения, смещение к экватору кольца авроральной ионизации и др.

Нагрев в ионосфере, вызванный поступлением энергии во время бурь или суббурь в высокие широты, создает нейтральные ветры, направленные к экватору. Часто ветры принимают форму волн или перемещающихся атмосферных возмущений, когда нагрев носит импульсный характер. Эти крупномасштабные акустические гравитационные волны могут проникать к низким широтам или даже в противоположное полушарие. Они проявляются в ионосфере как крупномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), которые можно наблюдать как последовательные подъемы  $hmF2$  вдоль широтных цепочек ионозондов [Buonsanto, 1999]. Модельные расчеты также показывают, что энергия инъекции продолжительностью  $\sim 1$  ч (суббури) вызывает ПИВ, способные проникать в противоположное полушарие. Указанные волновые процессы воспроизводят начальную форму эффектов бури аналогично наблюдаемой на средних широтах [Buonsanto, 1999; Prölss, 1993; Prölss et al., 1991].

В авроральной зоне во время магнитосферных возмущений расширение области высыпания частиц к экватору вызывает рост ионизации, т.е.

рост  $NmF2$ . Главный ионосферный провал (ГИП) движется к югу.

Выше были рассмотрены условия и явления в магнитосфере и ионосфере для магнитных бурь. Далее, согласно работе [Gonzales et al., 1994], будем полагать, что для суббурь эти условия и явления с точки зрения физики происходящих процессов, т.е. качественно, но не количественно, отличаться не будут.

Исходим из рассмотренного выше факта [Гульельми и др., 2001; Kangas et al., 2001; Золотухина, 1983], что перед ударной волной, распространяющейся от Солнца к Земле, перемещаются диффузные и промежуточные частицы со скоростью, превышающей скорость солнечного ветра. Это приводит к их упреждающему появлению в областях каспов и входного слоя магнитосферы за  $\sim 6-8$  ч до момента  $T_0$  (начало развития активной фазы суббури), которое эквивалентно моменту SSC для бурь. При этом геомагнитное поле остается практически спокойным. Момент начала взаимодействия ускоренных частиц солнечного ветра с магнитосферой Земли и будет началом роста  $\Delta f_oF2$ . Возможные механизмы роста ионизации в слое  $F2$  перед моментом SSC рассматривались выше. Полагаем, что указанные механизмы для бурь аналогично работают перед моментом  $T_0$  для суббурь. Покажем на основе спутниковых данных NSSDC OMNIWeb, что это предположение допустимо.

Сначала следует отметить, что нами рассматриваются изолированные суббури, близкие к идеальным, на фоне спокойного магнитного поля в пределах  $8 \text{ ч} < T_0 < 11 \text{ ч}$ . Из общей массы в количестве 72-х суббурь, использованных при построении рис. 7, для настоящего анализа здесь было выбрано только 20 суббурь. Эти 20 суббурь, во-первых, лучше всего соответствуют условиям изолированности, чтобы исключить эффекты предварительных возмущений. Во-вторых, они все имеют почти одинаковую длительность, что удобно при усреднении. Используя метод наложения эпох, были построены графики на рис. 9. На нем представлены вариации двух параметров:  $B_z$ -компоненты ММП и скорости солнечного ветра по данным OMNIWeb. Из рисунка 9а можно видеть, что вариации  $B_z$ -компоненты имеют “классический” характер. Момент  $T_0$  есть начало развития активной фазы суббури,  $T_e$  — момент окончания активной фазы. Момент  $T_0$  определялся как резкое увеличение  $AE$ -индекса геомагнитной активности. Дополнительно этот момент находился как начало бухты  $X$ -компоненты магнитного поля по данным цепочки станций IMAGE в соответствии с рекомендациями [Rostoker et al., 1980]. Для выбранных 20-ти суббурь заметных расхождений в значениях  $T_0$ , определенных первым и вторым методами, не обнаружено. Из рисунка 9б

