

УДК 550.388.2

ЭФФЕКТЫ В ИОНОСФЕРЕ И РАСПРОСТРАНЕНИИ КОРОТКИХ ВОЛН ВО ВРЕМЯ ИНТЕНСИВНОЙ СУББУРИ

Д. В. Благовещенский¹, Т. Д. Борисова², Д. Д. Рогов²

¹ Университет аэрокосмического приборостроения;

² Арктический и антарктический НИИ Госкомгидромета, г. Санкт-Петербург, Россия

В настоящей работе представлены результаты комплексных радиофизических исследований за период интенсивной суббури, имевшей место с 00:00 до 02:00 UT 12 апреля 1999 года. Измерения параметров ионосферы цепочкой ионозондов Европы за данный период сопоставлялись с усреднёнными по более чем 70 суббурям вариациями параметров ионосферы. Последние получены по данным ионозондов Европы, Центральной Сибири и Северной Америки за 1993–1999 годы. При анализе суббури 11–12 апреля привлекались данные радара CUTLASS и спутников DMSP и POES. Методом моделирования лучевых траекторий выполнены расчёты условий распространения коротких волн на высокоширотной радиотрассе Санкт-Петербург—Лонгьербен (Шпицберген). В ионосфере выявлено наложение двух эффектов: первый имеет место непосредственно во время суббури, второй связан с окончанием магнитной бури 10 апреля. Во время взрывной фазы суббури количество обратно рассеивающих неоднородностей в слое F ионосферы по данным радара CUTLASS заметно уменьшается. Данные спутников показали рост интенсивности высыпаний «мягких» (сотни электронвольт) частиц перед суббурей и после неё. Расчёты распространения коротких волн на радиотрассе Санкт-Петербург—Лонгьербен продемонстрировали существенную смену механизмов распространения во время суббури и заметное изменение углов прихода волн перед суббурей и после неё.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что каждая отдельно взятая магнитосферная суббура производит определённые, характерные для неё изменения в ионосфере, что приводит к непредсказуемым изменениям в работе различных ионосферных систем. Даже если разные суббури по типу, интенсивности и продолжительности не отличаются друг от друга, вызываемые ими эффекты различны. Здесь определённую роль играет зависимость ионосферных процессов от широты и долготы исследуемой точки, времени суток, фоновой магнитной активности и множества других факторов [1, 2]. Ясно, что в чистом виде эффекты в ионосфере во время суббурь практически не повторяются. Однако, если рассматривать достаточно большое количество примерно одинаковых суббурь, можно выявить специфические закономерности в поведении ионосферных параметров во время суббури. Подобные исследования были проведены ранее [3–7]. В указанных работах установлено, что существует так называемый главный эффект в ионосфере во время суббурь и магнитных бурь средней интенсивности ($AE_{\max} \lesssim 750$ нТл) и продолжительностью не более $10 \div 20$ ч. Анализировались вариации критической частоты слоя F_2 и высоты максимума этого слоя (точнее, отклонения данных параметров во время возмущений от их средних значений Δf_{0F_2} и $\Delta h'_{F_2}$). Суть главного эффекта состоит в том, что за $6 \div 8$ часов до начала взрывной фазы суббури (момент T_0) имеет место рост значений Δf_{0F_2} с пиком за $3 \div 4$ часа до T_0 , затем наблюдается уменьшение значений Δf_{0F_2} к моменту T_0 , далее в интервале от T_0 до T_e , где T_e — конец взрывной фазы, $\Delta f_{0F_2} < 0$; после момента T_e снова имеет место рост значений Δf_{0F_2} с последующим спадом. Что касается значений $\Delta h'_{F_2}$, то они возрастают после момента T_0 и уменьшаются к моменту T_e . Дальнейшие исследования ионосферных параметров во время суббури с привлечением измерений на спутниках проводятся в данной работе.

Д. В. Благовещенский, Т. Д. Борисова, Д. Д. Рогов

В настоящей работе, во-первых, обобщаются ионосферные данные ионозондов Европы, Северной Америки и Центральной Сибири для качественного описания главного эффекта в ионосфере, поскольку важно установить общие закономерности вариаций ионосферных параметров во время суббури. Во-вторых, проводится комплексное исследование несколько необычного поведения указанных выше ионосферных параметров во время магнитосферной суббури 11–12 апреля 1999 года с помощью данных цепочки ионозондов в Кируне, Соданкюле, Люкसे, Упсале и Варшаве. Для анализа привлекались данные радара CUTLASS и спутниковые данные. В-третьих, представляется интересным рассчитать особенности распространения коротких волн на высокоширотной радиотрассе Санкт-Петербург—Лонгьербьен во время указанной суббури, что весьма полезно для решения вопросов радиосвязи, загоризонтной радиолокации и навигации в высоких широтах. Специфика этой суббури состоит в том, что она достаточно интенсивна, кратковременна и происходит на слабо возмущённом фоне во время конца фазы восстановления магнитной бури, имевшей место 10 апреля 1999 года.

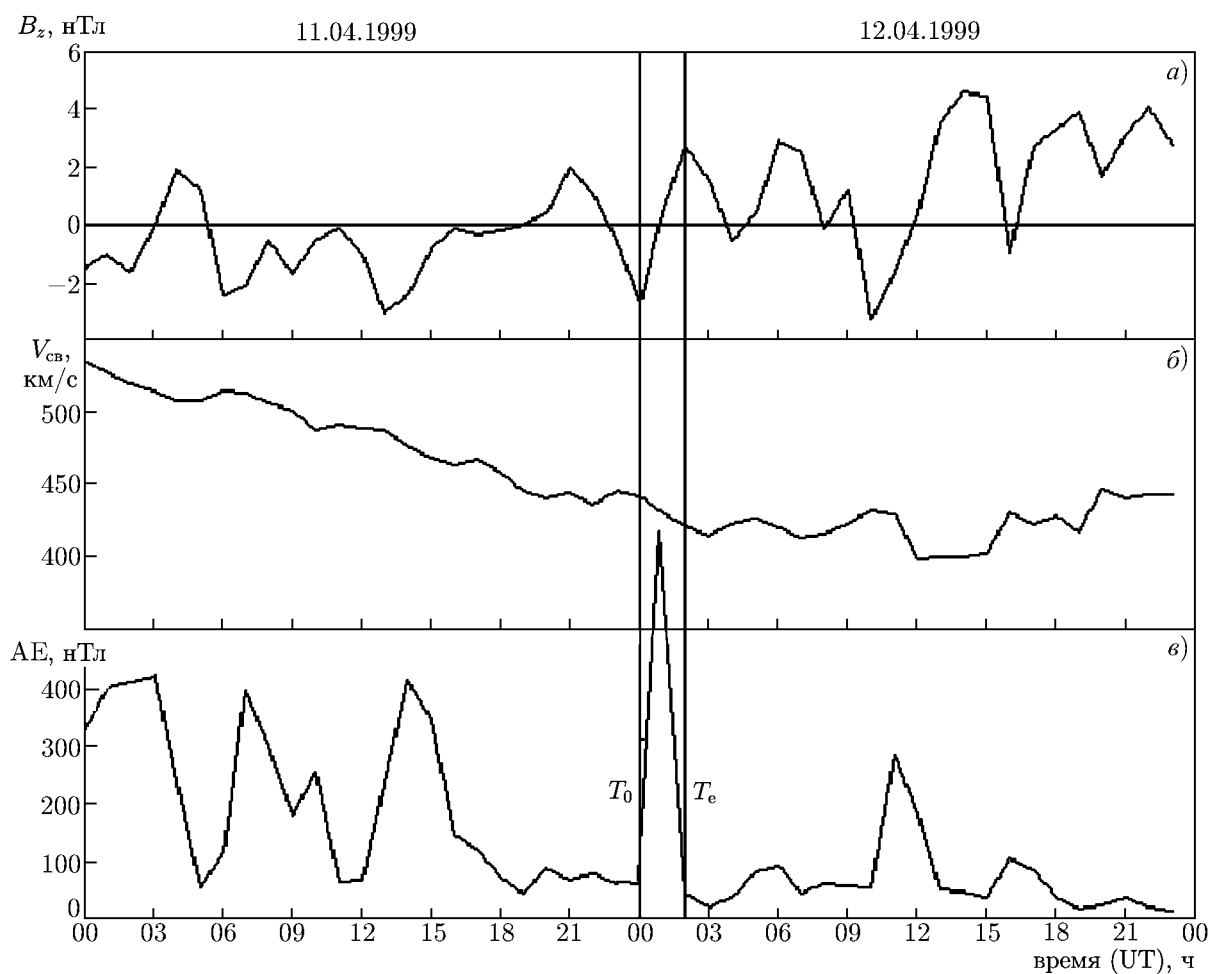


Рис. 1. Данные OMNIWeb [8] за 11–12 апреля 1999 года: зависимости от времени компоненты B_z межпланетного магнитного поля (а), скорости солнечного ветра V_{sw} (б), индексов магнитной активности AE (в) и T_e — моменты начала и конца активной фазы суббури соответственно

1. ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА 10–13 АПРЕЛЯ 1999 ГОДА

Исследуемую в данной работе суббурю в интервале 00:00÷02:00 UT 12 апреля 1999 года (рис. 1, [8]) следует рассматривать в контексте общего состояния солнечного ветра и магнитосферы. А именно, 10 апреля в 03:00 UT было зафиксировано импульсное увеличение концентрации солнечного ветра до 25 см^{-3} . С 03:00 до 20:00 UT скорость солнечного ветра $V_{\text{св}}$ увеличилась от 350 до 560 км/с с последующим уменьшением. Реакция магнитосферы на изменение параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля проявилась в появлении магнитной бури с постепенным началом и значением $D_{\text{st}} = -27 \text{ нТл}$ в максимуме главной фазы в 23:00 UT 10 апреля. Фаза восстановления бури продолжалась до конца дня 12 апреля. На фоне развития магнитной бури наблюдалось несколько суббуревых возмущений. Практически все суббури можно отождествить с поворотом к югу компоненты B_z межпланетного магнитного поля (рис. 1), когда возникают наиболее благоприятные условия для поступления энергии солнечного ветра в магнитосферу. Суббуря с 00:00 до 02:00 UT 12 апреля с амплитудой $\Delta E_{\text{max}} = 700 \text{ нТл}$ — это реакция магнитосферы на небольшое увеличение скорости солнечного ветра с 22:00 до 24:00 UT 11 апреля (рис. 1) и кратковременный поворот к югу B_z -компоненты межпланетного магнитного поля в середине фазы восстановления бури 10 апреля. Подобные магнитосферные суббури, но с меньшей амплитудой по индексу ΔE , имели место 11 апреля ($\Sigma K_p = 18-$) и 12 апреля ($\Sigma K_p = 13$). Из рис. 1 видно, что характер суббурь за эти два дня различен. Если возмущения 11 апреля состояли из трёх последовательных суббурь с продолжительностью несколько часов каждая, то суббуря 12 апреля с 00:00 до 02:00 UT была более интенсивной и возникла на почти спокойном фоне. Далее 12 апреля имели место две суббури малой интенсивности около 12:00 и около 17:00 UT. День 13 апреля был полностью спокойным ($\Sigma K_p = 7-$).

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1. Данные по ионосфере

На рис. 2 представлено схематическое изображение усреднённых вариаций ионосферных параметров Δf_{0F_2} , Δf_{0E_s} , $\Delta h'_F$ и Δh_{E_s} во время суббури. Здесь Δ — отклонение параметра за суббуревой период от среднего значения, f_{0F_2} и f_{0E_s} — критические частоты слоя F_2 и спорадического слоя E_s ионосферы соответственно, h'_F и h_{E_s} — высоты этих слоёв. Усреднение проводилось методом наложения эпох по более чем 70 суббурям с продолжительностью $T_0 - T_e = 2 \div 3$ часа, где T_0 и T_e — начало и конец активной фазы суббури. Исходными являются данные ионозондов, расположенных в интервале геомагнитных широт $50^\circ \div 70^\circ$ в Европе, Центральной Сибири и Северной Америке. Кривые на рис. 2 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 годов. Что касается спорадических слоёв E_s , то для высокоширотных ионозондов вероятность их появления высока, тогда как для более низкоширотных ионозондов они могут и не появляться.

Из рис. 3 можно видеть вариации параметров Δf_{0F_2} и $\Delta h'_F$ во время суббури 00:00÷02:00 UT 12 апреля для цепочки ионозондов последовательно от высоких широт к низким: Кируна, Люкसे-ле, Упсала и Варшава. Указанная цепочка ионозондов ориентирована вдоль восточной долготы примерно 20° . Ионозонд в Соданкюля на рис. 3 лежит восточнее указанной цепочки на приблизительно 7° по широте. Сопоставление вариаций $\Delta h'_F$ на рис. 2а и в правой колонке на рис. 3 показывает, что эти кривые качественно подобны. То же можно сказать и о характере вариаций

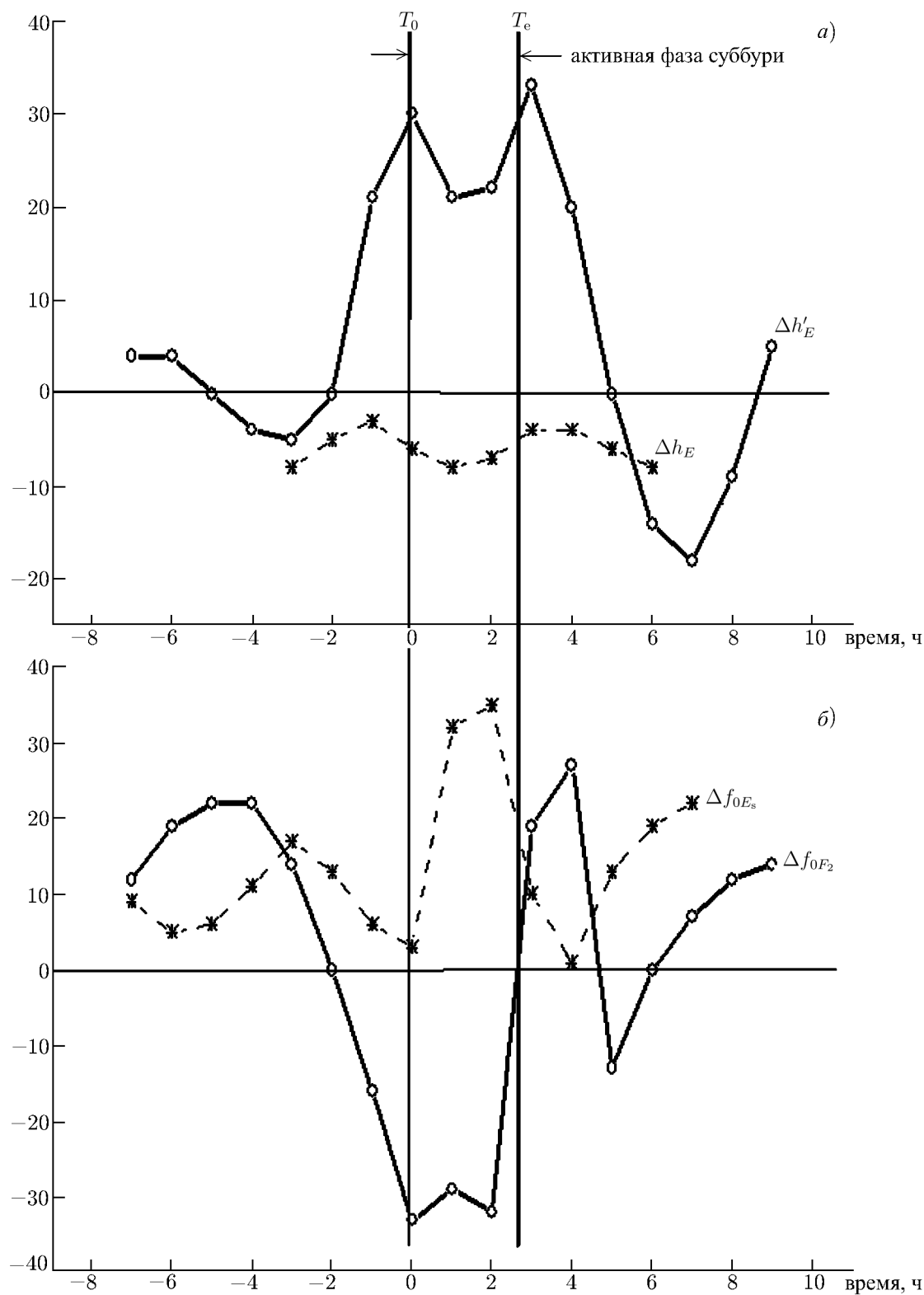


Рис. 2. Усреднённые по более чем 70 суббурям и различным ионозондам относительные вариации ионосферных параметров за период обобщённой суббури: $\Delta h'_F$ и $\Delta h'_{E_s}$ (а); Δf_{0F2} , Δf_{0E_s} (б)

