

УДК 533.6.011.6+523.682 Л. Ф. ЧЕРНОГОР, К. П. ГАРМАШ

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина  
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

## ВОЗМУЩЕНИЯ В ГЕОКОСМОСЕ, СОПРОВОЖДАВШИЕ ПАДЕНИЕ МЕТЕОРИТА “ЧЕЛЯБИНСК”

*Приведены результаты наблюдения возмущений в нижней и верхней ионосфере, а также геомагнитного поля в диапазоне периодов  $1 \div 1000$  с, сопровождавшие пролет и взрыв космического тела “Челябинск”. Эффекты вблизи места пролета метеороида изучались при помощи вариаций полного электронного содержания, регистрируемого GPS-радиоприемниками. Наблюдения за ионосферой на расстояниях  $\sim 2000 \div 3000$  км осуществлялись при помощи ионозондов и измерений параметров сигнала на частоте  $66 \frac{2}{3}$  кГц на трассе Москва–Харьков. Обнаружены проявления как акустических, так и гравитационных волн, последовавших за взрывом космического тела. Не удалось выявить значительные изменения в уровне геомагнитных пульсаций (период  $1 \div 1000$  с).*

*Ключевые слова:* метеороид, возмущение ионосферы, флуктуации геомагнитного поля, акустико-гравитационные волны, полное электронное содержание, фазовые вариации

### 1. Введение

Космическое тело, получившее название метеорит “Челябинск”, вторглось в атмосферу Земли 15 февраля 2013 г. в 03:20:26 UT (здесь и далее указано всемирное время UT) [1–3]. Траектория тела была ориентирована с востока на запад (азимут – около  $270^\circ$ ), угол наклона траектории к горизонту был близок к  $20^\circ$ . Начальная скорость метеорита составляла 18.5 км/с, начальный диаметр – около 18 м, начальная масса – около 11 кт [1–3]. Кинетическая энергия тела на входе в атмосферу была близка к 1.88 ПДж (440 кт тротилового эквивалента). Резкое торможение тела и взрывоподобное выделение энергии произошло на высотах  $23 \div 27$  км. Координаты эпицентра взрыва следующие:  $54.8^\circ$  с. ш. и  $61.5^\circ$  в. д. Энергия взрыва была около 1 ПДж. Примерно 30 % этой энергии преобразовалось в энергию ударной волны. Последняя, распространяясь во все стороны от взрыва, вызвала возмущения в атмосфере и ионосфере на значительных расстояниях. По нашим расчетам, возмущения должны были быть заметными на расстояниях в сотни и даже тысячи километров [4].

Представляет интерес экспериментальное исследование эффектов в геокосмосе, вызванных падением космического тела.

Добавим, что события, подобные челябинскому, случаются в среднем один раз в 65 лет.

Целью настоящей работы является изложение результатов наблюдения возмущений в ионосфе-

ре и геомагнитных пульсаций, последовавших за пролетом и взрывом метеорита “Челябинск”.

### 2. Средства и методы

#### 2.1. Состояние космической погоды

Состояние космической погоды контролировалось при помощи измерений концентрации, скорости и температуры солнечного ветра, выполненных на искусственном спутнике Земли (ИСЗ) АСЕ, спутниковых измерений компонент межпланетного магнитного поля и индексов геомагнитной активности ( $AE$ ,  $D_{st}$  и  $K_p$ ).

В день пролета Челябинского метеорита концентрация частиц в солнечном ветре не превышала  $5 \cdot 10^6$  м $^{-3}$ , их скорость была около 400 км/с, а температура – около  $4 \cdot 10^4$  К.

Компонента  $B_z$  межпланетного магнитного поля флуктуировала в пределах от 0 до  $-1$  нТл. Вариации  $D_{st}$ -индекса не опускались ниже  $-30$  нТл. В дневное время (с 03:00 до 18:00) значения индекса  $K_p$  изменялись в пределах от 0 до 1, а индекса  $AE$  – от 30 до 150 нТл.

Таким образом, состояние космической погоды было благоприятным для наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных пролетом и взрывом метеорита.

#### 2.2. Приемно-обрабатывающая радиотехническая система мириаметрового диапазона

Для целей автоматизированного измерения искажений характеристик (фазы и амплитуды) сигнала

лов при их распространении в природном волноводе Земля–ионосфера создана приемная система на базе доработанного приемника-компаратора ПК-66 [5]. В качестве зондирующих используются радиосигналы станции РБУ службы эталонных сигналов частоты и времени ( $f = 66\frac{2}{3}$  кГц), расположенной вблизи г. Москвы, Россия (географические координаты: 56.75° с. ш., 37.5° в. д.). Приемная система расположена в г. Харькове, Украина (географические координаты: 50° с. ш., 36.25° в. д.).

Для определения фазовых вариаций реализован аппаратный метод синхронного детектирования усредненных на четвертьпериодных интервалах времени квадратурных компонент сигнала с микропрограммной реализацией определения по ним фазы и устранения неоднозначности обратных тригонометрических функций в интервале углов  $0^\circ \div 360^\circ$ . Стабильность время-частотных параметров системы (значение долговременной относительной нестабильности частоты образцового сигнала порядка  $(1 \div 2) \cdot 10^{-11}$  и относительная погрешность установки его частоты не хуже  $10^{-10}$ ) обеспечивают либо внутренний (типа FE-5680A) для измерительно-регистрирующего блока, либо внешний (Ч1-69) рубидиевые стандарты частоты. Отсчеты фазы и амплитуды, усредненные на секундных интервалах времени, раз в секунду сохраняются в файлах на внешнем (USB-флэш-накопителе). Погрешность значений фазы после обработки экспериментальных данных, как правило, близка к  $0.1^\circ \div 0.3^\circ$ , а относительная погрешность измерения амплитуды составляет несколько процентов.