можно видеть, что максимум  $V_{CB}$  имеет место при  $t = T_0$ . В данный момент происходит контакт основного потока плазмы солнечного ветра с магнитосферой Земли и имеет место начало активной фазы суббури. При  $t = -7$  ч (штриховая линия) можно видеть более слабый максимум в значениях  $V_{CB}$ , обусловленный, очевидно, воздействием предупредительного потока (области форшока) на магнитосферу Земли. Из рисунков 8б и 9б видна аналогия в поведении  $V_{CB}$ , а также то, что значения SSC и  $T_0$  соответствуют максимуму  $V_{CB}$ . Таким образом, можно заключить, что рассмотренные механизмы геофизических явлений перед магнитосферной бурей до SSC и соответственно перед суббури до момента  $T_0$  принципиально не отличаются по физике процессов и совпадают по характеру поведения во времени.

За 1–1.5 ч до  $T_0$ , после поворота  $B_z$  к югу, начинается предварительная фаза суббури. Признаками предварительной фазы суббури при  $B_z < 0$  являются следующие события: дневная часть магнитопаузы приближается к Земле; усиливается поток магнитного поля в хвосте магнитосферы; плазменный слой приближается к Земле и утоньшается; в полярной шапке усиливается электрическое поле с утренней стороны на вечернюю; усиливается высыпание мягких частиц и ряд других эффектов. Далее, начиная с момента  $T_0$  и до  $T_e$  развивается главная (активная) фаза суббури, происходят бухтообразные вариации магнитного поля. Если  $H$ -компонента имеет положительную вариацию, то суббуря положительная. Если бухта отрицательная, то соответственно и суббуря отрицательная.

#### 4. ПРЕДВЕСТНИКИ ВОЗМУЩЕНИЙ (БУРЬ/СУББУРЬ)

Настоящий раздел посвящен специфическим, ярко выраженным особенностям в ионосфере, которые наблюдаются за несколько часов до начала развития магнитного возмущения. Они, в основном, были рассмотрены выше, но без специального указания на возможность их использования в каких-либо целях. Теперь же подчеркнем, что подобные особенности при правильной их интерпретации являются предвестниками возмущений и в принципе могут быть использованы для краткосрочного прогнозирования начала развития бурь/суббурь. Здесь под краткосрочностью подразумевается интервал в 2–3 ч. Рассмотрим некоторые особенности перед возмущениями в ионосфере.

Напомним, что в предыдущих разделах, посвященных ионосфере, большое внимание уделялось так называемому главному эффекту (ГЭ) в ионосфере во время магнитосферных возмущений. Суть его вкратце состоит в том, что на фазе роста бури/суббури и до нее имеют место рост