Δf_{0F2} на рис. 2б и в левой колонке на рис. 3. Из последнего также можно видеть, что пример-

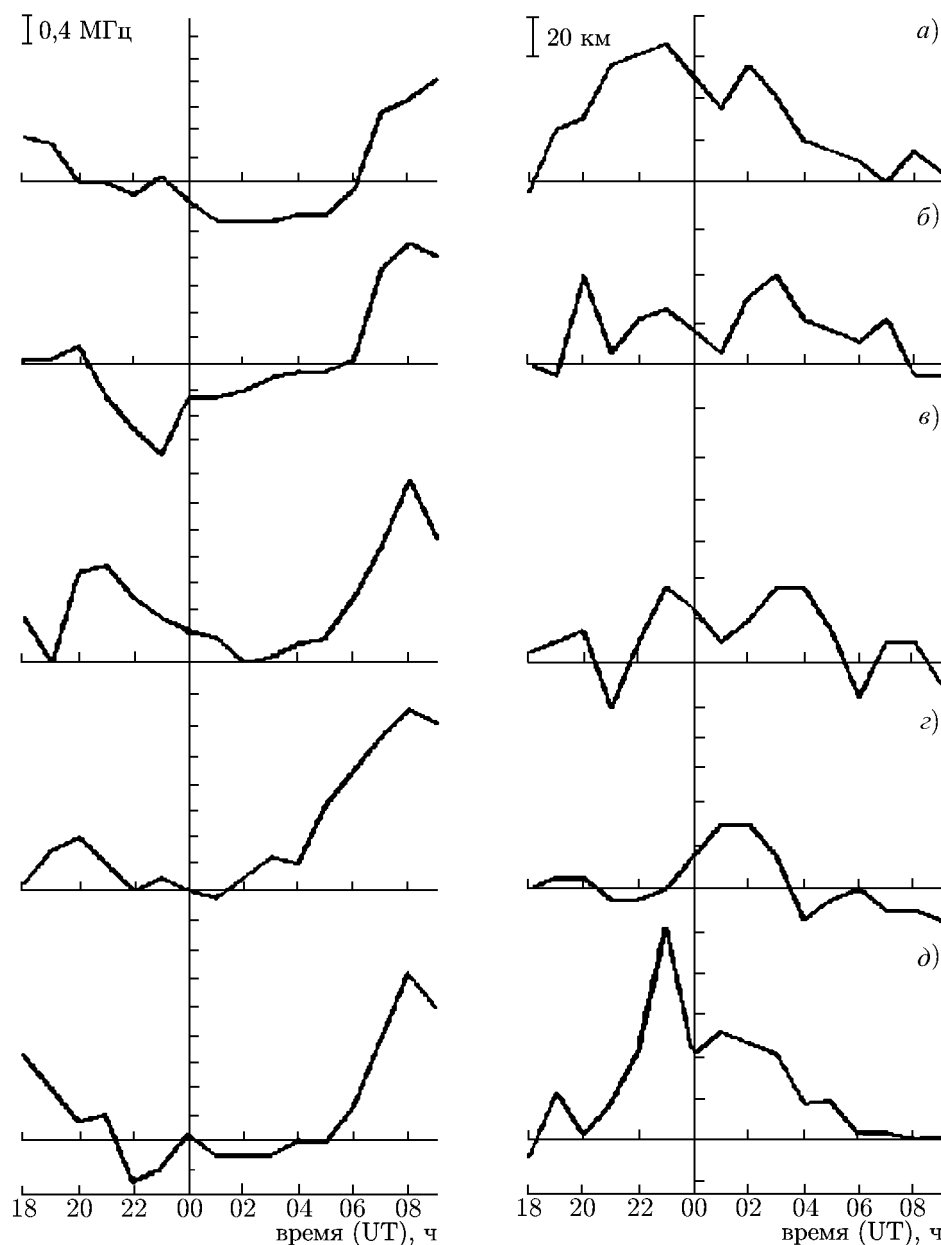


Рис. 3. Вариации параметров Δf_{0F_2} и $\Delta h'_F$ (правые панели) во время суббури 00:00÷02:00 UT 12 апреля 1999 года по данным ионозондов Европы: (а) Кируна ($67,84^\circ$ с. ш., $20,42^\circ$ в. д.), (б) Люкселе ($64,6^\circ$ с. ш., $18,8^\circ$ в. д.), (в) Уппсала ($59,8^\circ$ с. ш., $17,6^\circ$ в. д.), (г) Варшава ($52,1^\circ$ с. ш., $21,1^\circ$ в. д.), (д) Соданкюля ($67,37^\circ$ с. ш., $26,63^\circ$ в. д.). В скобках указаны географическая широта и долгота соответственно

но за 4÷6 часов до момента T_0 имеет место максимум значения Δf_{0F_2} . Аналогичный максимум наблюдается за 4÷6 ч до момента T_0 на рис. 26. Резкое увеличение Δf_{0F_2} по данным ионозондов цепочки (см. рис. 3) с 06:00 UT 12 апреля, скорее всего, обусловлено наложением главного эффекта в ионосфере за счёт суббури [3] и эффекта роста Δf_{0F_2} на фазе восстановления бури [7]. Наложение указанных эффектов в предполуденное время приводит к росту Δf_{0F_2} на 43 % для Кируны, на 36 % для Люкселе, на 47 % для Уппсалы, на 40 % для Варшавы и на 47 % для Соданкюли. Превышение $\Delta h'_F$ в 23:00 UT над средним значением h'_F 11 апреля составляет 33 %