### 2.3. Ионозонды

Для общего контроля состояния ионосферы использовались ионограммы ионозондов, размещенных как северо-западнее от места взрыва (станция Москва, географические координаты: 55.5° с. ш., 37.3° в. д.), так и юго-восточнее (станция Алма-Ата, географические координаты: 43.15° с. ш., 76.54° в. д.). Для оценки возможности распространения возмущений на большие расстояния ( $R > 3000$  км) привлекались измерения на станциях Прухониц (географические координаты: 50.0° с. ш., 14.6° в. д.) и Юлиусрух (географические координаты: 54.6° с. ш., 13.4° в. д.).

Ионограммы на всех станциях снимались каждые 15 мин.

Добавим, что расстояние вдоль земной поверхности от места взрыва до станций Москва, Алма-Ата, Прухониц и Юлиусрух составляло около 1510, 1730, 3145 и 3020 км соответственно.

### 2.4. Спутники GPS

Для радиопросвечивания возмущений, вызванных падением Челябинского метеорита, в настоящей работе использовались сигналы спутников GPS. Обработке подлежали сигналы станций TUMP, ARTU и TRIM. Спутники оказались удобными для изучения пространственно-временной картины возмущений различной физической природы.

При распространении через возмущенную область ионосферы сигналы спутников приобретают дополнительный набег фазы, который пропорционален полному электронному содержанию (ПЭС) в наклонном столбе  $N_L$ .

Спутники в процессе наблюдения волновых возмущений (ВВ) удалялись от приемника на расстоянии от нескольких сот до примерно тысячи километров. Высота спутников  $z_s \approx 20180$  км, скорость движения  $v_s = 3.8$  км/с, период обращения вокруг Земли – 12 часов. Высота максимума электронной концентрации принималась приблизительно равной  $z_i \approx 350$  км. Скорость движения точек пересечения радиолучей с поверхностью на высоте  $z_i$  была  $\sim 100$  м/с. В процессе наблюдения ВВ проекции этих точек на поверхность Земли смещалась относительно приемника на расстояние не более чем 100 км.

Удаление от эпицентра взрыва до приемников  $R \approx 240 \div 360$  км. Приемники располагались северо-западнее и северо-восточнее эпицентра взрыва.

Добавим, что из-за относительно малой скорости сканирования (до 100 м/с) возмущенной области ионосферы диагностика среды носит пространственно-временной характер. Поэтому характер наблюдаемых вариаций ПЭС, вообще говоря, может быть обусловлен как пространственными особенностями возмущенной области, так и временными изменениями ПЭС. Поскольку падение метеорита над г. Челябинск имело место уже после восхода Солнца, который произошел в 00:40 и 02:45 на высотах 400 и 0 км соответственно, и эффекты утреннего терминатора уже не проявлялись, вариации ПЭС обус-

ловлены в первую очередь пространственными структурами концентрации электронов. При этом характерный пространственный масштаб (длина волны возмущения)  $\lambda$  может быть оценен из следующей простой формулы:

$$\lambda = v_s \frac{z_i}{z_s} T,$$

где  $T$  – период наблюдаемых колебаний. Строго говоря,  $\lambda$  представляет собой проекцию пространственного масштаба, которая изменяется при изменении траектории ИСЗ по отношению к направлению распространения ВВ.

Обработка сводилась к получению зависимости  $\Delta \dot{N}_L(t) = d\Delta N_L(t)/dt$ . При

$$\Delta \dot{N}_L(t) = \Delta \dot{N}_{Lm} \cos \frac{2\pi}{T} t,$$

имеем для амплитуды колебаний

$$\Delta N_{Lm} = \frac{\Delta \dot{N}_{Lm} T}{2\pi}. \quad (1)$$

Здесь  $T$  – период основного колебания,  $\Delta \dot{N}_{Lm}$  – амплитуда колебания  $\Delta \dot{N}_L(t)$ .

### 2.5. Магнитометр-флюксметр

Основой магнитометрического комплекса, расположенного в пос. Граково Харьковской области (географические координаты: 49.65° с. ш., 36.9° в. д.), является индуктивный магнитометр-флюксметр ИМ-II разработки ОКБ Института физики Земли (ИФЗ) РАН. Он обладает высокой чувствительностью (0.5 ÷ 500 пТл в диапазоне периодов 1 ÷ 1000 с соответственно) и достаточно широкой полосой исследуемых частот (от 0.001 до 1 Гц). Магнитометр ИМ-II подключен к специализированному микроконтроллерному регистратору, который производит оцифровку и предварительную фильтрацию магнитометрических сигналов на интервалах 0.5 с, а также сохранение отфильтрованных отсчетов и времени их получения в USB-флэш-памяти. Информация о текущих дате и времени, получаемая от входящего в состав комплекса приемника GPS сигналов BR-304, используется для ежесуточной коррекции собственных энергонезависимых (имеющих независимое батарейное питание) часов микроконтроллерного регистратора. Благодаря этому погрешность временной привяз-

ки магнитометрических данных не превышает нескольких десятых долей секунды.

## 3. Результаты наблюдений

Признаком возмущений, которые могут быть вызваны движением и взрывом метеороида, были любые изменения во временных зависимостях параметров сигнала 15 февраля 2013 г. по сравнению с аналогичными зависимостями в контрольные дни.

### 3.1. Возмущения в нижней ионосфере

Временные вариации фазы  $\varphi(t)$  с периодами менее 5 мин и амплитуды  $A(t)$  ионосферной волны на частоте  $66\frac{2}{3}$  кГц показаны на рис. 1 и рис. 2 соответственно. Из рис. 1 видно, что первый цуг колебаний  $\varphi(t)$  продолжительностью около 6 мин и амплитудой  $7^\circ \div 8^\circ$  возник примерно через время  $\Delta t_1 \approx 46$  мин, а второй продолжительностью около 10 мин и амплитудой  $6^\circ \div 7^\circ$  – через время  $\Delta t_2 \approx 68$  мин. Значения квазипериодов составили около 140 и 200 с соответственно.

