

УДК 551.510. 535:550.338

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ, СТИМУЛИРОВАННЫЕ ЧЕЛЯБИНСКИМ МЕТЕОРИТОМ

© 2013 г. Г. В. Гивишвили¹, Л. Н. Лешенко¹, В. В. Алпатов², С. А. Григорьева³, С. В. Журавлев²,
В. Д. Кузнецов¹, О. А. Кусонский³, В. Б. Лапшин², М. В. Рыбаков⁴

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН)

²Федеральное государственное бюджетное учреждение “Институт прикладной геофизики
им. академика Е.К. Федорова” (ФГБУ “ИПГ”)

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича
Уральского отделения РАН, филиал “Геофизическая лаборатория-обсерватория “Аркти”

⁴Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН (ИЗМИРАН СПбФ)

Поступила в редакцию 01.04.2013 г.

Впервые получены данные, позволяющие прийти к заключению о высокой степени вероятности того, что крупные метеориты, подобные Челябинскому, попадая в земную атмосферу, способны вызывать возмущения во всей толще ионосферы, а не только на высотах спорадического слоя Es, как считалось ранее.

DOI: 10.7868/S0320930X13040154

ВВЕДЕНИЕ

Принято считать, что воздействие метеорных потоков на ионосферную плазму проявляется, как правило, в виде интенсивного развития спорадических слоев Es в области их вторжения в верхнюю атмосферу (Ловелл, 1950; Appleton, Naismith, 1947), следовательно, оно ограничивается высотами 90–120 км. Цель нижеследующего анализа состоит в том, чтобы на примере Челябинского метеорита показать, что в данном случае его влияние, по всей видимости, стимулировало аномальные возмущения ионосферной плазмы вплоть до высот слоя F2, то есть до примерно 250 км.

АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Челябинский метеорит 15.02.2013 г. был замечен на высоте 92 км в координатах 54.5° с.ш., 64.3° в.д. и взорвался в 03.20 UT на высоте 23 км в координатах 54.8° с.ш., 61.1° в.д. (далее все времена указаны в UT). Следовательно, в страто-мезосфере он двигался почти вдоль параллели с востока на запад с небольшим отклонением к северу. К анализу реакции ионосферы на вторжение метеорита привлекались данные вертикального зондирования (ВЗ) в Свердловске (56.8° с.ш., 60.6° в.д.), Москве (55.5° с.ш., 37.3° в.д.), Санкт-Петербурге (60° с.ш., 30.7° в.д.) и Ростове-на-Дону (47.2° с.ш., 39.6° в.д.). Регистрация ионосферных характеристик на этих станциях проводилась с помощью цифровых ионозондов “Парус” (Свердловск),

“Парус-А” (Москва и Ростов-на-Дону) и ионозонда CADI (Санкт-Петербург). Расстояние от них до места взрыва составляло ~200, ~1400, ~1700 и ~1900 км соответственно.

Гелиогеофизический фон в дни, предшествовавшие и совпавшие с падением метеорита, был невозмущен. Индекс солнечной активности $F_{10.7}$ не превышал 105 ед., число солнечных пятен R_z – 38 ед., планетарный индекс K_p – 4 ед. Ионосфера 14 февраля была спокойна. Флуктуации критической частоты (f_oF_2) и действующей высоты ($h'F_2$) слоя F2 не выходили за пределы $\pm 15\%$. (Регулярный мониторинг ионосферы методом ВЗ производится сеансами 4 раза в час. Поэтому ряды представленных далее результатов дискретны с 15 мин интервалом.)

Возмущения в ионосфере возникли 15 февраля и затронули практически всю область ионосферы от 100 до 250 км (слой F2). Самая быстрая реакция на вторжение болида проявилась спустя примерно час в Свердловске в виде развития плотного спорадического слоя Es, который полностью экранировал регулярный слой E. Этот Es затем наблюдался в течение 7 часов. В Москве и Ростове-на-Дону (далее: Ростов) он возник с опозданием на 4.5 и 6 часов соответственно. (Ввиду специфики ионозонда CADI отражения от Es в Санкт-Петербурге зарегистрированы не были.)