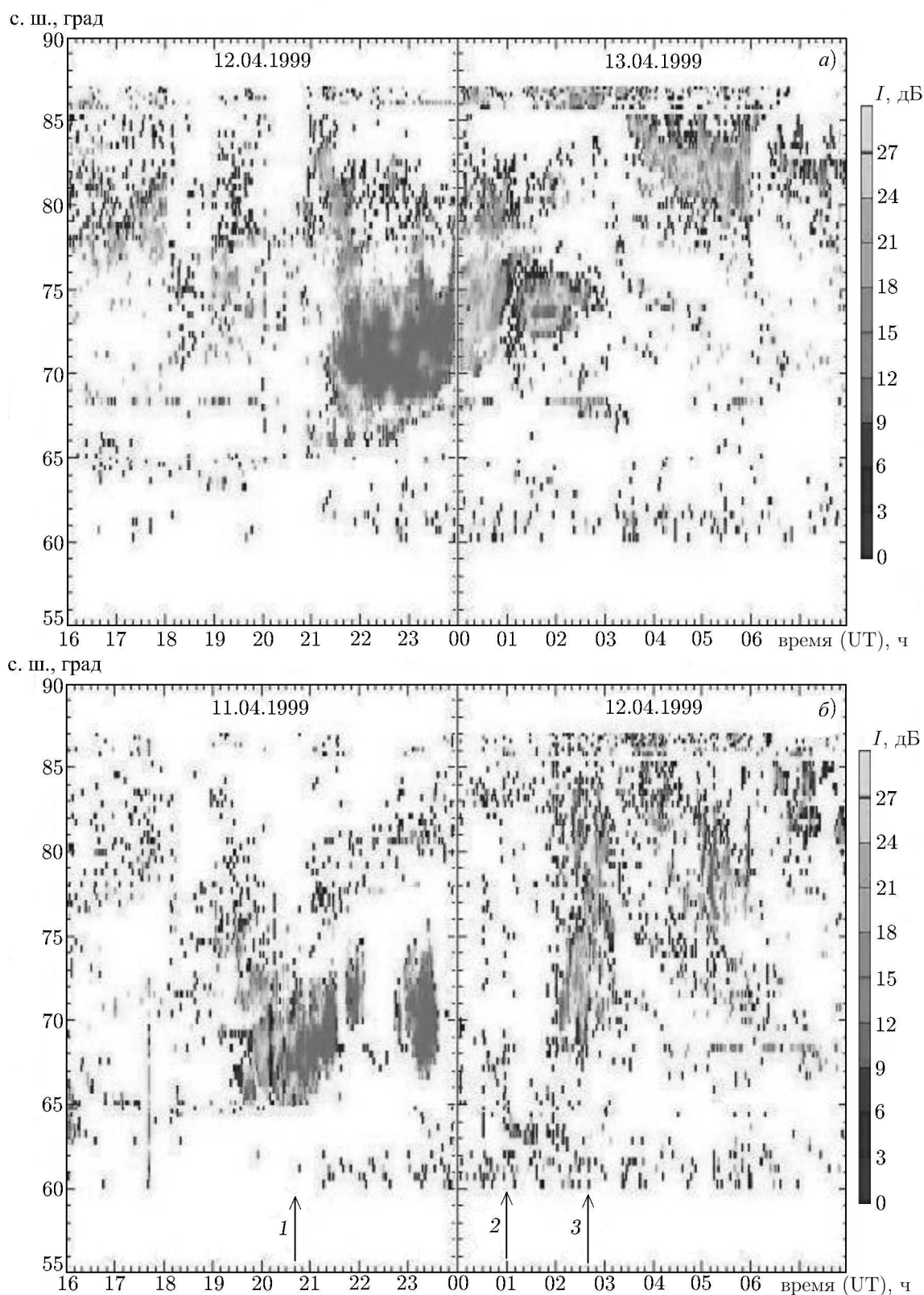


Рис. 4. Данные радара CUTLASS за 12–13 апреля (а) и 11–12 апреля (б) 1999 года. По оси ординат отложена геомагнитная широта λ , справа приведена шкала энергии излучения рассеянного на неоднородностях ионосферы

для Соданкюли. Что касается поведения Δf_{0E_s} , то по данным ионозонда в Соданкюле во время суббури 00:00÷02:00 UT 12 апреля вариации Δf_{0E_s} в основном повторяют общую закономерность, представленную пунктиром на рис. 2б: за 7 часов до момента T_0 начинается спад значений Δf_{0E_s} с +0,1 до -0,2 МГц (минимум) за 6 часов до T_0 , затем $\Delta f_{0E_s} = 0,5$ МГц (максимум) за 2 часа до T_0 , далее $\Delta f_{0E_s} = -0,1$ МГц (минимум) в момент времени T_0 , затем имеет место существенный максимум (1,6 МГц) через 2 часа после T_0 и минимум (0,0 МГц) через 3 часа после T_0 .

На рис. 4 приведены данные радара CUTLASS. Последний представляет собой коротковолновый двойной радар с двумя приёмопередающими центрами в Исландии и Финляндии. Он предназначен для изучения высокоширотной ионосферы [9, 10]. Антенная система радара состоит из 16 передающих антенн, формирующих главный лепесток диаграммы направленности. Общая диаграмма направлена на север Скандинавии и архипелаг Шпицберген. Рисунок 4а характеризует мощность излучения, обратно рассеянного на ионосферных неоднородностях, за спокойный период конца дня 12 апреля и начала дня 13 апреля 1999 года. Рисунок 4б характеризует обратное рассеяние за слабо возмущённый период конца дня 11 апреля и начала дня 12 апреля, когда с 00:00 до 02:00 UT 12 апреля имела место мощная магнитосферная суббуря, описанная выше. Из рис. 4а можно видеть достаточно интенсивное рассеяние в области магнитных широт $66^\circ \div 76^\circ$ с 21:00 до 03:00 UT, которое, скорее всего, связано с ионосферными неоднородностями, расположенными в области аврорального пика. Последний, как известно [11], ночью расположен к полюсу от главного ионосферного провала в интервале инвариантных широт $\Phi_L = 64^\circ \div 72^\circ$. Высокоширотная граница ионосферного провала является экваториальной границей зоны авроральной ионизации. Область интенсивного рассеяния на рис. 4б отличается от аналогичной области на рис. 4а: нижняя панель демонстрирует начало интенсивного рассеяния уже с 19:00 UT. Это, скорее всего, обусловлено процессами в магнитосфере и ионосфере [1, 2], предваряющими активную фазу суббури и происходящими в течение 6÷8 часов перед её началом T_0 (см. рис. 2б). Из рис. 4б видно, что во время активной фазы суббури с 00:00 до 00:02 UT рассеянные сигналы практически отсутствуют из-за истощения верхней ионосферы (рис. 2б). Стрелками 1, 2, 3 на рис. 4б указаны моменты времени трёх сеансов радара CUTLASS, показывающих пространственное распределение рассеивающих неоднородностей в области охвата диаграммой направленности радара. Эти сеансы представлены на рис. 5. Сеанс 1 на рис. 5 соответствует времени 20:40 UT. На нём видна область рассеяния к северу от Скандинавии. Подобные области были видны на сеансах радара через каждые 20 минут с 19:00 до 23:20 UT, сеанс в 20:40 UT является типичным примером. Сеанс 2 на рис. 5 соответствует времени 01:00 UT — середине активной фазы суббури. В это время можно видеть весьма малое количество рассеивающих неоднородностей, что свидетельствует об истощении верхней ионосферы. Наконец, сеанс 3 показывает широкую область наличия неоднородностей, простирающуюся от севера Скандинавии через Шпицберген и до полюса. Физически наличие такой широкой области неоднородностей объясняется динамическими процессами сразу же после активной фазы суббури. Однако картина, подобная сеансу 3, но с меньшей интенсивностью отражений, сохраняется на последующих сеансах вплоть до 09:00 UT. Таким образом, данные радара CUTLASS отражают динамическую картину перераспределения неоднородностей ионосферы перед, во время и после суббури. Данные рис. 4 и 5 в определённой степени подтверждают усреднённые характеристики Δf_{0F_2} на рис. 2б и вариации Δf_{0F_2} на рис. 3.

2.2. Спутниковые данные

В исследованиях использовались данные спутников DMSP и POES. Они обладают следующими характеристиками. Спутники DMSP имеют полярные орбиты, фиксированные в местном времени. Например, спутник F13 имеет приблизительно ориентацию восход—закат. Все спутники

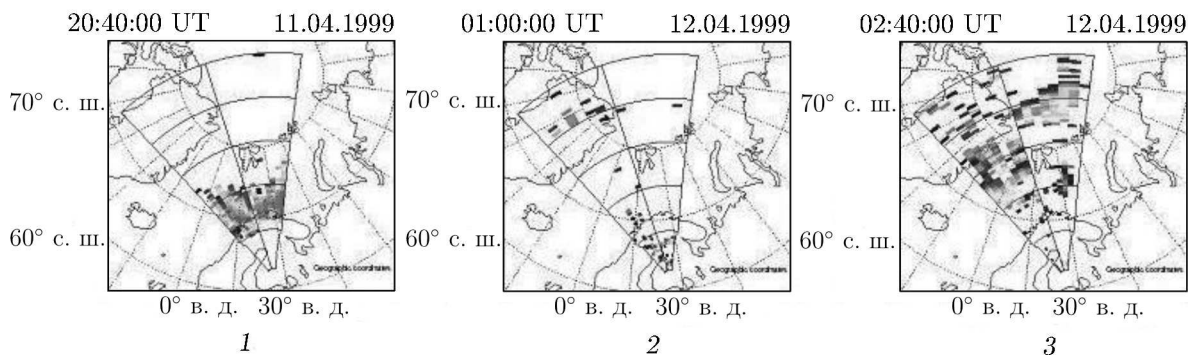


Рис. 5. Данные радара CUTLASS, показывающие пространственное распределение рассеивающих неоднородностей ионосферы над радиотрассой для трёх моментов времени

DMSP (F8–F15) собирают данные по ионосферной плазме на высоте порядка 840 км. К числу этих данных относятся три компоненты скорости потока плазмы V_x , V_y , V_z , концентрация плазмы N_i , относительные концентрации ионов H^+ , He^+ , O^+ , ионная и электронная температуры T_i и T_e , а также интенсивность потока высыпающихся «мягких» частиц (электронов и протонов). Спутники POES на высотах порядка 850 км измеряют в основном энергии электронов и протонов в широком интервале значений, от сотен электронвольт («мягкие» частицы) до тысяч килоэлектронвольт и более.