Следующий цуг колебаний с периодом  $T \approx 214 \div 230$  с наблюдался в интервале времени 04:52–05:20, при этом  $\Delta t_3 \approx 92$  мин, изменение фазы  $\Delta \varphi \approx 4^\circ$ .

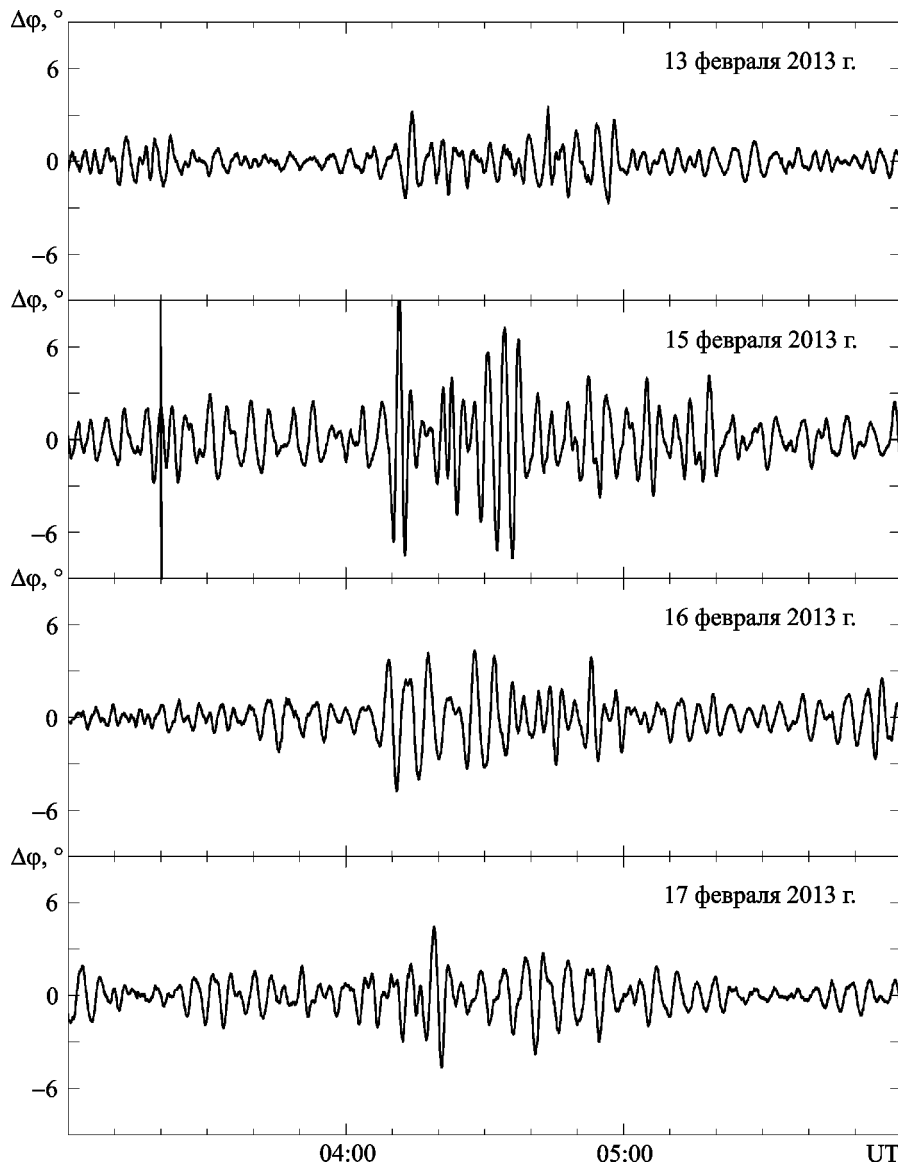
В контрольные дни 13, 16 и 17 февраля 2013 г. цуги колебаний были слабо выражены (их амплитуда не превышала  $3^\circ$ , см. рис. 1).

Поведение амплитуды радиосигнала было следующим (см. рис. 2). 15 февраля 2013 г. в интервале времени 03:30–04:00 амплитуда сигнала была примерно на 10 о. е. меньше, чем амплитуда в контрольные дни. Затем отмечалось слабо выраженное колебание  $A(t)$  с относительной амплитудой  $5 \div 10\%$  и периодом около 150 с, отсутствовавшее в контрольные дни.

### 3.2. Возмущения в максимуме слоя F2 ионосферы

Временные вариации  $f_oF2(t)$ , наблюдавшиеся 14, 15 и 16 февраля 2013 г., приведены соответственно на рис. 3, рис. 4 и рис. 5 для станций Москва, Алма-Ата, Прухониц и Юлиусрух.

*Станция Москва.* Из рис. 4 можно видеть, что 15 февраля 2013 г. примерно в 04:00 в месте наблюдения возник цуг колебаний с периодом  $T \approx 135$  мин, амплитудой около  $0.5 \div 0.6$  МГц и



**Рис. 1.** Временные вариации флуктуаций фазы ионосферного сигнала частотой  $66\frac{2}{3}$  кГц станции РБУ (г. Москва) с периодами менее 5 мин в день падения Челябинского тела (15 февраля 2013 г.) и в соседние дни. Вертикальной линией здесь и далее отмечен момент падения космического тела

продолжительностью не менее 300 мин. В соседние сутки 14 и 16 февраля 2013 г. такое колебание отсутствовало (см. рис. 3 и рис. 5).

Добавим, что прохождение утреннего терминатора имело место с 03:00 до 04:45 в диапазоне высот  $300 \div 0$  км. Амплитуда обнаруженного цуга колебаний 15 февраля 2013 г. заметно превышала амплитуду колебаний 14 и 16 февраля 2013 г., которая составляла  $0.1 \div 0.2$  МГц.