Результаты регистрации суточного хода критической частоты f_oF_2 за 15.02.2013 г., а также ее медианные (за февраль 2013 г.) значения на ука-

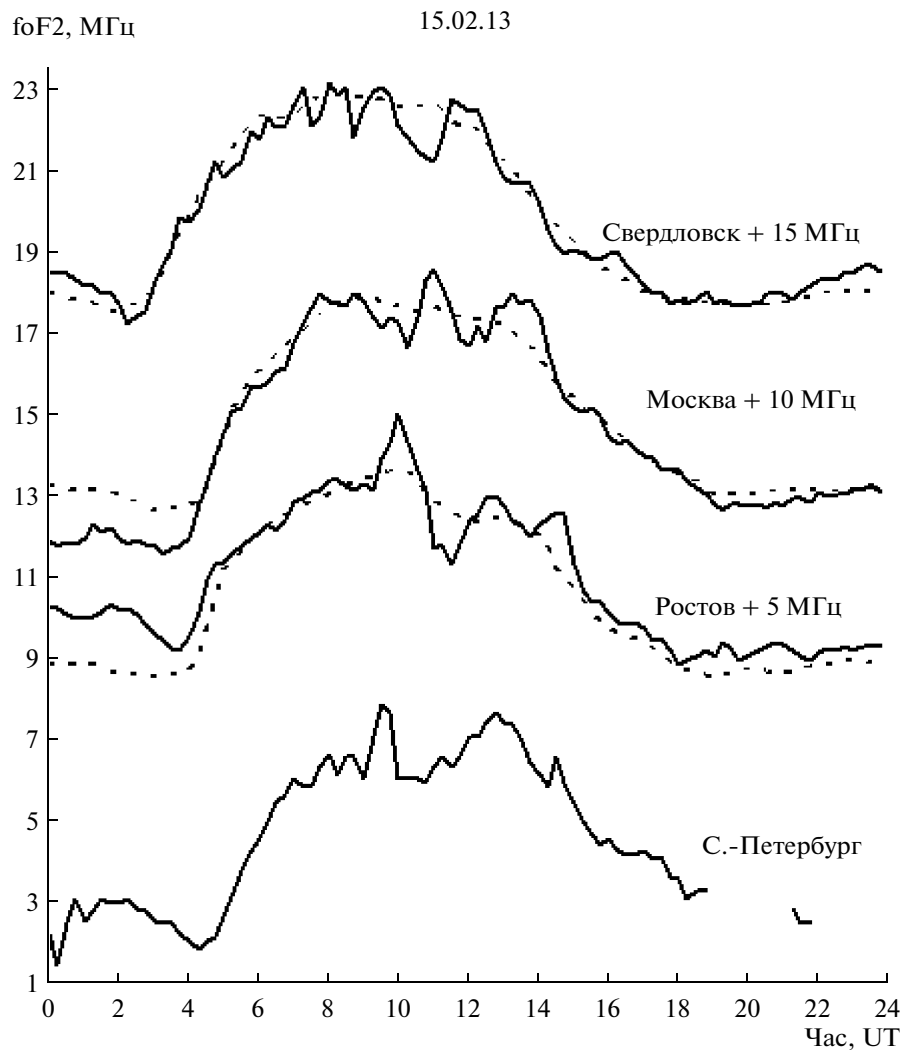


Рис. 1. Суточный ход критической частоты слоя F2 (foF2) за 15.02.2013 на указанных станциях мониторинга ионосферы — сплошные линии, медианные месячные значения foF2 за февраль того же года — точечные кривые.

занных станциях, представлены на рис. 1. (Обработка данных в Санкт-Петербурге проводится вручную, поэтому определение медианных значений foF2 здесь еще не завершено.) Из него можно видеть, что характер и длительность возмущения этого параметра на всех указанных станциях был сходен. Он проявился в том, что в течение ~3.5 часов вблизи местного полудня на монотонный суточный ход foF2, регулируемый вариациями зенитного угла Солнца χ , наложилось синусоидальное колебание с амплитудой от 1.2 до 3.9 МГц. Значение foF2 при этом всюду сначала резко возросло до пикового уровня, затем последовал глубокий провал, который завершился возвращением к исходной частоте.

Этот общий для всех станций период, характеризующийся аperiодическим характером аномального возмущения foF2, определим как “главную фазу” реакции слоя F2 ионосферы на взрыв

болида. Ее скачок в Свердловске проявился не столь контрастно, как на прочих станциях, поскольку был замаскирован рябью foF2, возникшей вслед за взрывом, с амплитудой колебаний, нараставшей по мере приближения к полудню.

Детальный анализ вариаций критической частоты слоя F2 в период “главной фазы” возмущения над указанными пунктами наблюдений показал следующее. За время с 08.45 до 09.30 значение foF2 в Свердловске возросло с 6.8 до 8.2 МГц, затем упало до 6.1 МГц (10.45) и далее поднялось до 7.8 МГц к 14.45. Это было эквивалентно перепадам электронной концентрации (N_e) в максимуме слоя F2 от пикового значения, равного $8.4 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, до минимального, равного $4.6 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$. Аномальный рост foF2 в Москве начался с 6.8 МГц (10.15) и к 11.00 критическая частота достигла значения 8.5 МГц, после чего она упала до 6.6 МГц (11.45), с тем чтобы к 13.15 вновь под-