Выбор траектории полётов спутников осуществлялся так, чтобы спутники пролетали за время существования анализируемой суббури 11–12 апреля в области северной Скандинавии и архипелага Шпицберген (граница Баренцева и Гренландского морей), т. е. области, охватываемой диаграммой направленности радара CUTLASS (см. рис. 5). Указанным выше условиям удовлетворяли шесть пролётов спутника DMSP: 1) спутник F12, 18:59 UT 11.04.1999; 2) спутник F14, 19:03 UT 11.04.1999; 3) спутник F13, 05:54 UT 12.04.1999; 4) спутник F13, 07:38 UT 12.04.1999; 5) спутник F12, 08:42 UT 12.04.1999 и 6) спутник F14, 08:47 UT 12.04.1999, а также три пролёта спутника POESn15: 1) 18:24 UT 11.04.1999; 2) 06:25 UT 12.04.1999 и 3) 08:06 UT 12.04.1999. Как можно видеть, пролёты спутников над исследуемой областью имели место только перед суббурей и после неё. Во время взрывной фазы суббури с 00:00 до 02:00 UT 12 апреля, к сожалению, подходящих пролётов обнаружено не было. Пролёты спутников над интересующей нас областью в те же часы в магнитоспокойный период 12–13 апреля также были рассмотрены. Представляло интерес выявление особенности характеристик ионосферной плазмы по данным спутников в возмущённое время, сравнение данных спутников с данными радара CUTLASS, а также сравнение результатов наблюдений в спокойное и возмущённое время.

Анализ показал, что для всех указанных выше 6 пролётов спутников DMSP в возмущённых условиях суббури наблюдаются сходные вариации в высыпаниях частиц и параметрах ионосферы. В качестве типичного примера рис. 6 [12] демонстрирует характер высыпаний по данным спутника DMSP за 11.04.1999 (рис. 6а) и 12.04.1999 (рис. 6б). Из рис. 6а можно видеть повышенный уровень энергии высыпающихся электронов и протонов в виде пика в 18:59 UT (в небольшом интервале перед 18:59 UT данные отсутствуют по техническим причинам). Этот пик энергичных высыпаний подтверждает факт начала ионосферно-магнитосферного взаимодействия примерно за 5 ч до начала взрывной фазы суббури в 00:00 UT 12 апреля. Этот же факт был упомянут выше при описании данных радара CUTLASS. А именно, начиная примерно с 19:00 UT 11 апреля радаром было зафиксировано постепенное образование ионосферных неоднородностей, пример которых можно видеть на рис. 5 (сеанс 1). Рисунок 6б также показывает, что энергия высыпаний повышена в 05:54 UT 12 апреля, т. е. приблизительно через 3 ч после окончания взрывной фазы суббури. Этот пик соответствует картине ионосферных неоднородностей, представленных

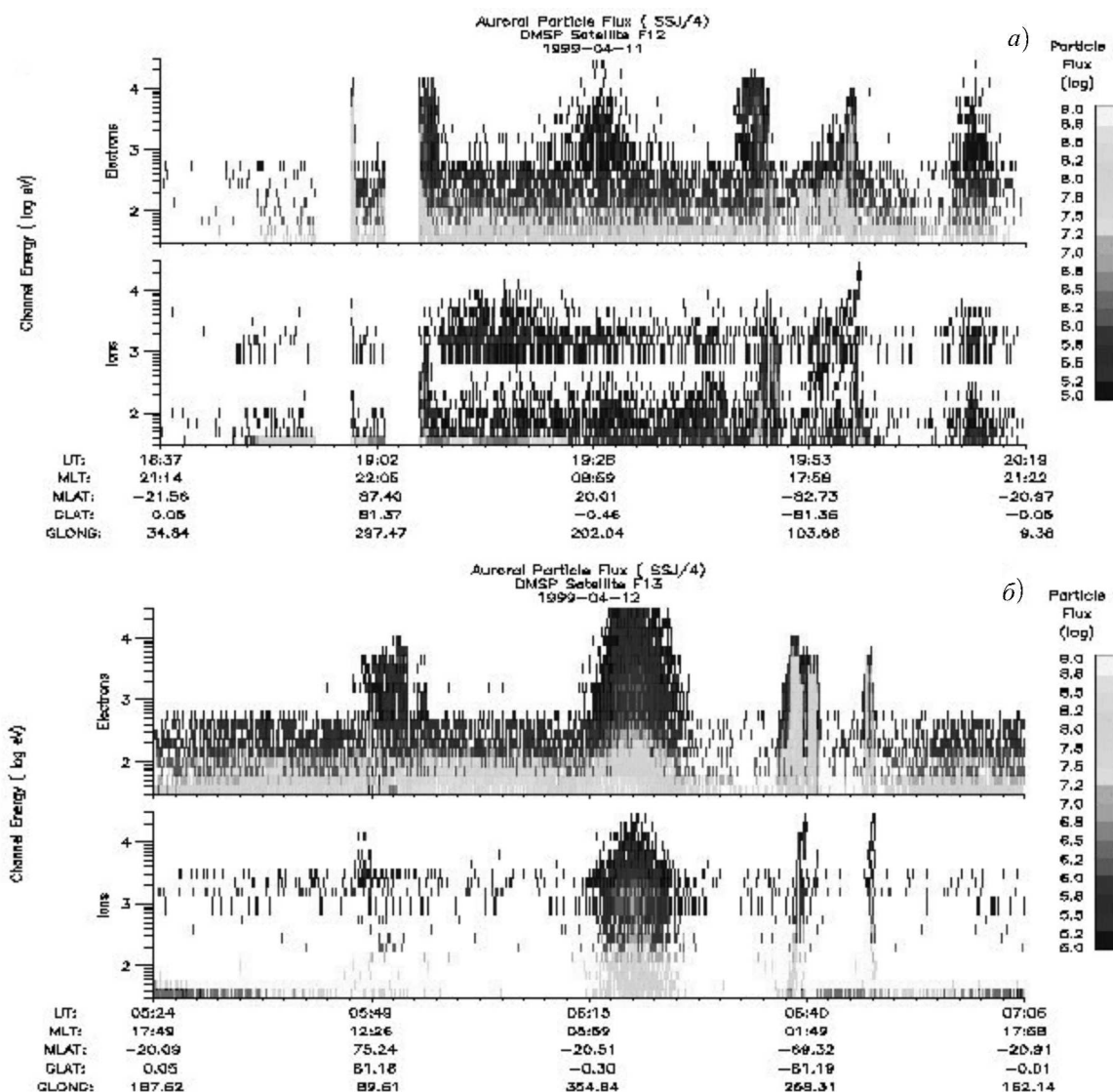


Рис. 6. Картина высыпаний авроральных частиц по данным спутника DMSP за 11 апреля (а) и 12 апреля (б) 1999 года [12]. По оси ординат отложена энергия высыпающихся электронов и ионов, справа приведена шкала интенсивностей потоков этих частиц

на рис. 5, сеанс 3. В спокойных условиях 12–13 апреля подобных пиков по данным шести пролётов спутника DMSP приблизительно в те же часы, что и для возмущённых условий 11–12 апреля, обнаружено не было. Другие указанные выше ионосферные параметры — V_x , V_y , V_z , N_i , относительные концентрации H^+ , He^+ , O^+ , T_i и T_e — в возмущённых условиях незначительно изменяются, не проявляя определённых закономерностей, в спокойных условиях практически постоянны.