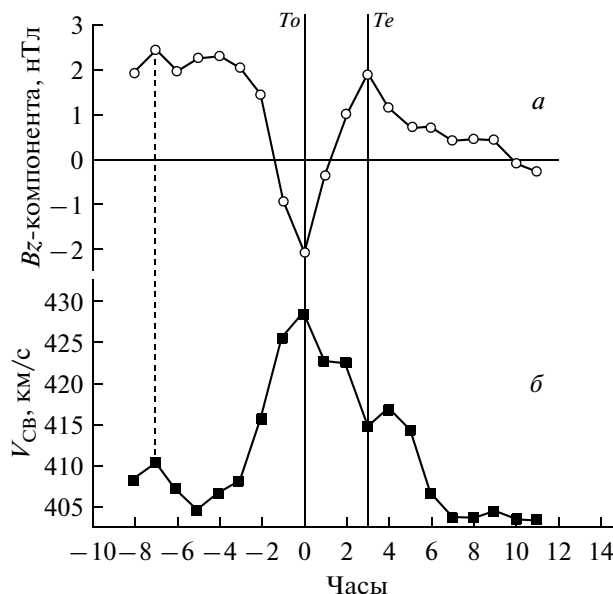
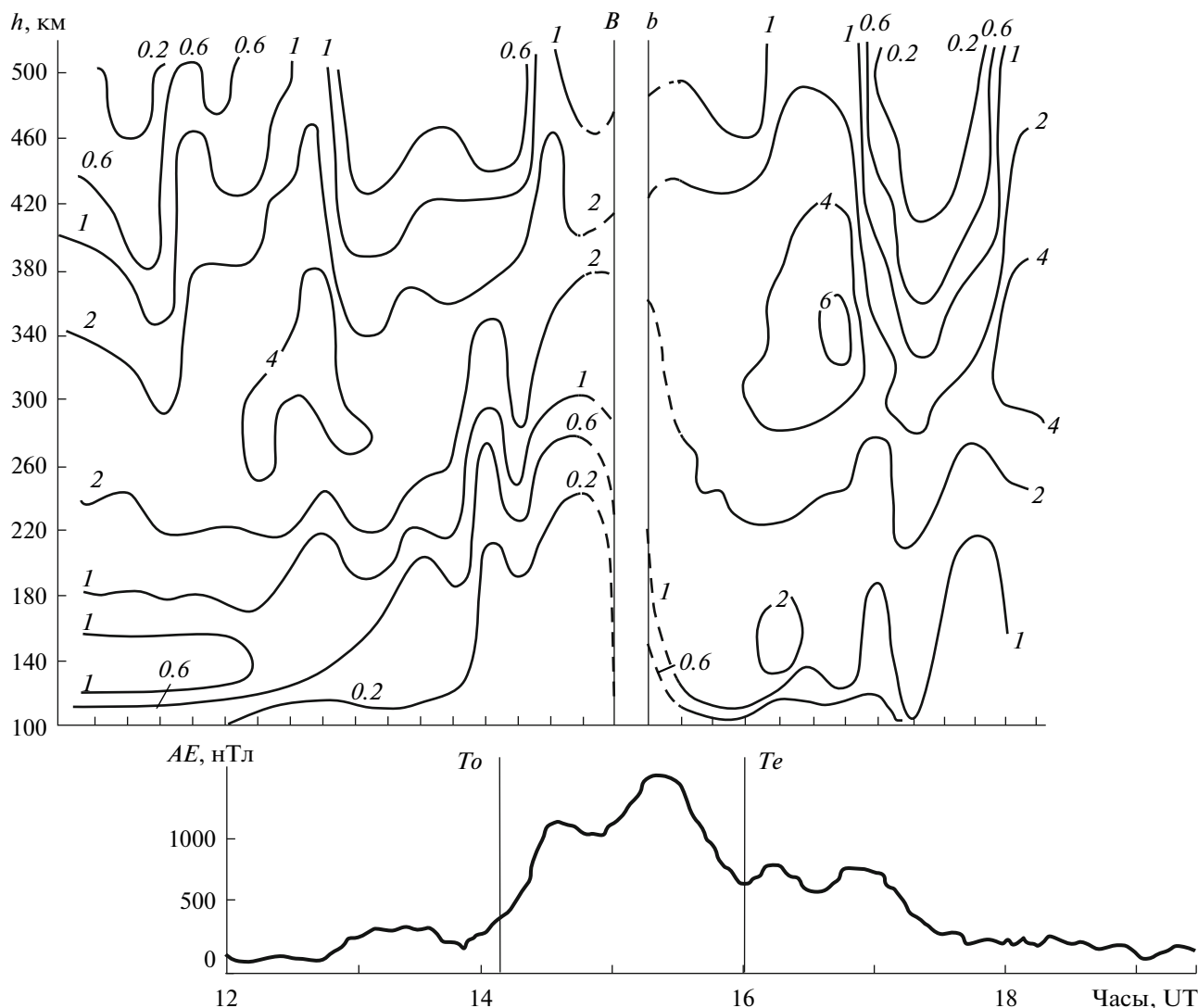


Рис. 9. Усредненные по 20-ти суббурям вариации значений  $B_z$ -компоненты ММП (*a*) и скорость солнечного ветра  $V_{CB}$  по данным OMNIWeb (*б*).  $T_0$  – момент начала активной фазы суббури,  $T_e$  – момент ее окончания.

