

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ЛИПЕЦКОГО МЕТЕОРОИДА

© 2020 г. Л. Ф. Черногор*

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина

**e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Поступила в редакцию 02.04.2019 г.

После доработки 18.04.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

С использованием радара вертикального доплеровского зондирования, расположенного вблизи г. Харькова (Украина), проанализированы временные вариации доплеровских спектров на частотах 3.2 и 4.2 МГц в день падения Липецкого метеороида (вблизи г. Липецка, Россия) 21 июня 2018 г. и в соседние контрольные дни. После взрыва метеороида в F -области ионосферы наблюдалось два вида эффектов. Первый из них заключался в “развале” доплеровских спектров примерно через 11 мин после взрыва и длился ~16–17 мин. Через 31–33 мин после взрыва регистрировались квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты с переменным периодом 10–20 мин и амплитудой 0.11 и 0.19 Гц для 3.2 и 4.2 МГц соответственно. Длительность этого процесса была ~120 мин. Обсуждаются физические механизмы возмущений в ионосфере, наблюдавшихся после взрыва метеороида.

DOI: 10.31857/S0016794019060051

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионосферные эффекты, сопровождавшие падение на Землю крупных (размер ~1–10 м) космических тел, мало изучены. Фактически исследователи располагают одним событием – падением Челябинского метеороида [Астрономический ..., 2013; Poroova et al., 2013a, b; Черногор, 2013; Челябинский ..., 2016; Chernogor and Rozumenko, 2013]. Метеороид вторгся в атмосферу Земли 15 февраля 2013 г. Его размер был ~18 м, начальная скорость – ~18.5 км/с, начальная кинетическая энергия – ~440 кт ТНТ.

Ионосферные эффекты Челябинского метеороида изучались рядом авторов [Гивишвили и др., 2013; Гохберг и др., 2013; Данилкин и др., 2013]. В первых двух работах сообщается, что метеороид вызвал возмущения в ионосфере, а в последней работе их наличие не обнаружено. Потребовалось привлечение как других методов диагностики, так и иных методов обработки данных наблюдений. В определенной степени это сделали авторы работ [Бернгардт и др., 2013; Гивишвили и др., 2013, 2014; Калихман и др., 2014; Козлов и др., 2014; Кузьмичева и Лосева, 2013; Кузьмичева и др., 2014; Кутелев и Бернгардт, 2014; Перевалова и др., 2013, 2014а, б; Ратовский и др., 2014; Ружин и др., 2014; Терещенко и др., 2014; Челябинский суперболид ..., 2016; Черногор и Гармаш, 2013; Черногор и др., 2013; Черногор и Барабаш, 2014; Черногор, 2015, 2017]. В этих работах обсуждаются ионосферные эффекты, последовавшие за пролетом и взрывом Челябинского метеорои-

да. Измерения выполнены различными радиофизическими методами и на различных высотах. Из работ [Бернгардт и др., 2013; Гивишвили и др., 2013, 2014; Калихман и др., 2014; Козлов и др., 2014; Кузьмичева и Лосева, 2013; Кузьмичева и др., 2014; Кутелев и др., 2014; Перевалова и др., 2013, 2014а, б; Ратовский и др., 2014; Ружин и др., 2014; Терещенко и др., 2014; Челябинский суперболид ..., 2016; Черногор и Гармаш, 2013; Черногор и др., 2014; Черногор, 2015, 2017] следует, что метеороид вызвал заметные эффекты в ионосфере.

В работе [Перевалова и др., 2013; 2014а, б] по данным GPS-приемников описано поведение ионосферы после взрыва Челябинского метеороида.

В работе [Бернгардт и др., 2013] изложены результаты наблюдения геофизических явлений, последовавших за падением Челябинского космического тела.

В работах [Кузьмичева и Лосева, 2013; Кузьмичева и др., 2014] также проанализированы ионосферные эффекты Челябинского метеороида.

Авторы [Тертышников и др., 2013] описали возмущения в ионосфере, последовавшие за взрывом Челябинского космического тела, и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника.

Авторами [Черногор и Гармаш, 2013; Черногор, 2015, 2017] обнаружены и объяснены квазипериодические и аperiodические возмущения в нижней ионосфере.

Ионозондовые наблюдения позволили обнаружить проявления атмосферных гравитационных волн с периодом 75–135 мин на расстояниях до 3000 км [Черногор и Барабаш, 2014; Черногор, 2015].

Авторами [Черногор и др., 2013] описаны результаты GPS-наблюдений ионосферных квазипериодических возмущений, последовавших за падением Челябинского метеороида.

Не все наблюдававшиеся разными авторами возмущения удалось объяснить. Поэтому не кажутся до конца убедительными аргументы в пользу того, что наблюдаемые при помощи десятка ионозондов европейского и азиатского регионов России возмущения вызваны взрывом Челябинского космического тела. Возможно, что часть обнаруженных возмущений генерировалась при движении тела на термосферно-мезосферных высотах. Не исключаются и проявления неизвестного механизма генерации долгоживущих (до 9 ч) ионосферных возмущений [Гвишвили и др., 2013].

Поэтому актуальной задачей является изучение возможных возмущений в ионосфере, вызванных падением других космических тел.