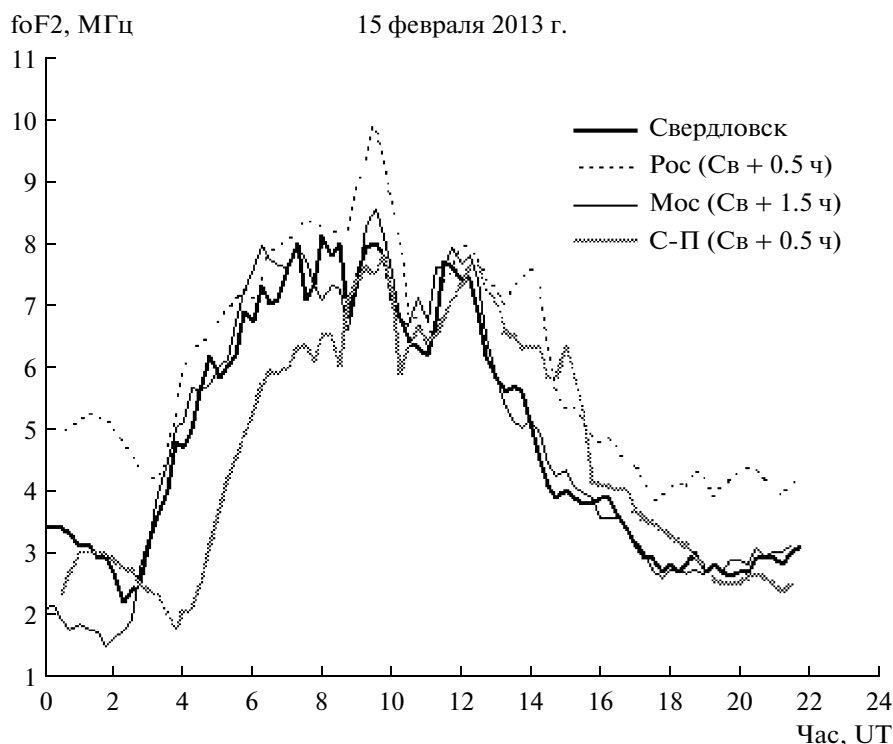


Рис. 2. Суточные вариации foF2 за 15.02.2013 на указанных станциях ВЗ ионосферы, смещенные относительно Свердловска на 0.5 часа (Ростов и Санкт-Петербург) и 1.5 часа (Москва).

няться к 7.9 МГц. Значение N_e в максимуме слоя F2 при этом варьировало от $8.9 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ до $5.4 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$. Самая большая амплитуда колебаний foF2 имела место в Ростове. Здесь мощный подъем foF2 начался с 8.1 МГц (09.15). К 10.00 критическая частота возросла до 10 МГц, затем упала до 6.1 МГц (11.30), после чего вернулась фактически к исходному значению — 7.9 МГц (12.30). Это было равнозначно перепадам электронной концентрации от 1.24×10^6 до $4.6 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$. Почти синхронно с Ростовом менялись значения foF2 в Санкт-Петербурге. Здесь резкое возрастание критической частоты началось в 09.00 с 6.2 МГц, достигло максимального значения, равного 7.9 МГц (10.15), опустилось до 6.0 МГц (10.45), а затем вновь возросло до 7.8 МГц (12.45). Соответствующий перепад электронной концентрации составил от 7.8×10^5 до $4.4 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$. Таким образом, в период “главной фазы” возмущения плотность ионосферной плазмы на высоте максимума слоя F2 в Свердловске менялась в 1.76 раз, в Москве — в 1.65, в 1.76 в Санкт-Петербурге и в Ростове — в 2.7 раз.

О том, что аномальная реакция критической частоты слоя F2 протекала на всех обсуждаемых станциях синфазно, свидетельствует рис. 2.

Однако времена начала и максимума проявления эффекта на них различались весьма своеобразным образом, принимая во внимание, что рас-

стояния между Челябинском и Свердловском, с одной стороны, и между Челябинском и Москвой, Санкт-Петербургом и Ростовом, с другой, различаются в 7, 9.5 и 8.5 раз соответственно. Было естественным ожидать, что и начальные фазы аномального возмущения foF2 в данных пунктах также должны были бы каким-то образом коррелировать с этими расстояниями. Однако в действительности пик возмущенности в foF2 в Свердловске проявился с опозданием на примерно 5.5 часов после взрыва, в Ростове и Санкт-Петербурге на ~6.0 часов, а в Москве на ~7.0 часов. Столь малая разница во временах задержки реакции foF2 при столь большой разнице в расстояниях приводит к предположению, что движение возмущения (в горизонтальной плоскости) в слое F2, вызванного вторжением метеорита, происходило существенно анизотропно. Скорость его распространения была наивысшей в направлении на Ростов и Санкт-Петербург, и наименьшей — в направлении на Свердловск.