значений  $foF2$  и уменьшение значений высот  $hmF2$  (относительно спокойной медианы) перед моментом начала взрывной фазы  $T_0$  за ~3–4 ч. Во время взрывной фазы наблюдается снижение величин  $foF2$  и рост  $hmF2$ . Далее после окончания активной фазы, момента  $T_e$ , снова происходит рост значений  $foF2$  и уменьшение значений высот  $hmF2$ . Примеры этих закономерностей можно видеть из рисунков 1–6, а усредненные закономерности во время суббури – на рис. 7. Рисунок 10 из работы [Беспозванная и др., 1988] также демонстрирует эффект ГЭ в высотном-временном распределении электронной концентрации в единицах  $10^5 \text{ см}^{-3}$ , полученном на ионозонде ст. Стерлигово ( $\Phi' = 69.4^\circ$ ), во время суббури 22.12.1982 г. Характерным является, во-первых, то, что на высотах  $F$ -области 260–380 км с 12:00 до 13:00 UT, т.е. начиная за ~2 ч до момента  $T_0$ , образуется область повышенной электронной концентрации  $4 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ . Другая аналогичная область с  $Ne = (4–6) \times 10^5 \text{ см}^{-3}$  образуется сразу после момента  $T_e$ . И третья область с  $Ne = 4 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$  образуется после 18:00 UT. Подобное поведение в основном повторяет ход значений  $\Delta foF2$  на рис. 7. Во-вторых, из рис. 10 следует, что ход кривой для  $Ne = 2 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$  (высота  $F$ -области) имеет сходство с ходом  $\Delta hmF2$  на рис. 7. Таким образом, рост  $\Delta foF2$  за несколько часов до момента  $T_0$ , как проявление ГЭ, может быть использован в качестве предвестника развития бури/суббури. Для этого необходимо непрерывное сопоставление текущей  $foF2$  с ее медиан-