Целью настоящей работы является изложение результатов наблюдения ионосферных возмущений, последовавших за падением метеороида метрового размера в центре европейской части России.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТЕОРОИДЕ

Возле г. Липецка (Россия) 21 июня 2018 г. в 01:16:20 UT (здесь и далее всемирное время) в атмосферу Земли вторглось космическое тело, взорвавшееся на высоте ~ 27 км. Тело получило название Липецкого метеороида. Оно было обнаружено при помощи многочисленных видеорегистраторов на расстояниях не менее 300 км. Основные параметры космического тела были зарегистрированы приборами на спутниках США, выполняющих задачи контроля космического пространства [Center ..., 2019]. К ним относятся: проекции скорости ($v_x = -8.9$ км/с; $v_y = -4.3$ км/с; $v_z = -10.5$ км/с); интегральная энергия свечения $E_r \approx 1.22 \times 10^{12}$ Дж ≈ 0.29 кт ТНТ; высота вспышки $z_r \approx 27$ км и ее координаты: 52.8° N, 38.1° E. На поверхности Земли найдены фрагменты космического тела. Оказалось, что тело было каменным, точнее хондритом с плотностью ~ 3.3 т/м³.

По трем проекциям был вычислен угол наклона траектории к горизонту (79°) и модуль скорости ($v \approx 14.4$ км/с). Поскольку начальная кинетическая энергия E связана уравнением регрессии [Brown et al., 2002] с E_r , удалось оценить $E \approx 1.17 \times 10^{13}$ Дж ≈ 2.8 кт ТНТ. По E и v вычислена масса тела $m \approx 113$ т. По массе и плотности вещества

определены объем (34.2 м³) и диаметр шарообразного тела (4 м).

3. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Радар, предназначенный для доплеровского зондирования (ДЗ) ионосферы, расположен вблизи г. Харькова [Черногор и др., 2013]. Основные параметры радара, излучающего радиоимпульсы вертикально вверх, следующие: диапазон частот $f = 1-24$ МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства — 1 кВт, длительность импульса $\tau \approx 500$ мкс, частота повторения импульсов — 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства — 10 Гц. Антенная система представляет собой вертикальный ромб с коэффициентом усиления $G \approx 1-10$ в зависимости от частоты волны. Отношение сигнал/помеха q достигает 10^5-10^6 в ночное время и 10^3-10^4 в дневное время суток. Радар сопряжен с персональным компьютером, образуя программно-аппаратный комплекс, ведущий измерения и предварительную обработку сигнала в реальном масштабе времени. Высотная протяженность отраженного сигнала существенно превышает $ct/2 \approx 75$ км. Поэтому используется стробирование по высоте с дискретностью $\Delta z = 75$ км в диапазоне действующих высот 75–450 км. Сигнал биений колебаний опорного генератора и отраженного сигнала в цифровом виде (частота опроса — 10 Гц) записывался на носитель информации, а затем при помощи преобразования Фурье вычислялись доплеровские спектры в диапазоне возможных доплеровских сдвигов от -2.5 до $+2.5$ Гц на интервале времени 60 с (разрешение по частоте ~ 17 мГц). Погрешность оценки доплеровского смещения частоты (ДСЧ) f_d составляет $\sim 10^{-3}$ Гц при типичном значении q .

Для общего контроля за состоянием ионосферы использовался ионозонд, расположенный рядом с радаром ДЗ. Частота регистрации ионограмм — 1 ионограмма за 5 мин.

4. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

При анализе вариаций в ионосфере, вызванных любым источником, во избежание ошибок необходимо тщательно изучение состояния космической погоды. По данным ИСЗ ACE [Space..., 2019] 17–19 июня 2018 г. в солнечном ветре наблюдались рост до 3 раз концентрации частиц, их скорости до 2 раз и температуры частиц в 3–10 раз (рис. 1). В результате этого 18 июня 2018 г. возникла весьма умеренная магнитная буря с $Kp_{\max} = 4$ и $Dst_{\min} = -35$ нТл (см. рис. 1). Ее проявления частично сказывались даже 20 июня 2018 г.

Таблица 1. Высотная зависимость избыточного давления в ударной волне и ее длительность

| | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| z , км | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| $\Delta p/p$ | 0.11 | 0.07 | 0.09 | 0.13 | 0.21 | 0.36 | 0.61 | 1.06 | 1.33 | 1.62 |
| Δp , Па | 2×10^2 | 34 | 11 | 4.4 | 1.86 | 0.84 | 0.37 | 0.17 | 0.13 | 0.11 |
| p_0 , Па | 1.8×10^3 | 4.8×10^2 | 1.3×10^2 | 33.5 | 8.8 | 2.3 | 0.6 | 0.16 | 0.10 | 0.07 |
| ΔT , мин | 6.3–7.2 | 9.1–10.3 | 10.5–11.9 | 11.5–13.0 | 12.3–13.9 | 13.0–14.4 | 13.5–15.3 | 14.0–15.8 | 14.5–16.4 | 14.9–16.8 |

21 июня 2018 г. в день падения Липецкого метеороида значения Kp -индекса не превышали 1, а Dst -индекса были больше – (3–4) нТл.

Таким образом, магнитная обстановка была вполне благоприятной для наблюдения ионосферного эффекта Липецкого метеороида. Требованиям контрольного дня лучше соответствовал день 22 июня 2018 г.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Временные вариации доплеровских спектров (ДС) в контрольные сутки с 19 на 20 июня 2018 г. на частотах 3.2 и 4.2 МГц приведены на рис. 2. Из рисунка 2 видно, что в течение всего времени имели место как аперiodические, так и квазипериодические вариации ДС. После 01:00 постоянная составляющая доплеровского смещения частоты (ДСЧ) $\overline{f_d}$ стала положительной, причем ее значение составляло ~0.36 и 0.46 Гц на частотах 3.2 и 4.2 МГц соответственно. При $\overline{f_d} > 0$ происходит опускание области отражения радиоволны. Максимальная скорость опускания была ~16 м/с. За 3.5 ч область отражения радиоволн опустилась вниз примерно на 100 км. Продолжительные квазипериодические процессы в интервале времени, приведенном на рис. 2, отсутствовали. Эпизодически ДС становились диффузными.