Возмущения в действующих высотах слоя F2 (h'F2) носили хаотический характер, но проявились раньше, чем в foF2 (рис. 3).

Именно: спустя примерно 2.5 часа после взрыва в Свердловске (06.00) и 3.0–3.5 часа в Москве (06.30) и в Ростове (07.00). Однако и в этом случае временные задержки в возмущениях h'F2 между станциями, расположенными на столь различных

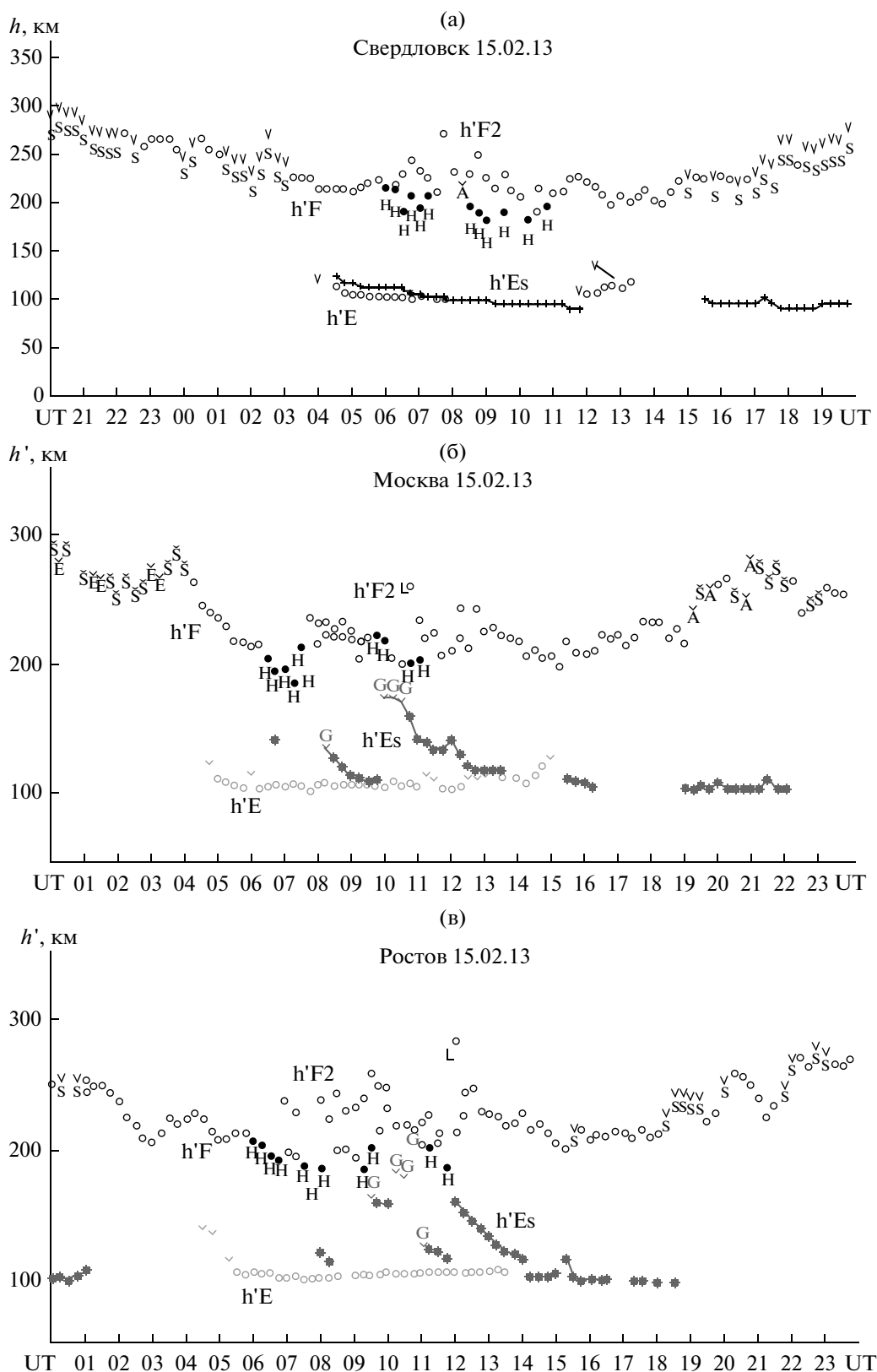


Рис. 3. Действующие высоты слоев F2, F1, E и Es.