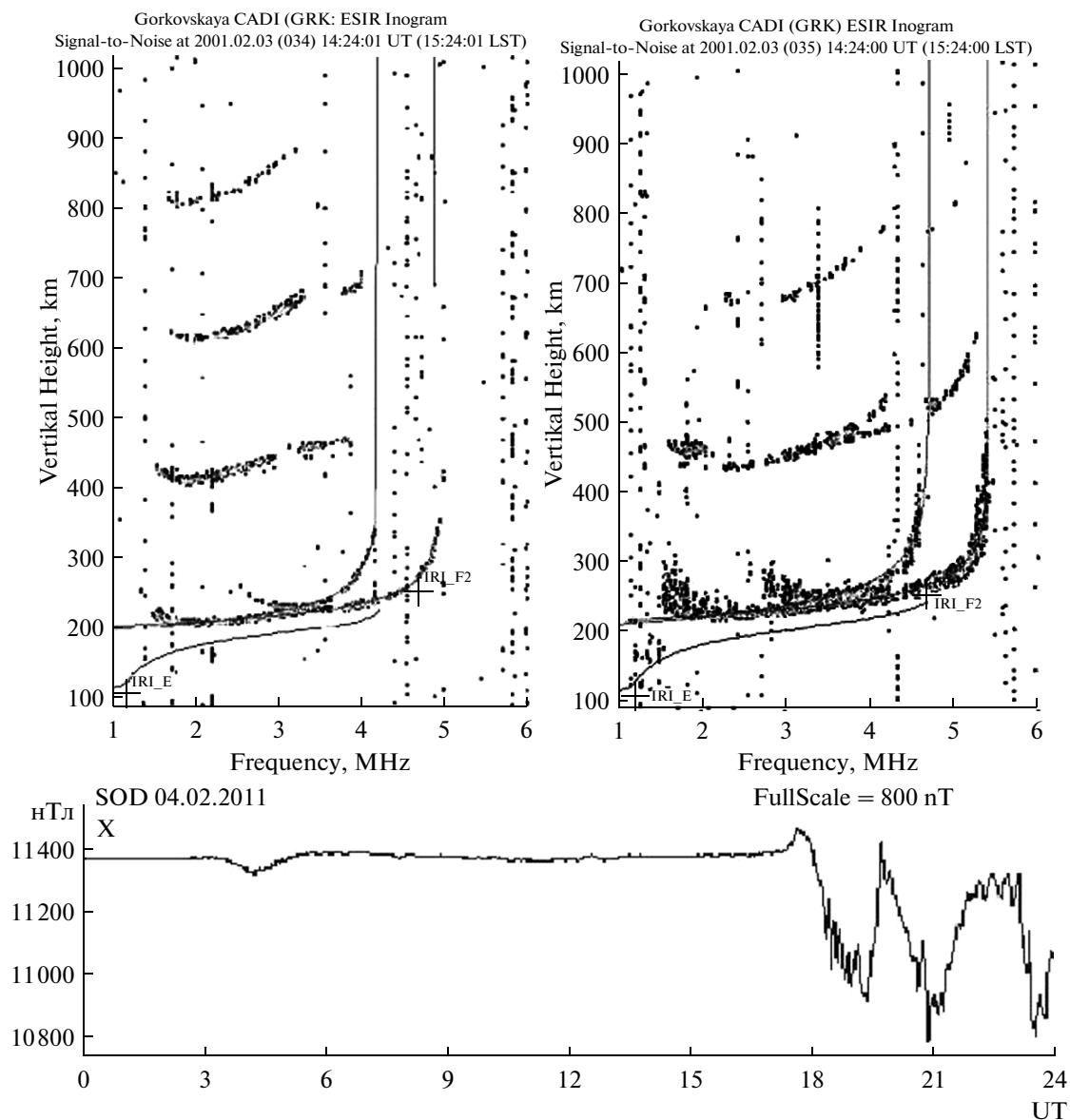


**Рис. 10.** Высотно-временное распределение электронной концентрации в единицах  $10^5 \text{ см}^{-3}$  на геомагнитной широте  $\Phi' = 69.4^\circ$  (верхняя панель) во время суббури 22 декабря 1982 г. (нижняя панель);  $T_0$  – начало активной фазы суббури,  $T_e$  – конец активной ее фазы; вертикальными линиями  $B$ - $b$  обозначен период полного поглощения.

ным значением на одном ионозонде или более (лучше) вблизи широты  $50$ – $60^\circ$ .

Как показывает опыт работы с ионограммами ВЗИ, помимо роста  $\Delta foF2$  существуют некоторые другие признаки, проявляющие себя за несколько часов до наступающего возмущения. К ним относятся рост диффузности отраженных от ионосферы сигналов, уменьшение количества отражений сигнала на ионограмме, появление отражений от спорадических  $E_s$ -слоев (не всегда) и рост интенсивности отраженного сигнала. Рассмотрим в качестве иллюстрации пример на рис. 11. На нем представлены две реальные ионограммы ВЗИ, снятые в 14:24 UT на ионозонде ст. Горьковская вблизи Санкт-Петербурга. Левая ионограмма снята для спокойных условий, которые наблюдались 03.02.2011 г. Эта ионограмма приведена в

качестве опорной для сопоставления ее с правой ионограммой, снятой в тот же момент времени, но 04.02.2011 г. Как можно видеть из рис. 11 (нижняя панель), день 04.02.2011 г. характеризуется магнитной бурей, которая началась в 17:30 UT. Следовательно, момент снятия ионограмм 14:24 UT упреждает момент начала бури  $T_0$  на  $\sim 3$  ч. Данный интервал в  $\sim 3$  ч соответствует увеличенным положительным значениям  $\Delta foF2$  и  $\Delta foEs$  на рис. 7. Задача состояла в том, чтобы выявить по ионограмме 04.02.2011 г. эти и другие особенности в отраженных сигналах по сравнению со “спокойной” ионограммой 03.02.2011 г. Из рисунка 11 следует, что на ионограмме 04.02.2011 г. по сравнению с ионограммой 03.02.2011 г. имеет место следующее: 1) рост значения  $foF2$  с 5.0 до 5.4 МГц, т.е.  $\Delta foF2 > 0$ ; 2) признаки появления  $E_s$ -слоя, т.е.