Накануне и в день падения Липецкого метеороида с 21:00 20 июня 2018 г. до 00:30 21 июня 2018 г. ДС были диффузными (рис. 3). Утреннее опускание высоты отражения радиоволны началось около 01:00 и продолжалось до 04:30. Примерно с 00:55 и до 01:27 наблюдался квазипериодический процесс с периодом $T \approx 14$ мин и амплитудой ~0.11 и 0.19 Гц на частотах 3.2 и 4.2 МГц соответственно. В интервале времени 01:27–01:48 имел место “развал” ДС, квазипериодические вариации оказались разрушенными. Примерно после 01:48 наблюдались квазипериодические изменения ДСЧ. Период колебаний ДСЧ на частоте 4.2 МГц постепенно увеличивался от 10 до 20 мин. Амплитуда колебаний была ~0.11 и 0.19 Гц на частотах 3.2 и 4.2 МГц соответственно. Квазипериодический процесс продолжался около 2 ч.

В контрольный день 22 июня 2018 г. отмечались как квазипериодические, так и аперiodические вариации ДСЧ (рис. 4). “Развал” спектров в

интервале времени 01:00–02:00 отсутствовал. После 02:05 на частоте 3.2 МГц появилось квазипериодическое колебание, которое продолжалось ~80 мин. На частоте 4.2 МГц в это же время периодический процесс отсутствовал. С 02:20 до 03:20 наблюдалось раздвоение ДС, свидетельствующее о наличии двух отраженных лучей.

Таким образом, в день падения Липецкого метеороида наблюдалось два эффекта: с временем запаздывания $\Delta t_1 \approx 11$ мин “развал” ДС и с временем запаздывания 33 и 31 мин на частотах 3.2 и 4.2 МГц соответственно появление продолжительного (~2 ч) квазипериодического процесса.

6. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ЭФФЕКТОВ

Время запаздывания первого эффекта, т.е. “развала” ДС, составляло ~11 мин. Это наводит на мысль, что эффект вызван распространением ударной волны от взрыва метеороида до высот ионосферы.

Приведем результаты расчета высотной зависимости избыточного давления Δp в ударной волне и ее длительности ΔT (табл. 1). При этом использовались соотношения для $\Delta p/p$ и ΔT из работы [Infrasound ..., 2010]. Расчеты производились без учета диссипации ударной волны. Из таблицы 1 видно, что на высотах $z \geq 100$ км $\Delta p/p > 1$. Это означает, что ударная волна эффективно поглощается, нагревая среду. Атмосфера при этом турбулизуется, возникают неоднородности концентрации электронов, приводящие к “развалу” ДС.

Нагретый объем атмосферы становится источником атмосферных гравитационных волн (АГВ). Оценим их параметры.

Из геометрических соображений следует, что нагретая инфразвуком область атмосферы из высоты взрыва метеороида видна под углом $2\Delta\beta$, где $\Delta\beta$ дается соотношением

$$\cos \Delta\beta = \frac{z_1 - z_e}{z_2 - z_e}$$

Здесь z_1 и z_2 высоты начала и окончания нагрева; $z_e \approx 27$ км – высота взрыва метеороида. При $z_1 \approx 100$ км и $z_2 \approx 150$ км имеем $\Delta\beta \approx 54^\circ \approx 0.94$ рад. Горизонтальный радиус нагретой области изменяется от $R_1 = (z_1 - z_e) \operatorname{tg} \Delta\beta \approx 100$ км до $R_2 = (z_2 - z_e) \operatorname{tg} \Delta\beta \approx 170$ км. При этом длина АГВ λ изме-