Данные спутника POES позволили установить приблизительный нижний масштаб областей высыпаний частиц, которые встречались на пути летящего спутника. Так, для пролёта 12.04.1999 в 06:25 UT, когда спутник пересекал геомагнитную широту 75° , выполненные им измерения энергии высыпающихся электронов и протонов показали, что энергия электронов меняется в пределах от 8 кэВ (максимум) до 0,8 кэВ (минимум) со средним периодом порядка 30 с. Такая же картина наблюдается и для протонов, но диапазон энергий здесь другой — от 3,7 до 1,2 кэВ.

Простой расчёт показывает, что, если скорость спутника составляет около 6 км/с, то размер областей с повышенной энергией высыпаний составляет приблизительно 200 км. Предполагая, что эти высыпания создадут неоднородности ионосферы повышенной плотности, размер подобной неоднородности будет составлять в среднем 200 км. Эта оценка совпадает с оценками размеров неоднородностей по данным спутника DMSF в работе [13], согласно которой для спокойных условий указанный размер составляет от 250 км и выше. В нашем случае рассмотрены возмущённые условия, когда можно предполагать, что мелкомасштабные ионосферные неоднородности мельче.

2.3. Результаты моделирования лучевых траекторий

Численное моделирование условий распространения коротких волн было выполнено для радиотрассы Санкт-Петербург—Лонгьербьен (Шпицберген) с протяжённостью 2150 км. Она ориентирована в меридиональном направлении и перпендикулярна по отношению к авроральному овалу. Средняя точка трассы имеет координаты 68° с. ш., 24° в. д., наиболее близко расположенными к ней являются станции вертикального зондирования ионосферы в Кируне ($67,84^\circ$ с. ш., $20,42^\circ$ в. д.) и Соданкюли ($67,37^\circ$ с. ш., $26,63^\circ$ в. д.). Далее за среднюю точку трассы, или область отражения, принималась область, расположенная над ионосферной станцией Соданкюля. Данные вертикального зондирования этой станции были непосредственно использованы в расчётах. Основная задача моделирования лучевых траекторий состояла в том, чтобы на основе экспериментальных данных об ионосфере (вертикальное зондирование, данные радара CUTLASS) воспроизвести синтезированные ионограммы наклонного зондирования ионосферы регулярными механизмами во время суббури и показать их отличия от ионограмм, рассчитанных для условий без суббурь. Моделирование выполнено по модели коротковолнового радиоканала [14] для геофизических условий 11–12 апреля 1999 года. Эта модель разработана для анизотропной и неоднородной среды. Входными параметрами модели являются: уровень солнечной активности, характеризуемой числом Вольфа W ; уровень магнитной активности, представленной трёхчасовым индексом K_p ; время суток t ; день года; географические координаты передатчика ($60,0^\circ$ с. ш., $29,5^\circ$ в. д.) и приёмника ($78,2^\circ$ с. ш., $15,82^\circ$ в. д.) трассы наклонного зондирования ионосферы. За основу описания пространственно-временных изменений среды распространения была взята глобальная модель ионосферы, построенная на основе объединения известных моделей отдельных ионосферных слоёв (E , F_1 , F_2) и межслоевых долин (долгосрочный прогноз параметров слоя F_2 [15, 16], международная модель IRI [17]). Входным параметром данной модели ионосферы является предложенный в работе [18] эффективный аналог числа Вольфа W_3 . Он учитывает влияние на распределение электронной концентрации $N(h)$ вдоль трассы не только солнечной активности, но и магнитной активности, заданной планетарным индексом K_p . Моделирование ионограмм наклонного зондирования проводилось в приближении двухмасштабного разложения в рамках метода геометрической оптики, учитывающего плавные горизонтальные неоднородности ионосферы. На конкретном шаге интегрирования параметры ионосферы принимались постоянными. Высотный профиль электронной концентрации $N_e(h)$ в разработанном алгоритме представлен набором отрезков квазипарабол с непрерывными значениями как самих функций $N_e(h)$, так и её первых производных $dN_e(h)/dh$ в местах соединения. Введённая квазипараболическая аппроксимация профиля $N_e(h)$ допускает точное интегрирование уравнения эйконала. Следует отметить, что обычно при моделировании коротковолновых радиоканалов, пересекающих авроральную или субавроральную ионосферу в периоды возмущений, необходимо проводить коррекцию используемой модели ионосферы. Большинство моделей ионосферы не способны отразить происходящие в ней быстрые процессы, поэтому необходимо привлекать информацию о текущем состоянии ионосферы вдоль трассы распространения. С этой целью были

использованы данные радара CUTLASS, станций вертикального зондирования в Кируне, Соданкюли и Лонгьербьене. Анализ данных радара CUTLASS (рис. 4) показал, что мелкомасштабные магнито-ориентированные неоднородности располагались в спокойных условиях севернее 69° с. ш., а в период суббури они переместились к северу, выше 71° с. ш. В данной работе в численной модели радиоканала в качестве механизма отражения сигнала рассматривалось только регулярное отражение от ионосферы. Анализ данных станций вертикального зондирования в Кируне, Соданкюли и Лонгьербьене привёл к необходимости коррекции параметров используемой модели ионосферы даже для средних условий. В первую очередь это касается значений полутолщины слоя F_2 авроральной ионосферы, вариации которого исследованы в работе [19] при траекторном моделировании на трассе Санкт-Петербург—Баренцбург. Уровень солнечной активности в период эксперимента был невысоким: числа Вольфа 11–12 апреля 1999 года соответствовали $W = 85, 83$, среднемесячное значение $W = 65$. Для моделирования были выбраны моменты времени 00; 02 и 08 UT. В апреле ионосфера выше 70 км над трассой Санкт-Петербург—Лонгьербьен круглосуточно освещена Солнцем, поэтому в ночные и утренние часы магнитоспокойных периодов она характеризуется равномерным распределением параметров вдоль трассы.

В ходе моделирования проводилось построение расчётных ионограмм наклонного зондирования ионосферы в различных условиях и их сравнение. Всего было построено 5 синтезированных ионограмм. Первые три рассчитаны для ночного времени, две другие — для утреннего. Первая из трёх ионограмм получена для средних условий, которые, как оказалось, одинаковы для двух моментов времени 00:00 и 02:00 UT. Указанные моменты выбраны не случайно, они в соответствии с вышеизложенным являются моментами начала и конца взрывной фазы суббури. Вторая ионограмма построена по данным вертикального зондирования в Соданкюли в момент времени начала суббури (00:00 UT). Третья ионограмма аналогична второй, но соответствует концу суббури, моменту времени 02:00 UT. Что касается ионограмм перед суббурей и после неё, то здесь ситуация следующая. Исходя из рис. 2 и 3, перед суббурей примерно за $5\div 6$ часов до T_0 имеет место подъём значений критической частоты слоя F_2 . Аналогичный подъём существует и после суббури. Чтобы не перегружать анализ, здесь мы провели расчёты только для послебуревоего времени. Поэтому четвёртая ионограмма соответствует средним условиям в 08:00 UT, а пятая ионограмма построена по данным станции в Соданкюли в тот же момент времени 08:00 UT. Расчётные синтезированные ионограммы наклонного зондирования для средних условий и во время суббури 11–12 апреля 1999 года представлены на рис. 7.

На рис. 7а приведён результат моделирования ионограммы наклонного зондирования для средних ионосферных условий на исследуемой трассе для 12 апреля 1999 года, $t=00\div 02$ UT. В качестве входных параметров модели радиоканала были приняты: $W_3 = 80$, $K_p = 1$. Параметры ионосферы для средней точки были следующие: $f_{0F_2} = 3,4$ МГц, $H_{mF_2} = 305$ км, $y_{mF_2} = 100$ км и $f_{0E_s} = 1,7$ МГц. Можно видеть, что для средних условий в ночное время распространение коротких волн осуществлялось регулярными механизмами с отражением от ионосферных слоёв E_s и F_2 . Максимальная наблюдаемая частота 8,5 МГц формируется модой $1F_2$. Углы прихода радиосигналов для моды $1E_s$ меньше 5° , а для моды $1F_2$ диапазон углов прихода составил $10^\circ\div 15^\circ$.