**Рис. 11.** Ионограммы вертикального зондирования ионосферы для 14:24 UT по данным ст. Горьковская (Санкт-Петербург) для спокойного дня 03 февраля 2011 г. (слева) и для возмущенного дня 04 февраля 2011 г. (справа); на нижней панели – вариации  $X$ -компоненты магнитного поля по ст. Соданкюля 04 февраля 2011 г., где начало активной фазы магнитной бури  $T_0 = 17:30$  UT.

$\Delta f_o E_s > 0$ ; 3) рост интенсивности отраженных сигналов; 4) существенный рост диффузности отраженных сигналов и 5) уменьшение числа скачков с 4 до 3. Первые три пункта являются проявлениями ГЭ. Остальные два являются сопутствующими применительно к ионограммам.

Таким образом, продемонстрированы особенности отраженных сигналов на ионограммах ВЗИ перед возмущением. Данные особенности являются проявлением ГЭ в ионосфере. Они могут быть использованы в качестве предвестников приближающегося возмущения. Однако следует заметить, что отмеченные особенности существуют не

всегда и не все вместе. В дальнейшем следует изучать их дополнительно и более тщательно.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время геомагнитных бурь и суббурь космическая погода становится возмущенной и не всегда безопасной для деятельности людей. Важно выявить, какие конкретные последствия возмущенного периода происходят во многих областях, имеющих отношение к околоземному пространству: ионосферные возмущения, работа GPS, задержка

движения спутников, проблемы авиалиний, электроснабжения, навигации, радиосвязи и др.