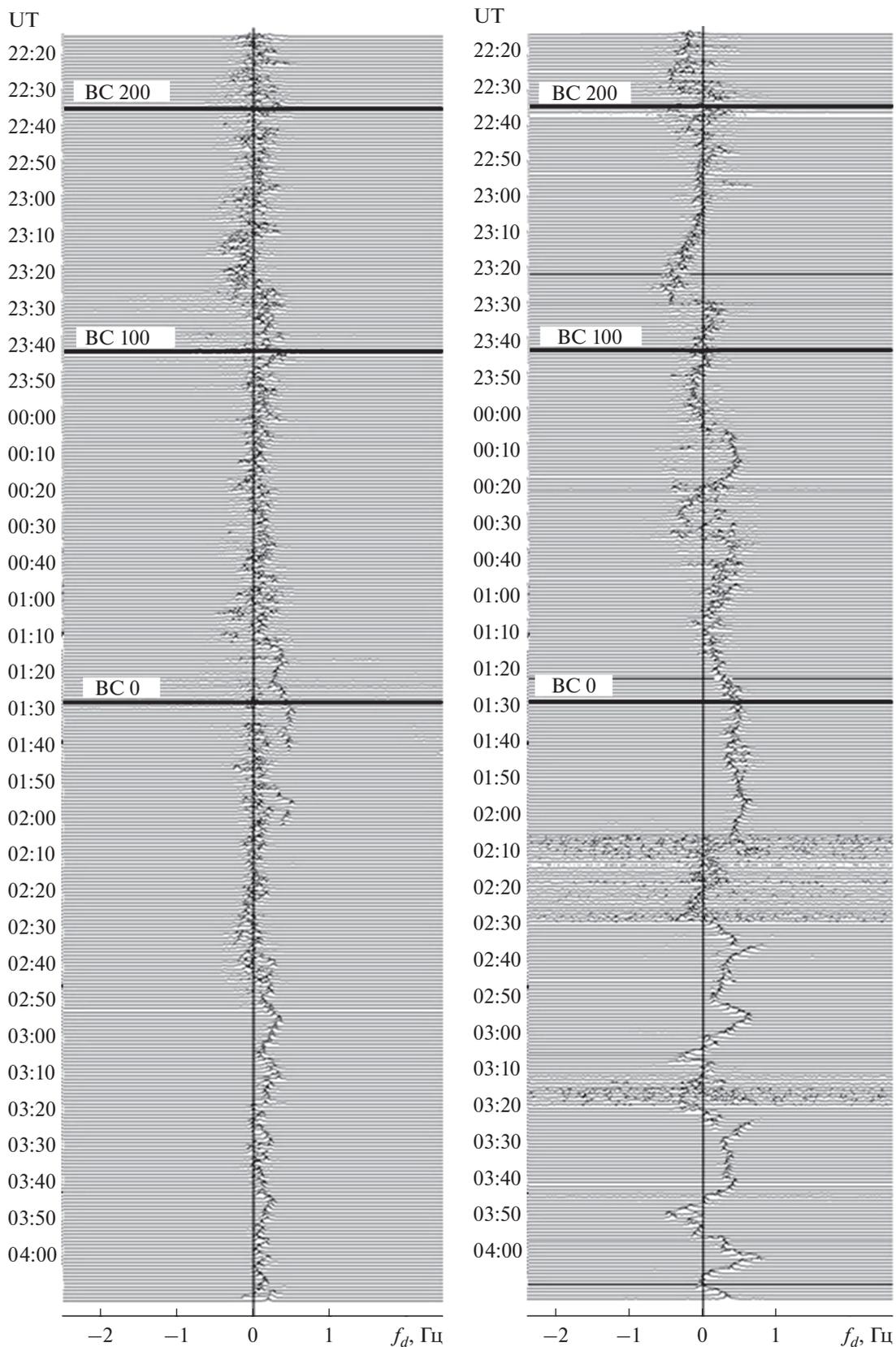


Рис. 2. Временные вариации доплеровских спектров на частотах 3.2 МГц (левая панель) и 4.2 МГц (правая панель) в ночь с 19 на 20 июня 2018 г. Здесь и далее горизонтальными линиями показаны моменты времени восхода Солнца на высотах 200, 100 и 0 км.