15 февраля 2013 г. наблюдались также всплески  $f_oF2$  до  $1.5 \div 2$  МГц в интервале времени с 10:30 до 14:00 (см. рис. 4).

*Станция Алма-Ата.* Восход Солнца над Алма-Атой на высоте 300 км наблюдался около 00:20, а на поверхности Земли – около 02:00. 14 и 16 февраля 2013 г. в интервале времени 03:00–10:00 имел место колебательный процесс с изменяющимся периодом от 60 до 120 мин (рис. 3 и рис. 5). Амплитуда  $\delta f_oF2$  достигала 1 МГц.

15 февраля 2013 г. вариации  $f_oF2$  с 04:00 до 10:00 отличались от вариации этого параметра в контрольные дни. На существовавшее колебание  $f_oF2$  примерно в 04:00 наложилось другое колебание, которое начиналось с отрицательной

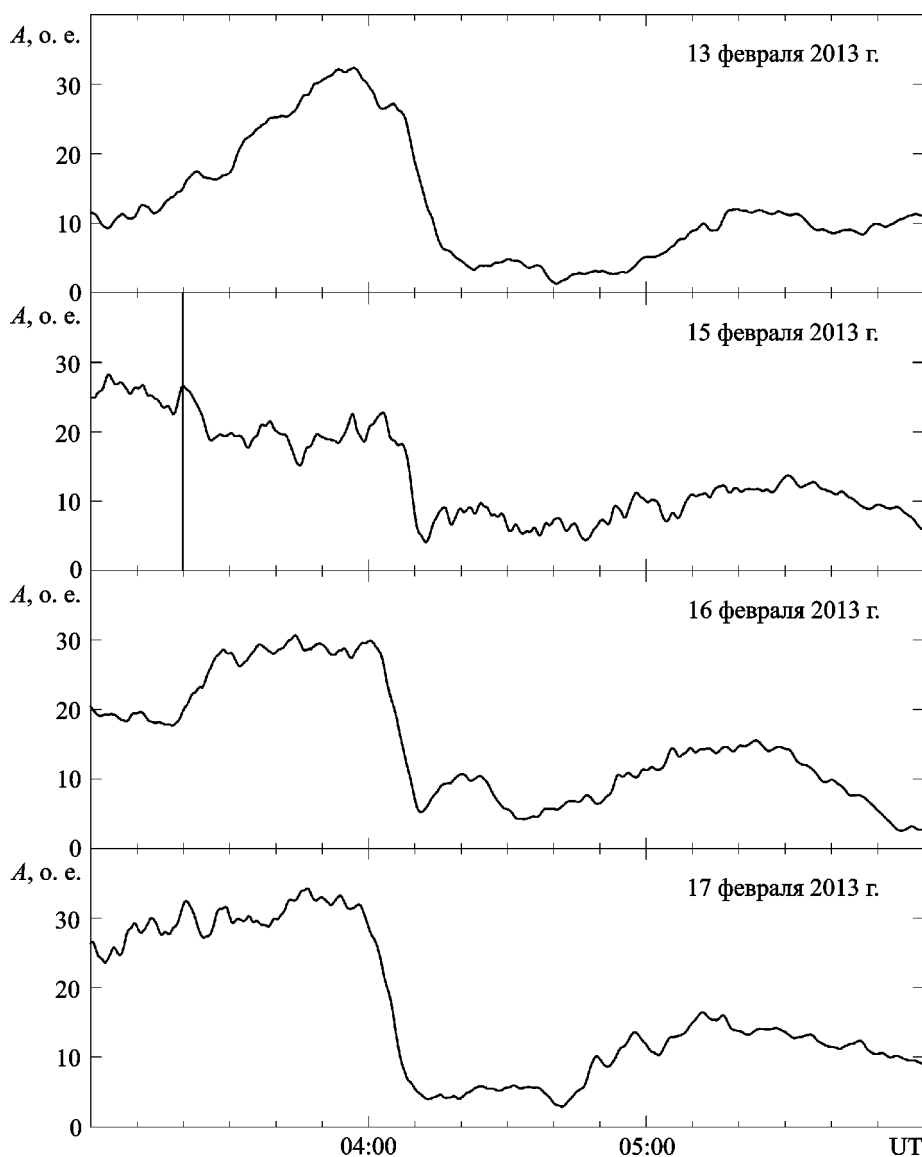


Рис. 2. Временные вариации амплитуды ионосферного сигнала частотой  $66\frac{2}{3}$  кГц станции РБУ (г. Москва) в день падения Челябинского тела (15 февраля 2013 г.) и в соседние дни

полуволны (см. рис. 4). Возник квазипериодический процесс с достаточно постоянным периодом  $T \approx 80$  мин и амплитудой около 0.5 МГц. Продолжительность процесса  $\Delta T$  была не менее 5 ч.

*Станция Прухониц.* Заметное увеличение параметра  $f_oF2$  15 февраля 2013 г. относительно его значений 14 и 16 февраля 2013 г. началось примерно 04:35 (см. рис. 4). Около 06:00 значение  $\delta f_oF2$  достигло  $-1.2$  МГц, далее  $\delta f_oF2$  постепенно увеличивалась до 1.1 МГц, а затем снова уменьшалась. Возник квазипериодический процесс с  $T \approx 135$  мин и амплитудой  $0.4 \div 0.6$  МГц при  $f_oF2 \approx 4 \div 6$  МГц соответственно. В сосед-

ние дни подобный цуг колебаний не наблюдался (см. рис. 3 и рис. 5).

Заметим, что значительный (до 2 МГц) положительный всплеск  $f_oF2$  наблюдался 15 февраля 2013 г. также с 10:30 до 12:00.