В момент начала суббури 00 UT 12 апреля 1999 года в районе расположения средней точки трассы наблюдались следующие изменения параметров ионосферы по сравнению со средними условиями: увеличение критической частоты f_{0F_2} на 0,2 МГц; возрастание высоты максимума слоя F_2 H_{mF_2} на 50 км и уменьшение полутолщины слоя y_{mF_2} на 30 км. Критическая частота слоя E_s f_{0E_s} снизилась на 0,1 МГц. В результате моделирования ионограммы наклонного зондирования для указанных условий (рис. 7б) были получены следующие моды распространения коротких радиоволн: $1E_s$, $2E_s$, $1F_2$ и $2F_2$. В отличие от средних условий здесь максимальная наблюдаемая частота, равная 8,7 МГц, формировалась модой $1E_s$. Максимальная частота моды $1F_2$

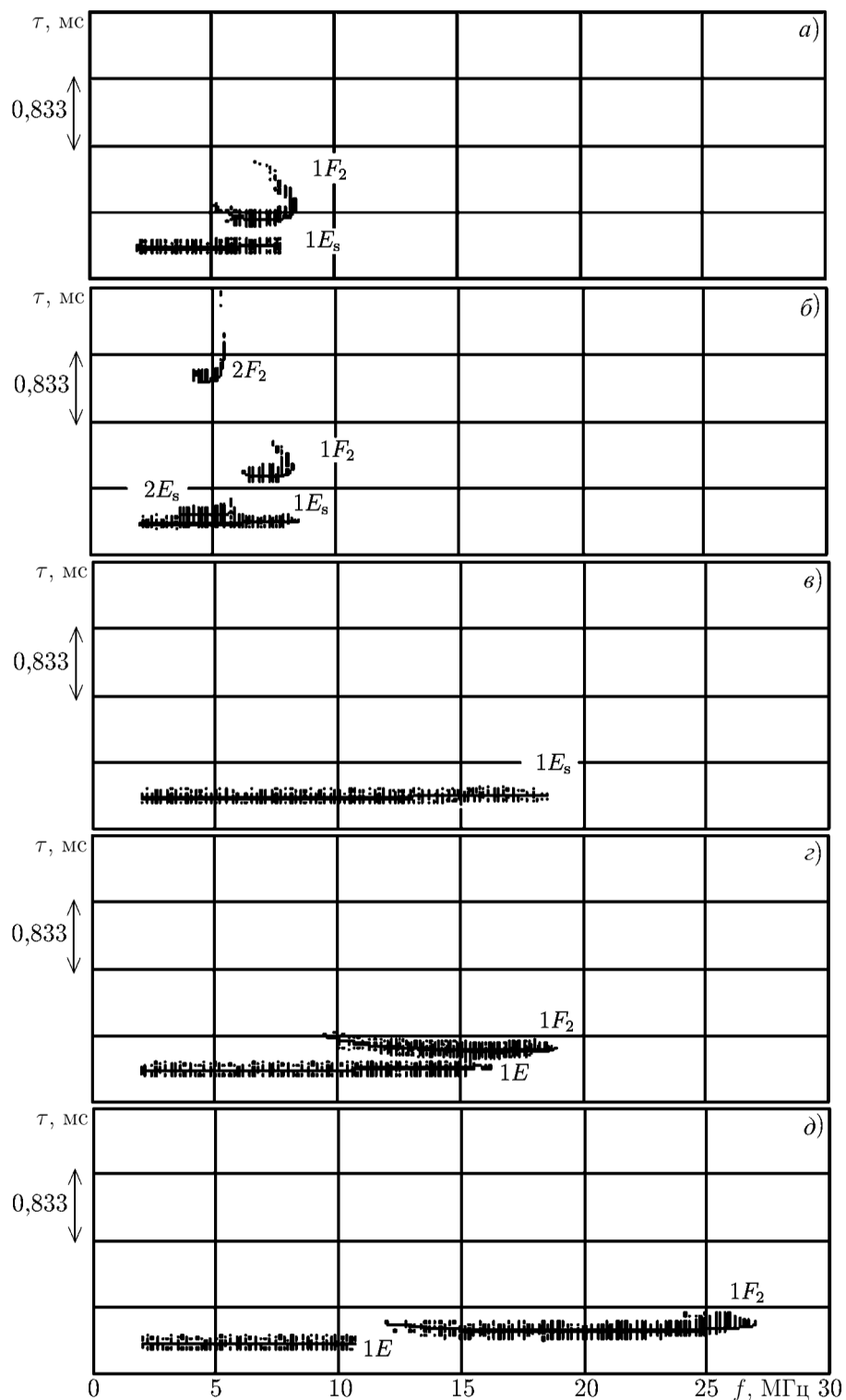


Рис. 7. Синтезированные ионограммы наклонного зондирования ионосферы за период суббури 12 апреля 1999 года: (а) $t = 00 \div 02$ UT, средние условия; (б) $t = 00$ UT, начало активной фазы суббури, момент T_0 ; (в) $t = 02$ UT, конец активной фазы суббури, момент T_e ; (г) $t = 08$ UT, средние условия; (д) $t = 08$ UT, реальные условия после суббури. По оси ординат отложена задержка по времени, по оси абсцисс — частота зондирования

уменьшилась примерно на 0,1 МГц, несмотря на увеличение критической частоты f_{0F_2} в средней точке. Это произошло по причине того, что для трассы с протяжённостью более 2000 км на формирование максимальной наблюдаемой частоты большое влияние оказывает как увеличение высоты слоя F_2 , так и подъём его нижней границы ($H_{mF_2} - y_{mF_2}$) на $70 \div 80$ км [18]. Значения углов прихода радиосигналов для моды $1E_s$ сохранили свои значения (меньше 5°), в то время как для моды $1F_2$ диапазон углов прихода стал выше и составил $15^\circ \div 19^\circ$.

В отличие от средних условий на рис. 7а, численное моделирование ионограммы наклонного зондирования для момента времени окончания суббури $t = 02$ UT 12 апреля 1999 года (рис. 7б) проведено при условии, что в ионосфере наблюдался только слой E_s с критической частотой $f_{0E_s} = 3,2$ МГц. Распространение радиоволн осуществлялось модой $1E_s$ с максимальной наблюдаемой частотой, равной 18,1 МГц.

Расчётная ионограмма наклонного зондирования для несколько иных медианных ионосферных условий, чем на рис. 7а, а именно для 12 апреля 1999 года, но момента $t = 08$ UT, показана на рис. 7г. С учётом освещённости трассы, параметры ионосферы для средней точки были следующие: $f_{0F_2} = 5,7$ МГц, $H_{mF_2} = 220$ км, $y_{mF_2} = 30$ км и $f_{0E} = 3,0$ МГц. Расчётное значение максимальной наблюдаемой частоты здесь равно 18,2 МГц и реализуется модой $1F_2$. Распространение коротких волн осуществляется регулярными модами $1F_2$ и $1E$. Значения углов прихода радиосигналов для моды $1F_2$ лежат в пределах $8^\circ \div 19^\circ$.

На рис. 7д представлена ионограмма наклонного зондирования для утренних часов 12 апреля ($t = 08$ UT), после суббури. Основное отличие от средних значений параметров ионосферы средней точки трассы, рассмотренных выше (рис. 7г), здесь составило как увеличение уровня ионизации слоя F_2 ($f_{0F_2} = 8,2$ МГц), так и увеличение толщины слоя ($y_{mF_2} = 60$ км). Такое изменение привело к увеличению максимальной наблюдаемой частоты до 27 МГц (мода $1F_2$) вместо 18,2 МГц и снижению максимальной частоты регулярного односкачкового отражения сигнала от слоя E (рис. 7д). Диапазон углов прихода радиосигналов для моды $1F_2$ стал более узким и составил $8^\circ \div 12^\circ$.