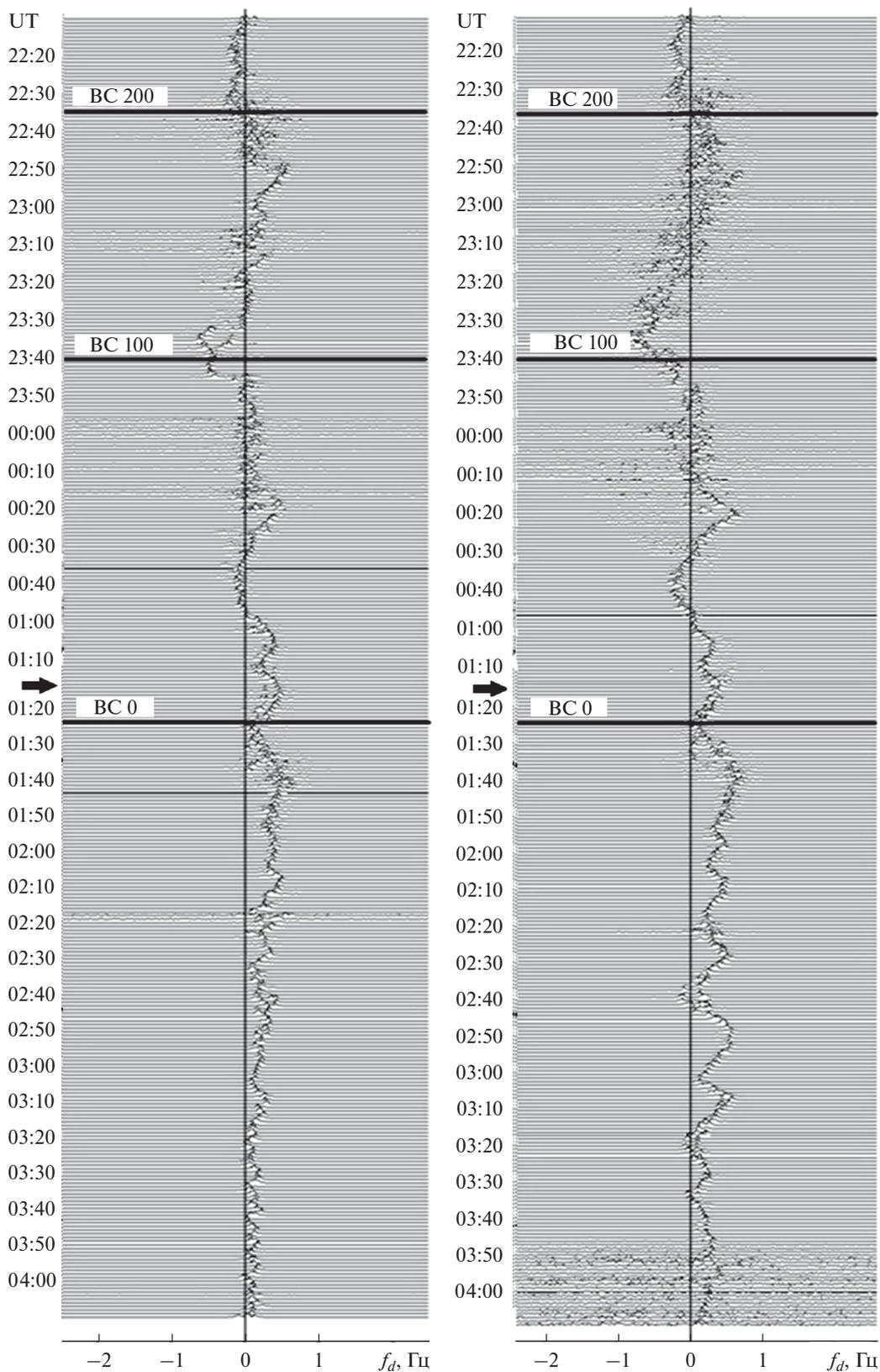


Рис. 3. Временные вариации доплеровских спектров на частотах 3.2 МГц (левая панель) и 4.2 МГц (правая панель) в ночь с 20 на 21 июня 2018 г. Стрелкой показан момент взрыва метеороида.

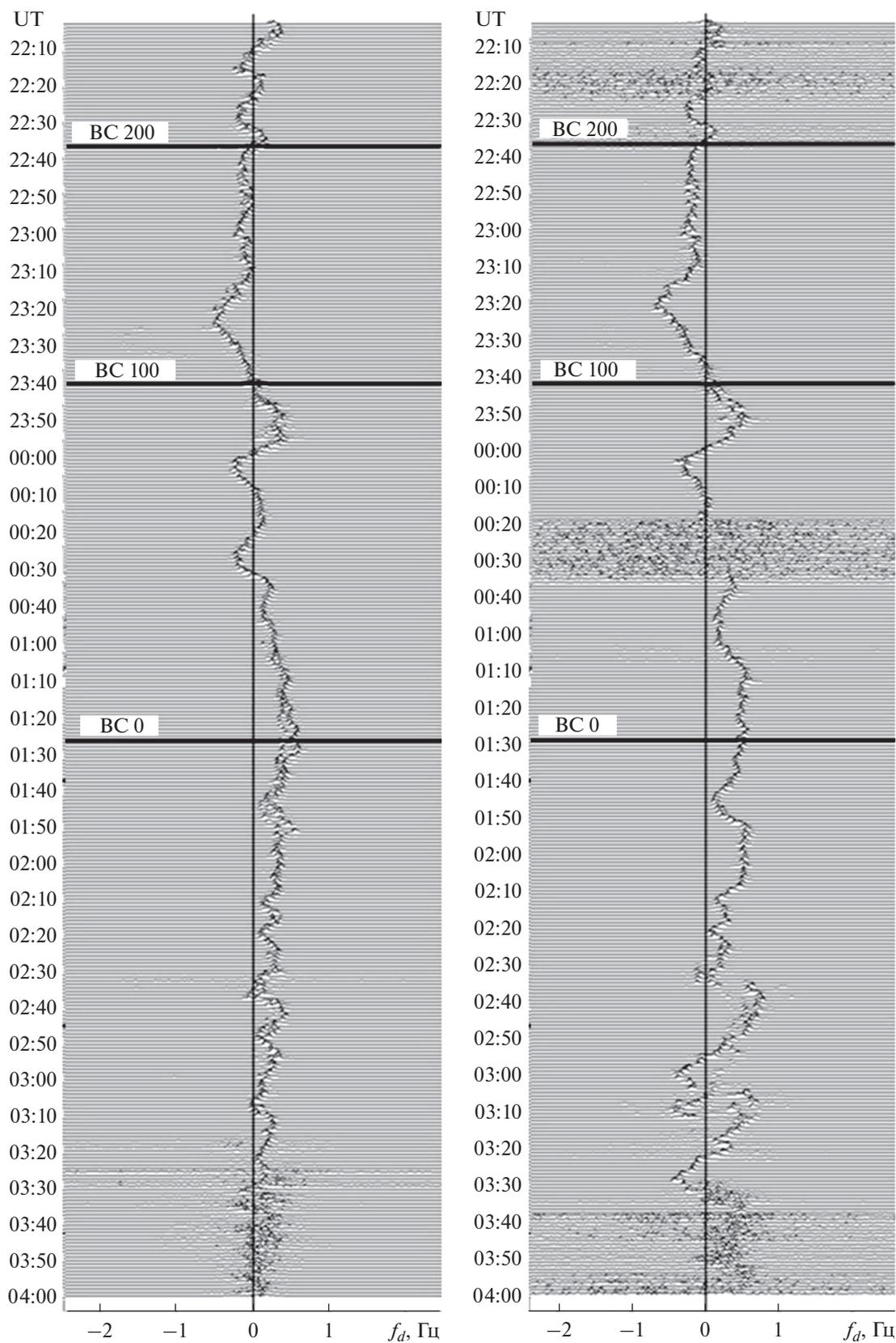


Рис. 4. Временные вариации доплеровских спектров на частотах 3.2 МГц (левая панель) и 4.2 МГц (правая панель) в ночь с 21 на 22 июня 2018 г.