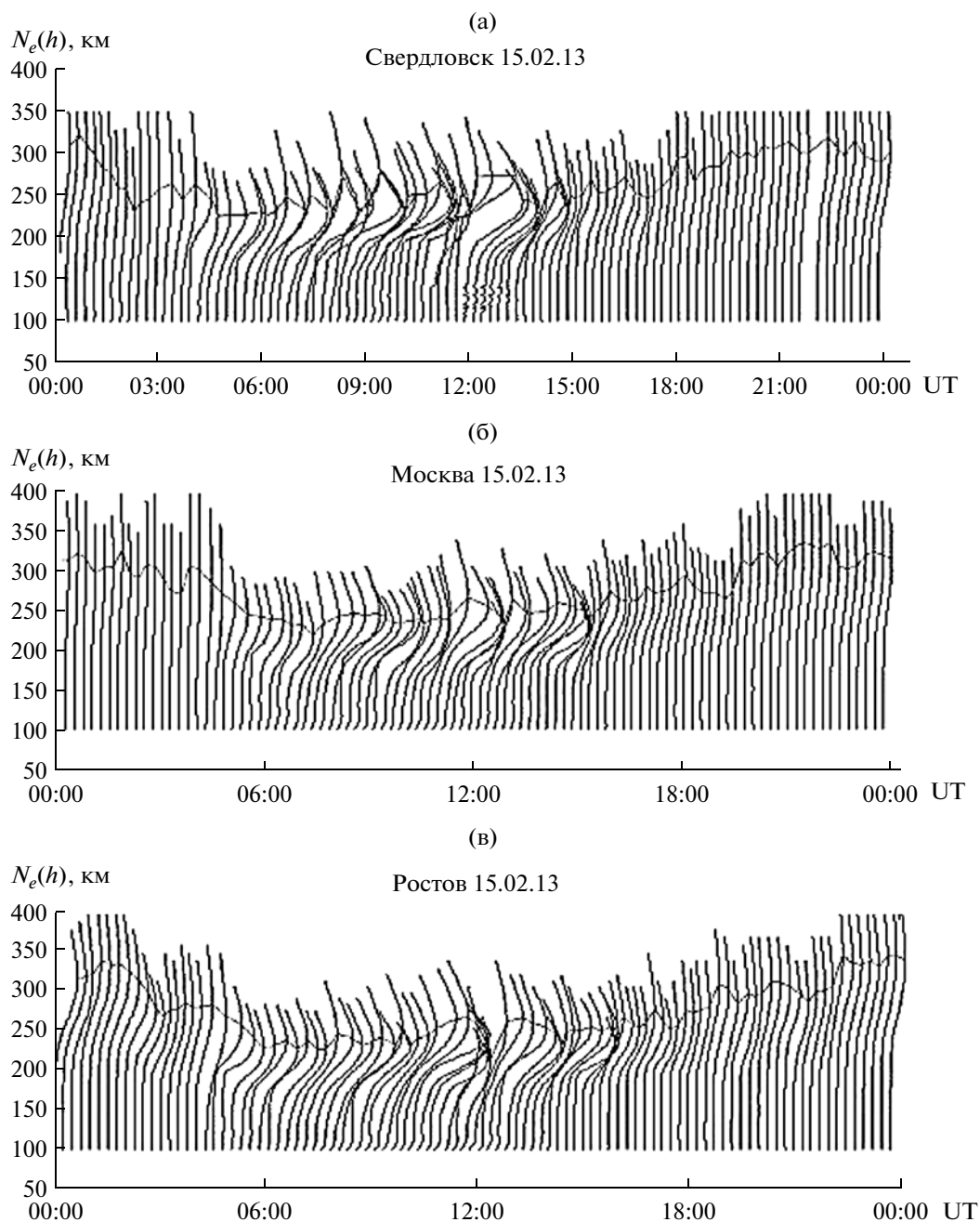


Рис. 4. Суточные вариации вертикального распределения электронной концентрации $N_e - N_e(h)$ -профили 15.02.2013 на трех станциях ВЗ.

расстояниях от места падения болида, представляются удивительно малыми. Кроме того, эффекты возмущений $h'F_2$ в Москве и в Ростове сопровождались появлением расслоений, которые затем опускались к высотам слоя E в течение 2–3 часов, тогда как в Свердловске они не наблюдались.

Рассчитанные по данным ВЗ вертикальные профили электронной концентрации — $N_e(h)$ в Свердловске, Ростове и Москве не обнаруживают

каких-либо заметных резких деформаций при изменении от часа к часу 14 и 16 февраля.