Таким образом, в результате численного моделирования ионограмм наклонного зондирования получено, что в момент начала суббури $t = 00$ UT 12 апреля 1999 года, на трассе существуют как F_2 -отражения, так и E_s -отражения с почти одинаковыми максимальными наблюдаемыми частотами. Во время окончания суббури, при $t = 02$ UT, имеют место только E_s -отражения с очень высокими значениями максимальных применимых частот. Диапазон углов прихода волн под влиянием суббури здесь составил $15^\circ \div 19^\circ$ вместо $10^\circ \div 15^\circ$ в спокойных условиях. В утренние часы после суббури, при $t = 08$ UT, за счёт увеличения ионизации ионосферного слоя F_2 значительно возрастает максимальная наблюдаемая частота на трассе вплоть до 27 МГц вместо 18,2 МГц для спокойных условий. Диапазон углов прихода радиоволн моды $1F_2$ при этом становится более узким и составляет $8^\circ \div 12^\circ$.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое выше исследование характеризуется комплексным использованием нескольких современных инструментов и методов анализа: ионозондов, спутников, радара CUTLASS, метода моделирования лучевых траекторий. Выбранная для рассмотрения суббури 11–12 апреля 1999 года имеет особенность — её протекание происходит на фоне окончания магнитной бури средней интенсивности, имевшей место 10 апреля. Получены следующие результаты.

1) Найдены обобщённые закономерности поведения ионосферных параметров (критических частот и высот слоёв) как для слоя F , так и для спорадического слоя E_s во время магнитосферной суббури. Эти закономерности построены методом наложения эпох по более чем 70 суббурям,

имевшим место зимой и в равноденствие 1993–1999 годов. Указанные закономерности получены по данным ионозондов Европы, Центральной Сибири и Северной Америки. Для суббури 11–12 апреля 1999 года вариации параметров ионосферы по данным цепочки из 5 ионозондов Европы совпадают с обобщёнными закономерностями на качественном уровне. Через 4÷6 часов после окончания суббури 11–12 апреля обнаружен рост критической частоты f_{0F_2} на всех 5 ионозондах на 40 % и более. Этот рост, наиболее вероятно, обусловлен наложением главного эффекта в ионосфере за счёт суббури и эффекта роста Δf_{0F_2} на фазе восстановления бури, имевшей место 10 апреля.

2) Из данных радара CUTLASS следует, что картина рассеяния от неоднородностей ионосферы существенно изменяется за период суббури по сравнению со спокойным периодом. Интенсивное рассеяние перед суббурей начинается примерно за 5 часов до начала взрывной фазы суббури и связано с перестройкой ионосферы за счёт магнитосферных процессов. Во время взрывной фазы суббури число рассеивающих центров в области охвата диаграммой направленности радара резко уменьшается по сравнению с этим числом перед взрывной фазой и после неё. Уменьшение рассеяния свидетельствует об уменьшении степени ионизации в верхней ионосфере. Данные радара в основном подтверждают физическую картину вариаций параметров ионосферы, представленную на обобщённых графиках.

3) Данные спутников показали рост интенсивности высыпаний «мягких» частиц в области северной Скандинавии перед суббурей и после неё. В указанное время и в данном месте характер высыпаний частиц и характер образования ионосферных неоднородностей по данным радара в основном совпадают. Выполненные оценки размеров мелкомасштабных неоднородностей приблизительно совпадают с оценками, приведёнными в литературе.

4) Расчёты распространения коротких волн на радиотрассе Санкт-Петербург—Лонгьербьен в виде синтезированных ионограмм наклонного зондирования ионосферы продемонстрировали существенную смену механизмов распространения во время суббури и заметное изменение углов прихода волн перед суббурей и после неё. Если с началом суббури происходят изменения в распространении, связанные с интенсификацией спорадических E_s -отражений, то последние полностью преобладают в момент её окончания. Углы прихода волн за период суббури заметно возрастают.

Авторы данной работы выражают благодарность службам радара CUTLASS, спутников DMSP и POES, а также персоналу ионосферных станций в Соданкюли, Кируне, Лонгьербьене, Люкसे, Уппсале и Варшаве за возможность использования их данных в текущих исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Buonsanto M. J. // Space Sci. Rev. 1999. V. 88. P. 563.
2. Gonzales W. D., Joselyn J. A., Kamide Y., et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 5771.
3. Благовещенский Д. В., Борисова Т. Д., Егорова Л. В. // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36, № 4. С. 125.
4. Blagoveshchensky D. V., Maltseva O. A., Rodger A. S. // Ann. Geophys. 2003. V. 21. C. 1141.
5. Blagoveshchensky D. V., Lester M., Kornienko V. A., et al. // Ann. Geophys. 2005. V. 23, No. 5, P. 1697.
6. Blagoveshchensky D. V., MacDougall J. W., Piatkova A. V. // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68. P. 821.

7. Blagoveshchensky D.V., Kalishin A.S., Sergeyeva M.A. // *Ann. Geophys.* 2008. V.26, No. 4. P. 1479.
8. <http://nssdc.gsdc.nasa.gov>.
9. Greenwald R.A., Baker K.B., Dudley J.R., et al. // *Space Sci. Rev.* 1995. V.71. P. 761.
10. Lester M., Chapman P.J., Cowley S.W.H., et al. // *Ann. Geophys.* 2004. V.22. P. 459.
11. Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.А. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов. М.: Наука, 1987. 272 с.
12. [gttp://spdr.ngdc.noaa.gov/spidr](http://spdr.ngdc.noaa.gov/spidr).
13. Хегай В.В., Мин К.В., Ким Х.Дж. и др. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. Т. 46, № 5. С. 643.
14. Борисова Т.Д., Баранец А.Н., Черкашин Ю.Н. // *Распространение радиоволн в ионосфере*. М.: Наука, 1986. С. 12.
15. Ануфриева Т.А., Шапиро Б.С. Геометрические параметры слоя F_2 ионосферы. М.: Наука, 1976. 91 с.
16. Чернышев Д.В., Васильева Т.Н. Прогноз максимальных критических частот; $W = 10, 50, 150, 200$. М.: Наука, 1975. 54 с.
17. Rawer K., Ramakrishnan S., Bilitza D. *International Reference Ionosphere*. Brussel: URSI, COSPAR, 1978. 78 p.
18. Благовещенский Д.В., Борисова Т.Д. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 1989. Т. 29, № 4. С. 696.
19. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kornienko V.A., et al. // *J. Atm. Terr. Phys.* 2009. V.71. P. 11.
20. Благовещенский Д.В., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Черкашин Ю.Н. Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1989. Вып. 88. С. 174.

Поступила в редакцию 17 февраля 2010 г.; принята в печать 24 марта 2010 г.

EFFECTS IN THE IONOSPHERE AND HF RADIO-WAVE PROPAGATION DURING AN INTENSE SUBSTORM

D. V. Blagoveshchensky, T. D. Borisova, D. D. Rogov

We present the results of combined radiophysical studies during the period of an intense magnetospheric substorm which occurred from 00:00 to 02:00 UT in April 12, 1999. Measurements of the ionospheric parameters by a chain of European ionosondes for this period were compared with the variations in ionospheric parameters averaged over more than 70 substorms. The latter variations were obtained by data from the ionosondes of Europe, Central Siberia, and North America in 1993–1999. Data from the CUTLASS radar as well as the DMSP and POES satellites were used for the analysis of the April 11–12 substorm. Numerical calculations of HF radio-wave propagation on the St. Petersburg–Longyearbyen (Svalbard) high-latitude path were carried out by the ray tracing technique. Two simultaneous effects have been revealed in the ionosphere. One occurs immediately during the substorm and another is associated with the end of the magnetic storm in April 10, 1999. According to the CUTLASS radar data, the number of backscattering irregularities in the ionospheric F layer notably decreased during the substorm expansion phase. Satellite data showed an increase in the “soft” (hundreds of eV) particle precipitation before and after the substorm. Numerical calculations of HF radio-wave propagation on the St. Petersburg–Longyearbyen path have demonstrated an essential change of propagation mechanisms during the substorm and a tangible change in the wave arrival angles before and after the substorm.

Д. В. Благовещенский, Т. Д. Борисова, Д. Д. Рогов