Таблица 2. Высотные зависимости температуры, плотностей атмосферы, а также тепловой и волновой энергии

| z , км | ρ_0 , кг/м ³ | T_0 , К | ϵ_T , Дж/м ³ | ϵ_w , Дж/м ³ | ϵ_w/ϵ_T |
|----------|------------------------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 100 | 10^{-6} | 300 | 0.30 | 0.25 | 0.83 |
| 120 | 10^{-7} | 310 | 3.1×10^{-2} | 0.24 | 7.74 |
| 150 | 10^{-8} | 350 | 3.5×10^{-3} | 0.22 | 62.9 |

няется от $2R_1$ до $2R_2$, т.е. в пределах 200–340 км. При средней скорости звука $v_s \approx 300$ –450 м/с на высотах 100–150 км имеем для периода АГВ $T \approx 7.4$ –18.9 мин соответственно.

Энергию АГВ можно оценить из следующего соображения:

$$E_g = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 E,$$

где $\eta_1 \approx 0.6$ – доля энергии E , преобразуемой в энергию инфразвука; $\eta_2 = \Delta\Omega/4\pi \approx 0.31$ – доля энергии в телесном угле

$$\Delta\Omega = 2\pi \frac{z_2 - z_1}{z_2 - z_e} \approx 0.81\pi,$$

η_3 – доля энергии инфразвука, поглощаемой слоем атмосферы толщиной $z_2 - z_1$; η_4 – доля поглощенной энергии инфразвука, преобразуемая в энергию АГВ. Полагая $\eta_3 \approx 0.5$, $\eta_4 \approx 1$, получим, что $\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \approx 0.06$, а $E_g \approx 7 \times 10^{11}$ Дж.

Далее оценим тепловую энергию E_T в нагретом объеме:

$$E_T = \int_V \epsilon_T dV = \int_V C \rho_0 T_0 dV,$$

где $\epsilon_T = C \rho_0 T_0$ – плотность тепловой энергии невозмущенного воздуха; $T_0 \approx 210$ К – невозмущенная температура атмосферы на высоте $z_1 \approx 100$ км; $\rho_0 \approx 10^{-6}$ кг/м³ – плотность атмосферы на высоте z_1 ; $C \approx 10^3$ Дж/(кг К) – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении. Оценка E_T имеет вид:

$$E_T \approx C \rho_0(z_1) T_0(z_1) \pi R_1^2 H.$$

При $R_1 \approx 100$ км, $H \approx 7$ км имеем $E_T \approx 4.9 \times 10^{13}$ Дж. Тогда относительное возмущение температуры

$$\frac{\Delta T}{T_0} \approx \frac{E_g}{E_T} \approx 1.4 \times 10^{-2}.$$

На высотах 120 и 150 км значение $\Delta T/T_0$ порядка 10 и 100% соответственно. При этом относительное давление в АГВ такого же порядка. Учитывая, что АГВ каналируется в волноводе на высотах ~100–200 км, относительная амплитуда АГВ остается достаточно большой (~3–30%) на расстояниях ~1000 км.

Значения удельной волновой энергии ϵ_w и тепловой энергии ϵ_T приведены в табл. 2. Здесь

$$\epsilon_w = \frac{\Delta p^2}{\rho_0 v_s^2} = \gamma \frac{\Delta p^2}{p_0},$$

Δp – избыточное давление в АГВ; ρ_0 и p_0 – плотность и давление в невозмущенной атмосфере; v_s – скорость звука; $\gamma = 1.4$ – показатель адиабаты.

Разумеется, нагрев атмосферы инфразвуком выше 150 км невозможен из-за его поглощения в диапазоне высот 100–150 км. Из таблицы 2 видно, что при $z > 120$ км $\epsilon_w/\epsilon_T > 0.3$. Это означает, что выше 120 км эффективно генерируются АГВ.

Время запаздывания $\Delta t_1 \approx 11$ мин начала “развала” ДС состоит из двух частей: времени распространения ударной волны от высоты взрыва до высоты отражения радиоволн, вычисленной по данным ионозонда (~250 и 270 км для частот 3.2 и 4.2 МГц соответственно), и времени становления атмосферно-ионосферных процессов, влияющих на “развал” ДС.

Длительность $\Delta T_1 \approx 21$ мин процесса “развала” ДС определяется длительностью ударно-волнового воздействия. По нашим оценкам, на высотах 100–120 км оно составляет ~14–17 мин (см. табл. 1). На больших высотах оно должно быть еще больше.

Время запаздывания $\Delta t_2 \approx 32$ мин определяется скоростью движения АГВ в горизонтальном направлении

$$v = \frac{R}{\Delta t_2 - \Delta t_1}.$$

Здесь R – расстояние от эпицентра взрыва до обсерватории.

При $R \approx 360$ км, $\Delta t_2 \approx 33$ мин ($f = 3.2$ МГц) и $\Delta t_2 - \Delta t_1 = 22$ мин имеем $v_1 \approx 273$ м/с. Для $f = 4.2$ МГц, $\Delta t_2 \approx 31$ мин, а $v_2 \approx 300$ м/с. Такие скорости и периоды $T \approx 10$ –20 мин свойственны АГВ. Различие значений Δt_2 и скоростей для различных частот свидетельствует о том, что волновой процесс действительно вызван взрывом метеороида. Радиоволна с большей частотой отражается на большей высоте, где скорость АГВ больше.

Таким образом, физические механизмы обоих эффектов получают свое объяснение.

7. ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ временных вариаций ДС в день падения Липецкого метеороида и в два соседних дня позволил обнаружить два эффекта. Первый из них заключается в “развале” ДС примерно через 11 мин после взрыва метеороида. Время запаздывания и продолжительность эффекта связаны с

распространением и воздействием на среду ударной волны от взрыва.