*Станция Юлиусрух.* Незначительное ( $\approx 0.2$  МГц) увеличение  $f_oF2$  15 февраля 2013 г. (по сравнению со значениями в контрольные дни) началось около 04:35, оно продолжалось примерно до 09:00 (см. рис. 4). В интервале времени 09:00–16:00 наблюдалось сильное колебание  $f_oF2$  с амплитудой  $0.5 \div 1.0$  МГц и  $T \approx 70$  мин. При этом  $\overline{f_oF2} \approx 7$  МГц. В контрольные дни также имели место сильные

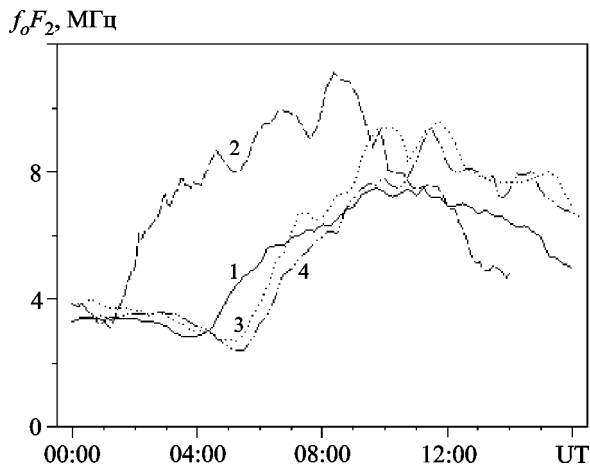


Рис. 3. Временные вариации частоты  $f_oF_2$  14 февраля 2013 г.: 1 – станция Москва; 2 – станция Алма-Ата; 3 – станция Прухониц; 4 – станция Юлиусрух

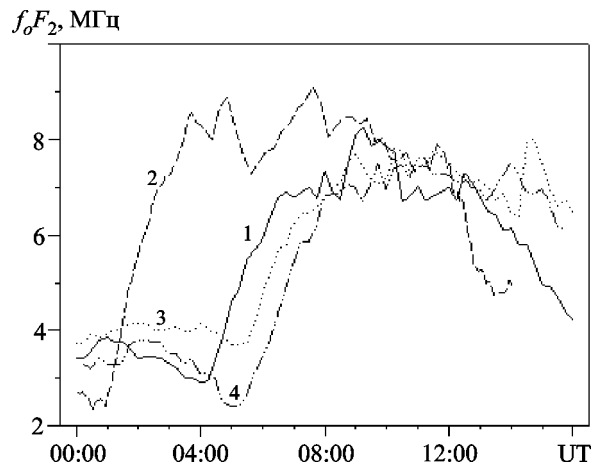


Рис. 5. Временные вариации частоты  $f_oF_2$  16 февраля 2013 г.: 1 – станция Москва; 2 – станция Алма-Ата; 3 – станция Прухониц; 4 – станция Юлиусрух

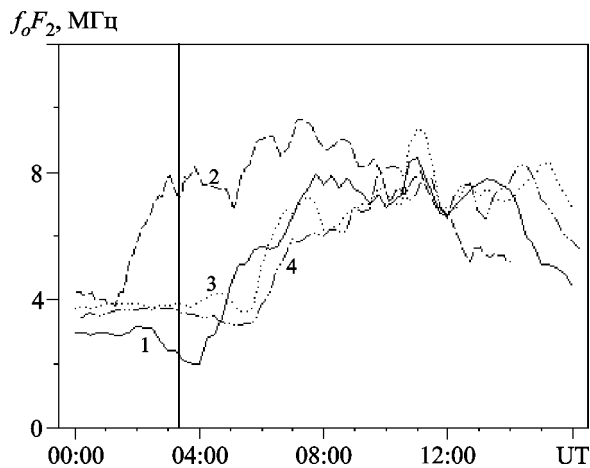


Рис. 4. Временные вариации частоты  $f_oF_2$  15 февраля 2013 г.: 1 – станция Москва; 2 – станция Алма-Ата; 3 – станция Прухониц; 4 – станция Юлиусрух

(до  $0.5 \div 1.0$  МГц) всплески  $f_oF_2$ , однако они не были квазипериодическими (см. рис. 3 и рис. 5).

### 3.3. Возмущения полного электронного содержания

Результаты временных вариаций  $\dot{N}_L(t) = dN_L/dt$ , где  $N_L$  – ПЭС в наклонном столбе, для станций TUMP, ARTU и TRIM приведены на рис. 6, рис. 7 и рис. 8 соответственно.

Из рис. 6 можно видеть, что 15 февраля 2013 г. заметные вариации  $\dot{N}_L$  начались в 03:30, а закончились в 04:10. Они носили квазипериодический характер с периодом  $T \approx 10$  мин. Амплитуда колебаний  $\Delta \dot{N}_{Lm}$  достигала  $0.0015$  TECU/c ( $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ ).

На станции ARTU 15 февраля 2013 г. квазипериодические вариации  $\dot{N}_L(t)$  начались примерно в 03:38, а закончились в 04:40. Значение квазипериода составляло около 15 мин, а амплитуда достигала  $\Delta \dot{N}_{Lm} \approx 0.00075$  TECU/c (см. рис. 7).

Как видно из рис. 8, 15 февраля 2013 г. значительные вариации  $\dot{N}_L$  с амплитудой около  $0.001$  TECU/c и  $T \approx 15$  мин начались в 03:26, а закончились в 03:40. С 05:00 до 08:00 наблюдался следующий цуг колебаний с  $T \approx 20 \div 40$  мин и постепенно увеличивающейся амплитудой вариаций  $\dot{N}_L$  от  $0.0005$  до  $0.003$  TECU/c.

Важно, что в контрольные дни характер вариаций  $\dot{N}_L$  был иным (см. рис. 6–8).

### 3.4. Возмущения уровня геомагнитных пульсаций

Временные вариации уровня горизонтальных компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов  $T = 1 \div 1000$  с в контрольные дни 14 и 16 февраля 2013 г., а также в день падения Челябинского метеорита показаны на рис. 9 и рис. 10. Из рисунков можно видеть, что характер вариаций уровня геомагнитных пульсаций после падения космического тела существенно не изменился.