В настоящем обзоре основное внимание уделено влиянию магнитосферных возмущений (бурь, суббурь) на ионосферу. Объектом анализа являлись специфические вариации критических частот ионосферы и высот максимума ионизации слоя  $F_2$  перед и в начале магнитосферных бурь и суббурь (главный эффект, ГЭ) за несколько часов до начала бурь и суббурь. Указанные эффекты были экспериментально установлены ранее, но физические механизмы их до конца не ясны. Согласно проведенному исследованию, главными элементами механизмов этих эффектов являются ускоренные частицы солнечного ветра перед ударной волной, магнитосфера Земли, плазмосфера, дневной касп, авроральный овал. Здесь имеет место совершенно иной, фактически не изученный, канал проникновения энергии солнечного ветра в ионосферу. В обзоре освещены следующие вопросы: (1) каковы физические механизмы этих эффектов; (2) что и с какой заблаговременностью происходит в ионосфере перед наступающими магнитно-ионосферными возмущениями и частично во время них, а также на каких широтах отмеченные эффекты выражены сильнее. Освещение этих задач выполнено в обзоре на основе экспериментальных данных и аналитических рассуждений. Затронутые проблемы важны как с фундаментальных позиций в рамках солнечно-земной физики, так и с точки зрения прикладных проблем, например, краткосрочного прогнозирования возмущений космической погоды, вопросов обеспечения надежной КВ-радиосвязи, загоризонтной локации и навигации, особенно в высоких широтах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Афраймович Э.Л., Косоголов Е.А., Леонович Л.А., Пирог О.М.* Глобальная картина крупномасштабных возмущений 25 сентября 1998 г. по данным сети GPS // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Иркутск: СО РАН. Вып. 112. С. 142–156. 2001.
- *Беспрозванная А.С., Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Щука Т.И.* Динамика электронной плотности в авроральной зоне во время магнитосферной суббури 22 декабря, 1982 года // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 28. № 1. С. 66–70. 1988.
- *Благовещенский Д.В.* Короткие волны в аномальных радиоканалах. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG. 422 с. 2011.
- *Благовещенский Д.В., Борисова Т.Д., Егорова Л.В.* Пред- и послебуревые ситуации в ионосфере и распространение декаметровых радиоволн // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 4. С. 125–134. 1996.
- *Галеев А.А., Гальперин Ю.И., Зеленый Л.М.* Проект “Интербол” по исследованиям в области солнечно-земной физики // Космич. исслед. Т. 34. № 4. С. 339–362. 1996.
- *Гульельми А.В., Золотухина Н.А., Кангас Й., Культима Й., Потапов А.С.* Нарастание волновой активности  $Pe_1$  перед внезапными магнитными импульсами SI // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Вып. 112. Иркутск: СО РАН. С. 115–123. 2001.
- *Данилов А.Д.* Ионосферные бури в  $F_2$ -области. Морфология и физика // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 23. № 5. С. 705–719. 1985.
- *Данилов А.Д., Морозова Л.Д.* Термосферно-ионосферное взаимодействие в период ионосферных бурь (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 31. № 2. С. 209–222. 1991.
- *Данилов А.Д., Морозова Л.Д., Мирмович Э.Г.* О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 25. № 5. С. 768–772. 1985.
- *Золотухина Н.А., Пирог О.М., Полев Н.М.* Геосферные эффекты солнечной вспышки 13 декабря 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 5. С. 579–591. 2011.
- *Золотухина Н.А.* О геофизических предвестниках SSC // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Вып. 66. М.: Наука. С. 51–54. 1983.
- *Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н. Г.* Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 2. Короткопериодические колебания геомагнитного поля. Л.: ЛГУ. 270 с. 1976.
- *Aarons J., Foster J.C., Rodger A.S.* Auroral and subauroral  $F$ -layer irregularities and high plasma convection during the magnetically active periods of 17–24 September 1984 // Ann. Geophys. V. 9. P. 614–622. 1991.
- *Akmaev R.A.* Whole atmosphere modeling: Connecting terrestrial and space weather // Rev. Geophys. 49, RG4004, doi:10.1029/2011RG000364. 2011.
- *Ban P.-P., Sun S.-J., Chen C., Zhao Z.-W.* Forecasting of low-latitude storm-time ionospheric  $foF_2$  using support vector machine. Radio Sci., 46, RS6008, doi:10.1029/2010RS004633. 2011.
- *Baker D.N.* Solar wind – magnetosphere drivers of space weather // J. Atmos. Terr. Phys. V. 58. № 11. P. 1509–1526. 1996.
- *Blagoveshchensky D.V., MacDougall J.W., Piatkova A.V.* Ionospheric effects preceding the October 2003 Halloween storm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 68. № 11. P. 821–831. 2006.
- *Borovsky J.E., Wemzek R.J., Belian R.D.* The occurrence rate of magnetospheric substorms // J. Geophys. Res. V. 98. № A3. P. 3807–3813. 1993.
- *Buonsanto M.J.* Ionospheric storms – a review // Space Science Reviews. V. 88. № 3–4. P. 563–601. 1999.
- *Cander L.R., Mihajlovic S.J.* Forecasting ionospheric structure during the great geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 103. № A1. P. 391–398. 1998.
- *Chao-Song Huang, Foster J.C.* Prompt effects of solar wind variations on the inner magnetosphere and mid-latitude ionosphere // Space Weather Week. April 16–19. Boulder. Colorado. Abstr. P. 17. 2002.