Их изменения следовали за суточным ходом зенитного угла Солнца, контролирующим скорость ионизации на указанных высотах. Однако 15 февраля этот регулярный тренд нарушался неоднократно на всех трех станциях. На рис. 4 отчетливо видно, что первая реакция ионосферы на взрыв на высотах 150–250 км проявилась на всех трех станциях в виде короткого (от 15 до 30 мин)

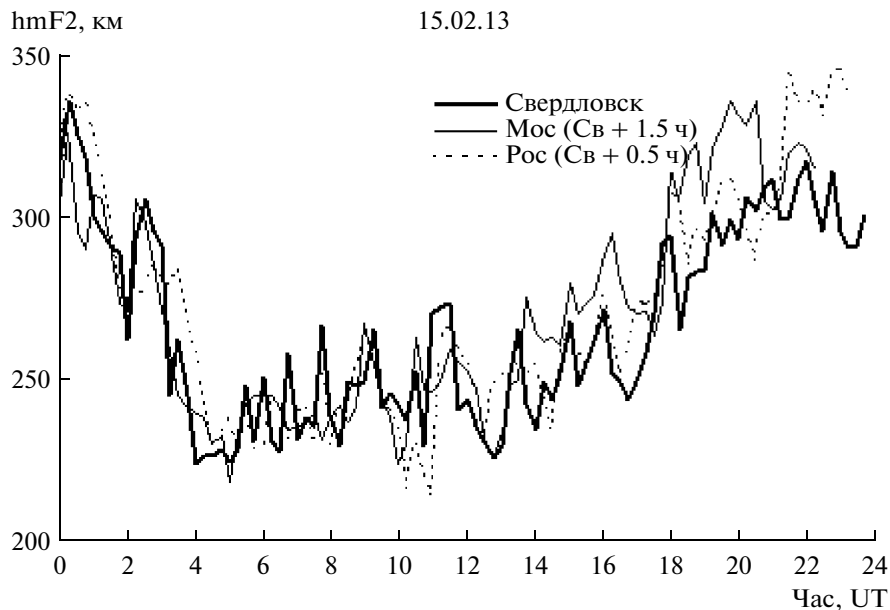


Рис. 5. Вариации высоты максимума слоя F2—hmF2. Показаны со смещением относительно Свердловска на 0.5 часа в Ростове и на 1.5 часа в Москве.

импульса возмущения на монотонном ходе $N_e(h)$ -профиля. В Свердловске он возник примерно в 03.45. Затем возмущения продолжались, постепенно усиливаясь к моменту наступления “главной фазы”, после чего произошел спад их интенсивности. Первый импульс возмущения в Москве и Ростове появился в 05.15 и 05.45 соответственно. Далее наступила пауза, продолжавшаяся до начала “главной фазы” возмущения. В целом пертурбации $N_e(h)$ -профиля в Москве продолжались до 15.30. В Ростове подобные возмущения длились до 15.45. Таким образом, общая длительность проявления эффектов, связанных с взрывом метеорита, составила: в Свердловске — 10.5 часов, в Москве — 10 часов 15 мин и в Ростове — 10 часов.

Существенные синусоидальные колебания высоты максимума слоя F2 (hmF2) во время “главной фазы” возмущения происходили почти синфазно с колебаниями foF2, но примерно с получасовым их опережением. В частности, рост hmF2, начавшийся в Свердловске с 230 км (08.15), к 09.15 достиг уровня 258 км, затем понизился до тех же 230 км, после чего поднялся до высоты 265 км. Колебания hmF2 в этом временном интервале составили 43 км в Москве (с запаздыванием на 1.5 часа относительно Свердловска) и 52 км в Ростове (с запаздыванием на 0.5 часа) (см. рис. 5).

Возможную разгадку того, почему начало “главной фазы” возмущения проявилось в Санкт-Петербурге и Ростове всего лишь с получасовым, а в Москве — с полуторачасовым сдвигом относительно Свердловска, дают результаты то-

мографического мониторинга ионосферы. Данные за 14.02.2013 г. в регионе, охватывающем 40° – 72° с.ш. и 36° – 47° в.д., и временном интервале 04.23–07.10 свидетельствуют о том, что в этот день никаких заметных возмущений электронной концентрации — изолиний равных значений N_e на высотах максимума слоя F2 — не наблюдалось. Однако 15 февраля (06.39 — 07.10) на фоне относительно плавного хода изолиний N_e , связанных с их широтными вариациями, в диапазоне широт 51° – 57° с.ш. они претерпевали заметные модуляции с длиной волны, примерно равной 1.2° по широте (рис. 6).

На правых рисунках представлены траектории пролета спутника и пункты приема данных томографических измерений. Так как 15 февраля регулярный ход изолиний N_e нарушался в ограниченное время в ограниченном широтно-долготном диапазоне, можно думать, что возмущение в ионосфере, связанное с вторжением болида, распространялось в виде двух типов волн — быстрых и медленных, сменявших одна другую. Быстрые волны имели вид узких, постепенно расширяющихся к западу пучков в телесном угле, составлявшем 30° – 35° . Направление их перемещения как бы продолжало траекторию движения болида рикошетом до момента его взрыва. Возмущения в данном случае выразились в виде относительно слабых нарушений регулярного хода h'F2 и изолиний N_e . Скорость распространения быстрых волн не превышала ~ 400 км/час в направлении от Челябинска до Свердловска, достигала ~ 700 км/час по