Второй эффект представляет собой квазипериодические вариации ДСЧ с периодом $T \approx 10-20$ мин. Времена запаздывания Δt_2 , равные 33 и 31 мин, указывают на то, что скорость распространения волны в горизонтальном направлении была ~ 273 и 300 м/с. Такую скорость и периоды имеют АГВ (см., например, [Госсард и Хук, 1978; Григорьев, 1999]). Эти волны являются вторичными. Они сгенерированы в результате поглощения в диапазоне высот $\sim 100-150$ км ударной волны от взрыва метеороида.

Рассмотрим квазипериодические вариации ДСЧ, имеющие амплитуду $f_{d1} = 0.11$ Гц и $f_{d2} = 0.19$ Гц на частотах $f_1 = 3.2$ МГц и $f_2 = 4.2$ МГц. Если бы обе волны отражались на одной и той же высоте, то

$$\tilde{f}_{d2} = f_{d1}f_2/f_1 \approx 0.14 \text{ Гц.}$$

При этом $f_{d2}/\tilde{f}_{d2} = 1.36$. Увеличение f_{d2} по сравнению с \tilde{f}_{d2} обусловлено увеличением относительной амплитуды возмущений концентрации электронов при увеличении высоты. Действительно, на высотах $z \leq 200-250$ км

$$\delta_N(z) \approx \delta_N(z_0)e^{(z-z_0)/2H}. \quad (1)$$

К этому следует добавить, что при вертикальном зондировании

$$f_d = \frac{4\pi L}{cT} f \delta_N, \quad (2)$$

где L – характерный высотный масштаб, определяющий толщину слоя ионосферы, дающую вклад в ДСЧ; c – скорость света; T – период колебания; $\delta_N = \Delta N/N_0$. При $\delta_N(z)/\delta_N(z_0) = 1.36$ и $H \approx 35$ км имеем $\Delta z = z - z_0 \approx 21$ км. Это означает, что радиоволна с частотой $f_2 = 4.2$ МГц отражалась примерно на 21 км выше, чем радиоволна с $f_1 = 3.2$ МГц. По данным ионозонда высоты отражения составляли ~ 250 и 270 км для частот 3.2 и 4.2 МГц. Из соотношения (2) при $f_{d1} = 0.11$ Гц, $f_1 = 3.2$ МГц, $L \approx 30$ км и $T \approx 10$ мин имеем $\delta_N \approx 1.6\%$.

Таким образом, отличия в характере вариаций ДС в день падения Липецкого метеороида от характера вариаций в контрольные дни, наличие адекватных механизмов возникновения обнаруженных эффектов свидетельствуют в пользу того, что эти эффекты вызваны взрывом космического тела.

8. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Взрыв Липецкого метеороида привел к двум эффектам: “развалу” ДС и квазипериодическим вариациям ДСЧ.

2. Первый эффект имел время запаздывания ~ 11 мин и длительность 21 мин. Эффект вызван

распространением и диссипацией ударной волны на ионосферных высотах.

3. Второй эффект имел время запаздывания $\sim 31-33$ мин, продолжительность – ~ 2 ч и период – $10-20$ мин. Причиной этого эффекта является генерация и распространение вдоль ионосферы АГВ, порожденной диссипацией энергии ударной волны в атмосфере над местом взрыва метеороида.

4. Предложены и обоснованы механизмы генерации обоих эффектов.

5. Показано, что метеороиды с кинетической энергией $\sim 10^{13}$ Дж способны вызывать регистрируемые эффекты в ионосфере на удалениях в сотни километров от места взрыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астрон. вестн. Т. 47. № 4. 2013. (Тематический выпуск).
- Бернгардт О.И., Добрынина А.А., Жеребцов Г.А. Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // Доклады Академии наук. Т. 452. № 2. С. 205–207. 2013.
- Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Алпатов В.В. и др. Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеороидом // Астрон. вестн. Т. 47. № 4. С. 304–311. 2013.
- Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Алпатов В.В., Григорьева С.А. Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеороидом / Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции. Ред. Антипин Н.А. Челябинск: изд-во “Каменный пояс”. С. 108–117. 2014.
- Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. Инфразвук и гравитационные волны в атмосфере – их возникновение и распространение. М.: Мир, 532 с. 1978.
- Гохберг М.Б., Ольшанская Е.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. Челябинский метеороид: отклик ионосферы по измерениям GPS // Доклады Академии наук. Т. 452. № 2. С. 208–212. 2013.
- Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 42. № 1. С. 3–25. 1999.
- Данилкин Н.П., Журавлев С.В., Лапшин В.Б. К вопросу о состоянии ионосферы после пролета Челябинского метеороида // Гелиогеофизические исследования. № 5. С. 54–59. 2013.
- Калихман А.Д., Тащилин А.В., Вугмейстер Б.О. Ионосферные возмущения, вызванные падением Челябинского метеороида // Тр. XXIV Всероссийской научной конф. Распространение радиоволн. Т. I. РРВ-24, Иркутск, 29 июня–5 июля 2014 г. Науч. ред. Куркин В.И. С. 179–181. 2014.
- Козлов В.И., Муллаяров В.А., Корсаков А.А. и др. Вариации параметров ОНЧ-радиосигналов на трассах, проходящих в пределах первых зон Френеля через область взрыва Челябинского метеороида 15.02.2013 // Тр. XXIV Всероссийской науч. конф. Распространение радиоволн. Т. I. РРВ-24, Иркутск, 29 июня–5 июля 2014 г. Науч. ред. Куркин В.И. С. 245–248. 2014.