## 4. Обсуждение

Обсудим кратко временные вариации параметров радиосигналов и ионосферы, а также их связь с пролетом и взрывом Челябинского метеорита.

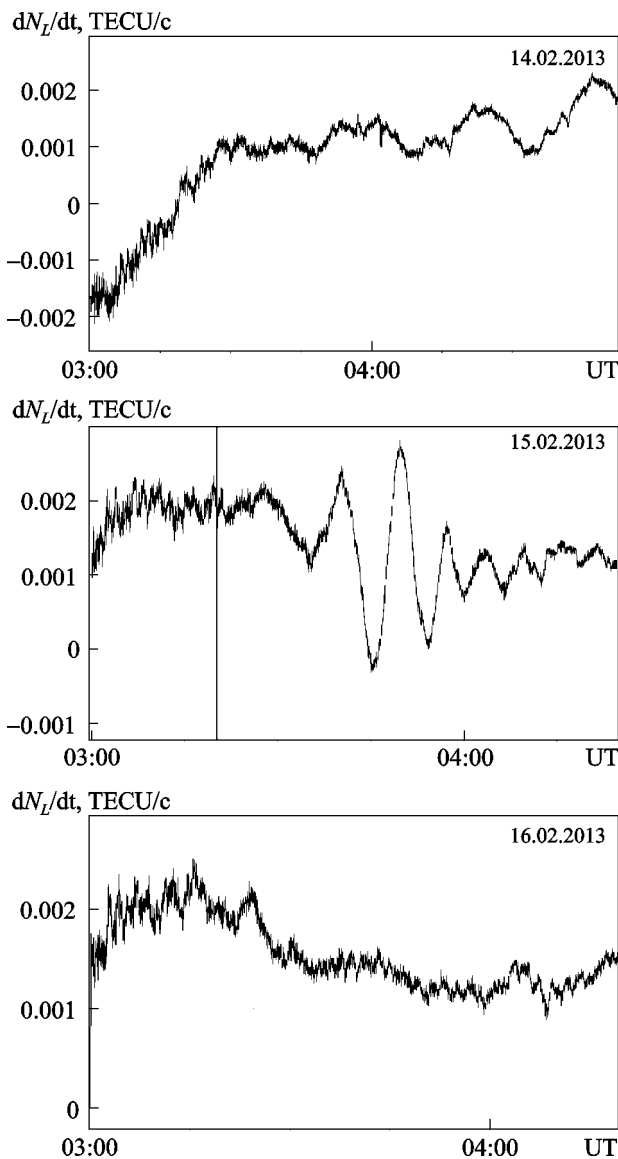


Рис. 6. Временные вариации  $\dot{N}_L$  для ИСЗ G6 (станция TUMP)

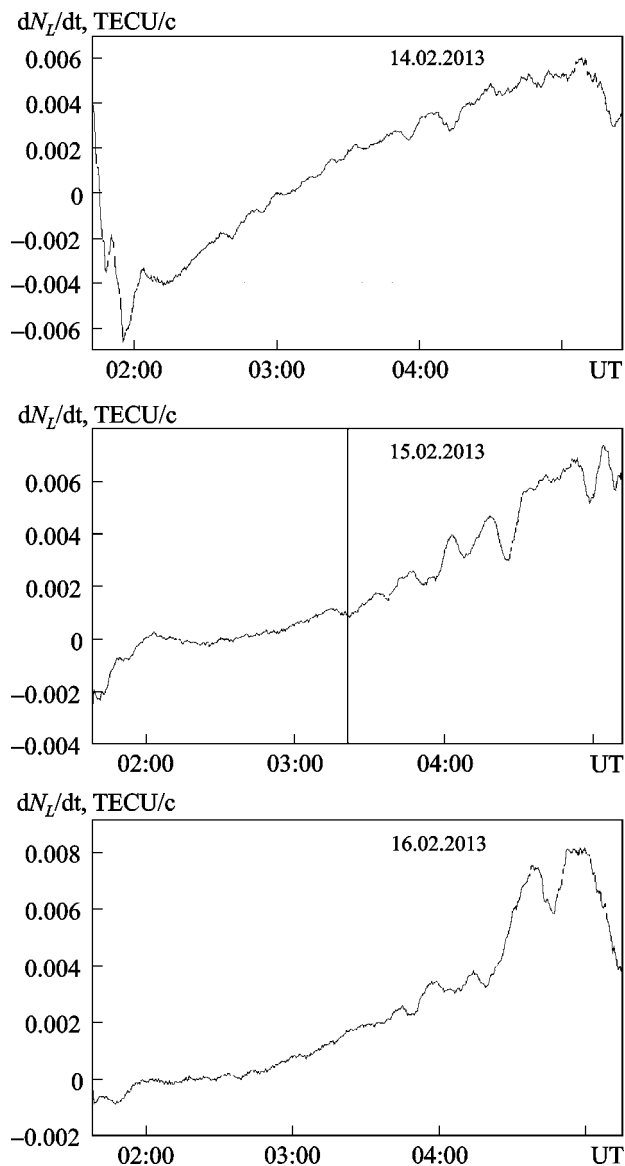


Рис. 7. Временные вариации  $\dot{N}_L$  для ИСЗ G16 (станция ARTU)

#### 4.1. Возмущения в нижней ионосфере

После взрыва космического тела возникло три цуга колебаний с временами запаздывания 46, 68 и 92 мин. Если ВВ распространилось вдоль границы атмосфера – нижняя ионосфера (высота отражения радиоволны с  $f = 66 \frac{2}{3}$  кГц около 65 км), время распространения акустического возмущения от взрыва до высоты упомянутой границы составляет  $\Delta t_0 \approx 2$  мин. Расстояние от эпицентра взрыва до проекции на поверхность Земли области отражения радиоволны  $R \approx 1575$  км. Тогда скорость распространения возмущения в горизон-