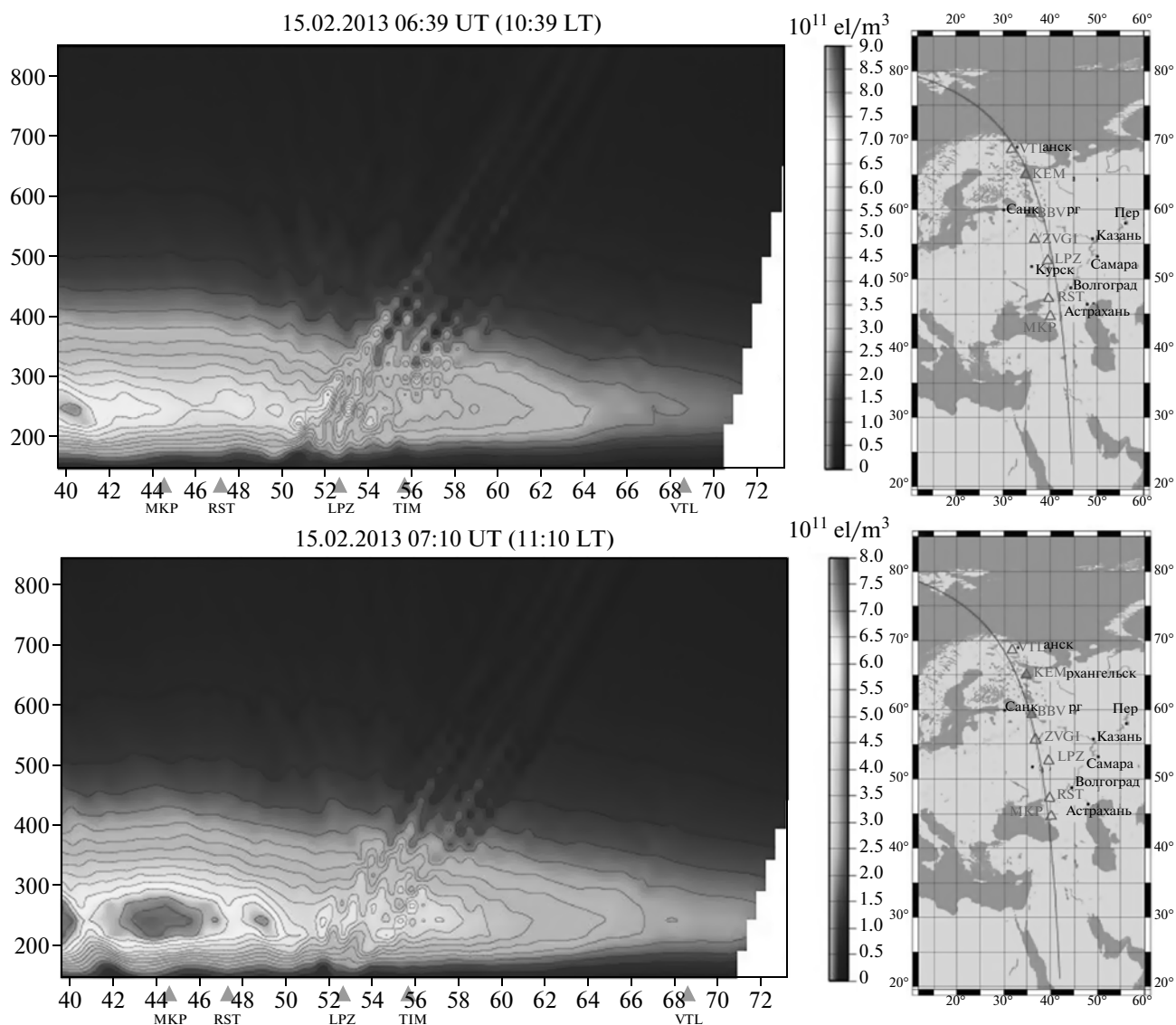


Рис. 6. На левых рисунках показаны изолинии электронной концентрации N_e в широтно-долготном диапазоне, близком к Москве и Ростову.

трассе Челябинск–Москва и ~680 км/час по трассе Челябинск–Ростов.

Ко времени наступления “главной фазы” возмущения, которая проявилась в виде сильных отклонений foF2 и hmF2 от медианных, единый поток распался на два еще более узких пучка, один из которых прошел над Санкт-Петербургом, другой — над Ростовом. При этом скорость их перемещения существенно понизилась. Она едва ли превышала ~40 км/час в направлении с юга на север (Челябинск–Свердловск), возрастала до ~220 км/час при движении почти строго вдоль параллели (Челябинск–Москва), составляла ~310 км/час в юго-западном направлении (Челябинск–Ростов) и достигала ~340 км/час при движении в северо-западном направлении.