- *Danilov A.D., Laštovička J.* Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // Intern. J. Geomagn. Aeron. V. 7. № 3. P. 278–286. 2002.
- *Fairfield D.H.* Advances in magnetospheric storm and substorm research: 1989–1991 // J. Geophys. Res. V. 97. № A7. P. 10865–10874. 1992.
- *Fox N.J., Peredo M., Thompson B.J.* Cradle to grave tracking of the January 6–11, 1997 Sun–Earth connection event // Geophys. Res. Lett. V. 25. № 14. P. 2461–2464. 1998.
- *Gauld J.K., Yeoman T.K., Davies J.A., Milan S.E., Honary F.* SuperDARN radar HF propagation and absorption response to the substorm expansion phase // Ann. Geophysicae. V. 20. P. 1631–1645. 2002.
- *Goncharenko L.P., Foster J., Coster A., Huang C., Aponte N., Paxton L.* Observations of a positive storm phase on September 10, 2005 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 69. № 6. P. 1253–1272. 2007.
- *Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide D., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas P.* What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. V. 99. P. 5771–5792. 1994.
- *Jin S.G., Luo O.F., Park P.* GPS observations of the ionospheric F2-layer behavior during the 20th November 2003 geomagnetic storm over South Korea // J. Geodesy. V. 82. № 12. P. 883–892, doi: 10.1007/s00190-008-0217-x. 2008.
- *Kangas J., Kultima J., Guglielmi A., Potapov A., Hayashi K.* Impact of interplanetary shock on the ULF wave activity: A case study of the storm sudden commencement on September 22, 1999 // Earth Planets Space. V. 53. № 7. P. 1173–1182. 2001.
- *Khazanov G.V.* Kinetic theory of the inner magnetospheric plasma. Springer. 581 p. 2011.
- *Laštovička J.* Monitoring and forecasting of ionospheric space weather – effects of geomagnetic storms // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. № 5–6. P. 697–705. 2002.
- *Lewis R.V., Freeman M.P., Reeves G.D.* The relationship of HF radar backscatter to the accumulation of open magnetic flux prior to substorm onset // J. Geophys. Res. V. 103. № 11. P. 26,613–26,619. 1998.
- *Lyons L.R.* Substorms: Fundamental observational features, distinction from other disturbances, and external triggering // J. Geophys. Res. V. 101. № A6. P. 13011–13025. 1996.
- *Ma S.Y., Cai H.T., Liu H.X., Schlegel K., Lu G.* Positive storm effects in the dayside polar ionospheric F-region observed by EISCAT and ESR during the magnetic storm of 15 May 1997 // Ann. Geophys. V. 20. № 9. P. 1377–1384. 2002.
- *Milan S.E., Jones T.B., Warrington E.M.* Enhanced MUF propagation of HF radio waves in the auroral zone // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 59. № 2–3. P. 237–249. 1997.
- *Ondoh T., Obu K.* Prediction of HF communications disturbances by pre-SC HF field increase on polar paths crossing the auroral zone // Solar-Terr. Predict. Proc. V. 4. P. D2-21–D2-30. 1980.
- *Park C.G.* A morphological study of substorm-associated disturbances in the ionosphere // J. Geophys. Res. V. 79. № 19. P. 2821–2827. 1974.
- *Pirog O.M., Urbanovich V.D., Zherebtsov G.A.* Effects of substorms in the night auroral E-region // 5th Intern. Conf. on Substorms. Abstr. St.-Petersburg. P. 545–547. 2000.
- *Prölss G.W.* On explaining the local time variation of ionospheric storm effects // Ann. Geophysicae. V. 11. № 1. P. 1–9. 1993.
- *Prölss G.W., Brace L.H., Mayer H.G., Carignan G.R., Killeen T.L., Klobuchar J.A.* Ionospheric storm effects at subauroral latitudes: a case study // J. Geophys. Res. V. 96. № 2. P. 1275–1288. 1991.
- *Szuszczewicz E.P., Lester M., Wilkinson P., Blanchard P., Abdu M., Hanbaba R., Igarashi K., Pulinetz S., Reddy B.M.* A comparative study of global ionospheric responses to intense magnetic storm conditions // J. Geophys. Res. V. 103. № A6. P. 11665–11684. 1998.
- *Rodger A.S., Wrenn G.L., Rishbeth H.* Geomagnetic storms in the Antarctic F-region. 2. Physical interpretation // J. Atmos. Terr. Phys. V. 51. № 3. P. 851–866. 1989.
- *Rostoker G., Akasofu S.-I., Foster J., Greenwald R.A., Kamide Y., Kawasaki K., Liu A.T.Y., McPherron R.L., Russel C.T.* Magnetospheric substorms – definition and signatures // J. Geophys. Res. V. 85. № A4. P. 1663–1668. 1980.
- *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.
- *Yeh K.C., Ma S.Y., Lin K.H., Conkright A.* Global ionospheric effects of the October 1989 geomagnetic storm // J. Geophys. Res. V. 99. № A4. P. 6201–6218. 1994.