тальном направлении дается очевидным соотношением:

$$v = \frac{R}{\Delta t - \Delta t_0}, \quad (2)$$

где в общем случае  $R$  – расстояние от эпицентра взрыва до места расположения средств диагностики,  $\Delta t_0$  – время распространения возмущения от места взрыва до ионосферы. Из соотношения (2) для наблюдавшихся трех цугов колебаний имеем соответственно  $v_1 \approx 600$  м/с,  $v_2 \approx 400$  м/с и  $v_3 \approx 290$  м/с. Первый цуг мог быть сгенерирован утренним терминатором. Дело в том, что тер-

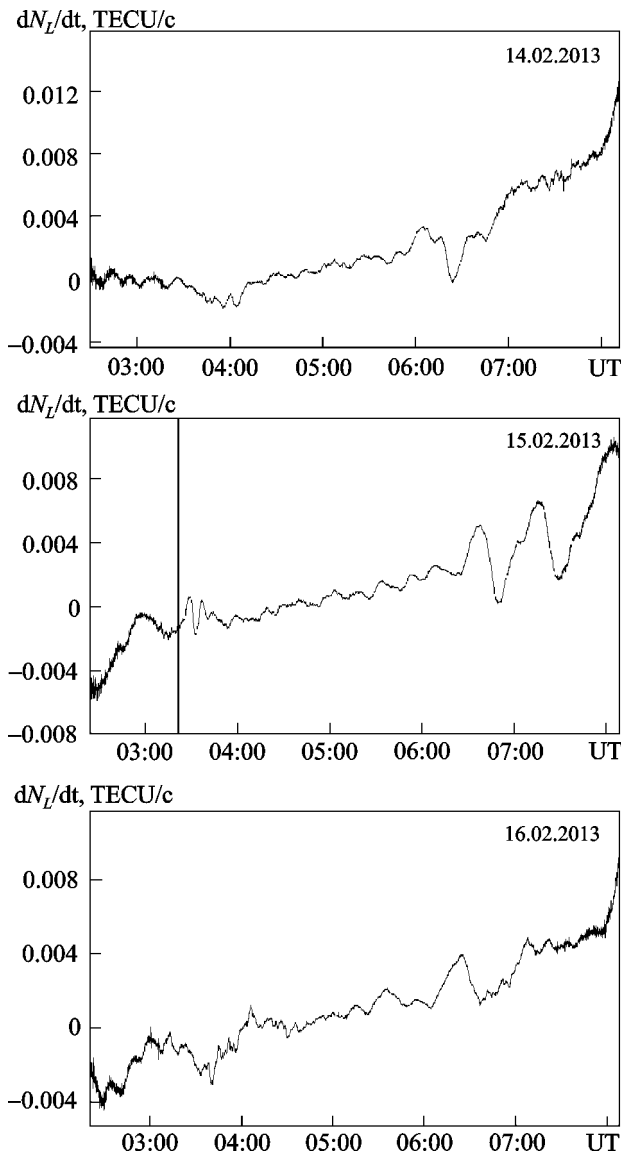


Рис. 8. Временные вариации  $\dot{N}_L$  для ИСЗ G18 (станция TRIM)

минатор проходил на высотах  $300 \pm 0$  км в интервале времени 03:00–04:45. В момент прохождения терминатора через область нижней ионосферы ( $z \approx 65$  км) 15 февраля 2013 г., а также в контрольные дни и наблюдался первый цуг.

Второй цуг, имеющий скорость распространения около 400 м/с, мог быть связан с ударно-волновым воздействием. Известно, что скорость распространения ударной волны всегда больше скорости распространения линейной волны того же типа.

Скорость  $v_3$  описывает распространение акустических волн с периодом около  $200 \div 230$  с. Волны с такими периодами распространяются в атмосфере на расстояния в несколько тысяч

километров по горизонтали, практически не поглощаясь (см., например, [6, 7]).

По максимальному отклонению фазы  $\Delta\varphi$  можно оценить сдвиг области отражения  $\Delta z$  зондирующей радиоволны с частотой  $66\frac{2}{3}$  кГц (с длиной радиоволны в вакууме  $\lambda \approx 4.5$  км; отличием фазовой скорости волны в волноводе Земля – ионосфера от скорости света в вакууме пренебрегаем). Будем исходить из того, что набег фазы связан с изменением длины траектории  $\Delta s$  следующим образом:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta s.$$

Из геометрических соображений следует, что

$$\Delta s = 2\Delta z \sin\beta = \frac{4z}{s} \Delta z \approx \frac{4z}{R_s} \Delta z,$$

где  $R_s$  – расстояние от радиопередающего устройства до радиоприемного устройства вдоль поверхности Земли,  $\beta$  – угол между траекторией радиоволны и горизонталью. Тогда

$$\Delta\varphi \approx \frac{8\pi}{\lambda} \frac{z}{R_s} \Delta z.$$

При  $R_s \approx 700$  км,  $z \approx 70$  км и  $\Delta\varphi = 7^\circ$  имеем  $\Delta z \approx 0.23$  км. Если  $\Delta\varphi = 4^\circ$ ,  $\Delta z \approx 0.13$  км. Таким значениям  $\Delta z$  соответствует относительное возмущение  $\delta_N$  концентрации электронов  $N$  в нижней ионосфере:

$$\delta_N = \frac{\Delta N}{N} \approx \frac{\Delta z}{L},$$

где  $L$  – характерный масштаб изменения  $N$  вблизи высоты отражения зондирующей радиоволны. При  $L \approx 5$  км,  $\Delta z \approx 0.13 \div 0.23$  км имеем  $\delta_N \approx 2.7 \div 4.6$  %.