Впрочем, не исключено, что в действительности волна возмущения была единой, но запаздывание ее проявления в параметрах foF2 и hmF2 объясняется тем, что ее прохождение над Москвой, Санкт-Петербургом и Ростовом маскировалось динамикой суточного хода этих параметров. Время прохождения спутника над данным широтным разрезом совпало с быстрым ростом foF2, составившим 1.2 МГц в Москве, 1.0 МГц в Санкт-Петербурге и 0.8 МГц в Ростове. Этот суточный тренд мог нивелировать волновую модуляцию foF2 и hmF2. Вместе с тем, вблизи местного полудня на фоне квазиравновесных условий образования и гибели свободных электронов эффект модуляции проявился значительно отчетливее.

Заметим, что данные ВЗ, полученные с помощью ионозонда DPS-4 в Норильске (69.2° с.ш., 88.1° в.д.) и Якутске (62.0° с.ш., 129.7° в.д.), не выявили каких-либо значимых эффектов, определенно связанных с обсуждаемым событием. В Норильске, расположенном на границе аврорального провала, ионосфера редко пребывает в спокойном состоянии, а частота foF2 постоянно подвержена сильным и нерегулярным возмущениям. Поэтому, несмотря на то, что Норильск отстоит от Челябинска на примерно том же расстоянии, что Москва и Ростов, трудно сказать, следствием чего явились возмущения $N_e(h)$ -профилей, имевшие место в 10:00 и 12:00 15 февраля 2013 г. Поскольку еще более интенсивные возмущения наблюдались 14, 16 и даже 15 февраля с 05:00 до 07:00.

Что касается данных Якутска, то, судя по скорости, с которой возмущение продвигалось в западном направлении, оно не могло достичь Якутска, расположенного на востоке в примерно 4000 км от места взрыва, ранее чем через 7–15 часов после взрыва, то есть ранее 10.00. В 08.00, 11.00 и даже раньше 15 февраля здесь как будто действительно происходило нечто, связанное с пролетом и взрывом метеорита. Однако не менее заметные возмущения $N_e(h)$ -профилей наблюдались примерно в те же моменты времени 14 и 16 февраля.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Нет никаких оснований связывать наблюдавшиеся 15 февраля события с возмущениями ионизирующего излучения Солнца. Поскольку в этом случае изменения N_e в максимуме слоя F2 в 1.8–2.7 раз во время “главной фазы” возмущения должны были вызываться еще большими перепадами потоков УФ- и рентгеновского излучения, что категорически исключено. Кроме того, они должны были вызывать не только синфазные, но и строго синхронные колебания foF2 и hmF2 в этот ~3.5-часовой период на всех станциях. Этого, на самом деле, не происходило.

Объяснять обсуждаемые эффекты воздействием акустико-гравитационных волн (АГВ), внутренних гравитационных волн (ВГВ), или перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), порожденных геомагнитными бурями, сильными

землетрясениями, извержениями вулканов или ядерными взрывами, также нет веских причин. Так как ничего подобного 15 февраля вблизи данного региона не происходило. По-видимому, из предполагаемых источников наблюдавшихся аномалий можно исключить и мощные циклоны или струйные течения в силу того, что времена возмущений, инициируемых ими, не превышают, как правило, одного–двух часов. Тем не менее эффекты АГВ все же, вероятно, сопровождали взрыв метеорита. На это, возможно, указывают данные томографии (см. рис. 6) и две волны ПИВ, наблюдавшихся в Москве и Ростове (рис. 3). Однако в обоих случаях они представляли собой не основное, а побочное или сопутствующее явление. Ввиду чего представляется, что аномалии в суточном ходе критической частоты и высоты максимума слоя F2 в период “главной фазы” возмущения каким-то образом были инициированы взрывом метеорита.

ВЫВОДЫ

Предварительный анализ данных мониторинга ионосферы позволяет прийти к заключению о высокой степени вероятности того, что крупные метеориты, подобные Челябинскому, попадая в земную атмосферу, способны вызывать возмущения во всей толще ионосферы, а не только на высотах спорадического слоя E_s. Причем эти возмущения могут вызывать изменения электронной концентрации (N_e) в максимуме слоя F2 до 2.7 раз за 1.0–1.5 часа и высоты максимума слоя hmF2 до 52 км, а также распространяться на расстояния по меньшей мере 2000 км и существовать в течение более 10 часов. Вместе с тем, очевидно, что для более детального и скрупулезного анализа последствий взрыва Челябинского метеорита на верхнюю атмосферу и ионосферу требуется привлечение дополнительного материала и результатов измерений других параметров околоземного космического пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ловелл Л. Метеорная ионизация и ионосферные аномалии // УФН. 1950. Т. 41. № 9.
Appleton E. V., Naismith R. The Meteoric Ionization of Es // Proc. Phys. Soc. 1947. V. 36. P. 461.