- Кузьмичева М.Ю., Лосева Т.В. Глобальные ионосферные эффекты, вызванные Челябинским событием 15.02.2013 г. // Динамические процессы в геосферах. Сб. науч. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС. С. 32–40. 2013.
- Кузьмичева М.Ю., Лосева Т.В., Ляхов А.Н. Ионосферный эффект Челябинского события // Динамические процессы в геосферах: сб. науч. тр. ИДГ РАН. Вып. 5. С. 86–95. 2014.
- Кутелев К.А., Бернгардт О.И. Среднемасштабные волновые возмущения в F-слое ионосферы в течение двух часов после падения метеорита Челябинск по наблюдениям радара ЕКВ // Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской науч. конф. Ред. Антипин Н.А. Челябинск: изд-во “Каменный пояс”. С. 171–181. 2014.
- Перевалова Н.П., Жупитяева А.С., Шестаков Н.В., Ясюкевич Ю.В., Воейков С.В. Поведение ионосферы во время взрыва Челябинского метеорита // Секция В. Физика околоземного космического пространства. БШФФ. С. 133–137. 2013.
- Перевалова Н.П., Шестаков Н.В., Жупитяева А.С., Воейков С.В. Предварительные результаты исследования эффектов взрыва Челябинского метеороида по данным сети станций GPS в Челябинской области // Тр. XXIV Всероссийской науч. конф. Распространение радиоволн. Т. I. РРВ-24, Иркутск, 29 июня–5 июля 2014 г. Науч. ред. Куркин В.И. С. 269–272. 2014а.
- Перевалова Н.П., Шестаков Н.В., Жупитяева А.С. и др. Вариации полного электронного содержания в ионосфере во время падения и взрыва Челябинского метеороида // Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской науч. конф. Ред. Антипин Н.А. Челябинск: изд-во “Каменный пояс”. С. 182–190. 2014б.
- Ратовский К.Г., Белинская Ю.А., Кусонский О.А., Степанов А.Е. Ионосферный отклик на взрыв Челябинского метеороида по данным ионозондов азиатской части России // Тр. XXIV Всероссийской науч. конф. Распространение радиоволн. Т. I. РРВ-24, Иркутск, 29 июня–5 июля 2014 г. Науч. ред. Куркин В.И. С. 288–291. 2014.
- Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Смирнов В.М. Отклик ионосферы на вторжение и взрыв Южноуральского суперболида // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 54. № 5. С. 646–657. 2014.
- Терещенко В.Д., Терещенко В.А., Оглоблина О.Ф., Черняков С.М. Поведение полярной ионосферы после взрыва Челябинского метеорита // Тр. XXIV Всероссийской науч. конф. Распространение радиоволн. Т. II. РРВ-24, Иркутск, 29 июня–5 июля 2014 г. Науч. ред. Куркин В.И. С. 5–8. 2014.
- Тертышников А.В., Алпатов В.В., Глухов Я. В., Давиденко Д. В. Региональные возмущения ионосферы и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника при взрыве Челябинского (Чембаркульского) метеороида 15.02.2013 г. // Гелиогеофизические исследования. Вып. 5. С. 65–73. 2013.
- Челябинский суперболид. Ред. Горькавый Н.Н., Дудоров А.Е. Челябинск: изд-во Челябинского ун-та. 223 с. 2016.
- Черногор Л.Ф., Гармаш К.П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита “Челябинск” // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 18. № 3. С. 231–243. 2013.
- Черногор Л.Ф., Гармаш К.П., Поднос В.А., Тырнов О.Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина – средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах // Космический проект “Ионосат-Микро”. Киев: Академперіодика. С. 160–182. 2013а.
- Черногор Л.Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита “Челябинск” // Инженерная физика. № 8. С. 23–40. 2013.
- Черногор Л.Ф., Милованов Ю.Б., Федоренко В.Н., Цымбал А.М. Спутниковые наблюдения ионосферных возмущений, последовавших за падением Челябинского метеорита // Космічна наука і технологія. Т. 19. № 6. С. 38–46. 2013б.
- Черногор Л.Ф., Барабаш В.В. Ионосферные возмущения, сопровождавшие пролет Челябинского тела // Кинематика и физика небесных тел. Т. 30. № 3. С. 27–42. 2014.
- Черногор Л.Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 55. № 3. С. 370–385. 2015.
- Черногор Л.Ф. Возмущения в нижней ионосфере, сопровождавшие падение Челябинского космического тела // Космич. исслед. Т. 55. № 5. С. 342–352. 2017.
- Brown P.G., Spalding R.E., ReVelle D.O., Tagliaferri E. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature. 2002. V. 420. P. 294–296.
- Center for Near Earth Object Studies [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cneos.jpl.nasa.gov/>. Дата обращения: 12.03.2019.
- Chernogor L.F., Rozumenko V.T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite’s passage // Probl. Atom. Sci. Tech. V. 86. № 4. P. 136–139. 2013.
- Infrasound monitoring for atmospheric studies. Eds. Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. Dordrecht Heidelberg London New-York: Springer, 734 p. 2010.
- Popova O.P., Jenniskens P., Emelyanenko V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. V. 342. P. 1069–1073. 2013а.
- Popova O.P., Jenniskens P., Emelyanenko V. et al. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1. Дата обращения: 10.12.2013б.
- Space Weather Prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>. Дата обращения: 18.02.2019.