Таким образом, есть основания полагать, что акустическая волна от взрыва метеороида вызвала квазипериодические вариации концентрации электронов в нижней ионосфере порядка нескольких процентов на расстоянии от эпицентра около 1575 км.

#### 4.2. Возмущения в максимуме слоя F2 ионосферы

Обсудим возмущения ионосферы в окрестности максимума слоя F2, наблюдавшиеся на ионозондах.



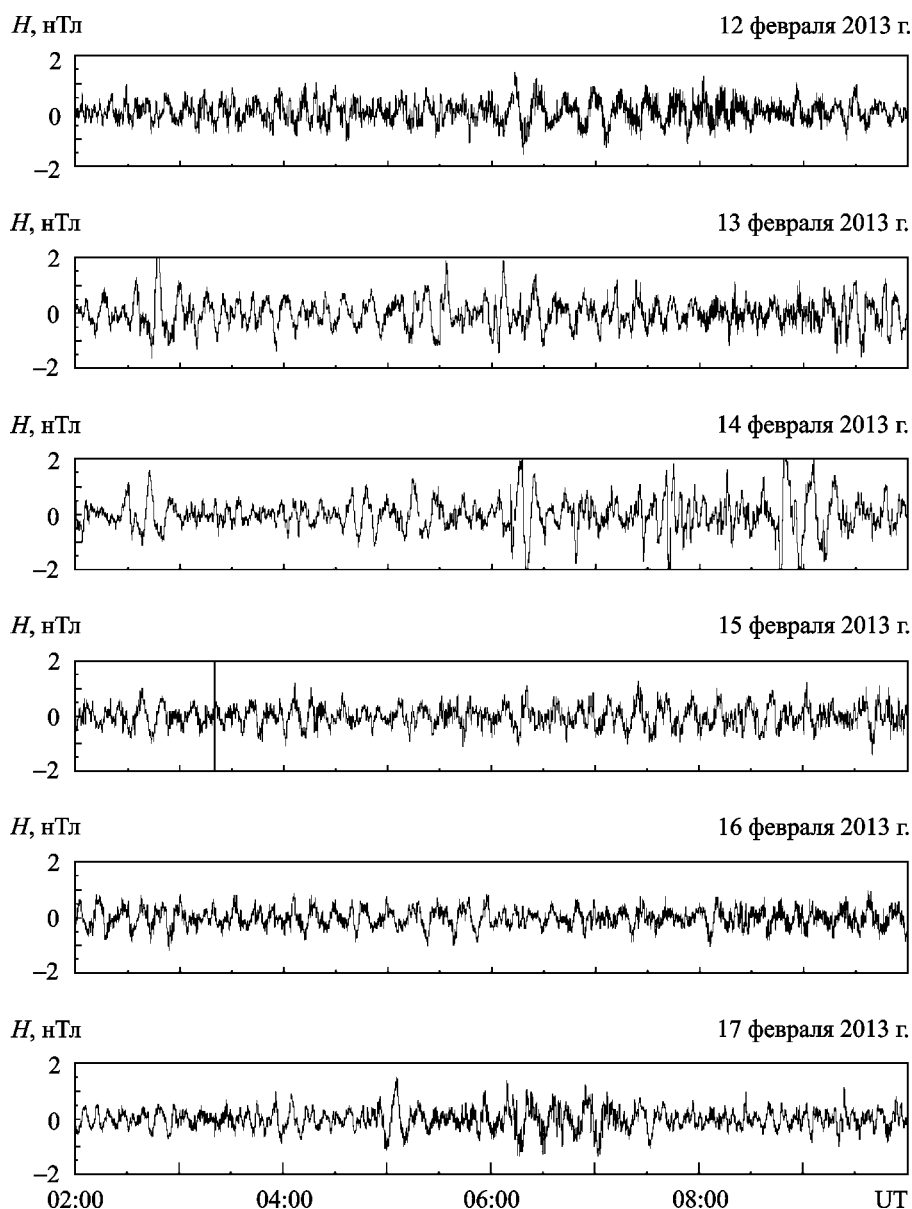


Рис. 9. Временные вариации  $H$ -компоненты геомагнитного поля 12–17 февраля 2013 г. в диапазоне периодов  $1 \div 1000$  с

Станция Москва. Спектральный анализ показал, что примерно в 04:00 15 февраля 2013 г. в ионосфере возник цуг колебаний с периодом около 135 мин, длительностью не менее 300 мин и амплитудой  $0.5 \div 0.6$  МГц при среднем значении  $f_oF2 \approx 4 \div 6$  МГц соответственно. Если этот цуг вызван взрывом метеороида, время запаздывания реакции ионосферы  $\Delta t \approx 40$  мин. При высоте взрыва  $z \approx 25$  км время распространения ВВ до слоя  $F2$  ионосферы составляет  $\Delta t_0 \approx 9$  мин. Тогда для  $R \approx 1510$  км,  $\Delta t \approx 40$  мин имеем  $v \approx 810$  м/с.

Относительное возмущение  $N$  оценим по следующей формуле:

$$\delta_N = \frac{\Delta N}{N} \approx \frac{2\delta f_oF2}{f_oF2}.$$

При  $\delta f_oF2 \approx 0.5 \div 0.6$  МГц и  $f_oF2 \approx 4 \div 6$  МГц имеем  $\delta_N \approx 25 \div 20$  % соответственно.

Станция Алма-Ата. Со взрывом метеороида, скорее всего, связано квазипериодическое изменение  $f_oF2$ , которое началось около 04:15. При этом  $\Delta t \approx 55$  мин, а  $v \approx 630$  м/с. Период колебания  $T \approx 1$  ч, а  $\Delta T \approx 5$  ч. Амплитуда колебания была около 0.5 МГц. При  $f_oF2 \approx 8 \div 9$  МГц имеем  $\delta_N \approx 11 \div 13$  %. И хотя относительная амплитуда колебаний в контрольные дни была при-

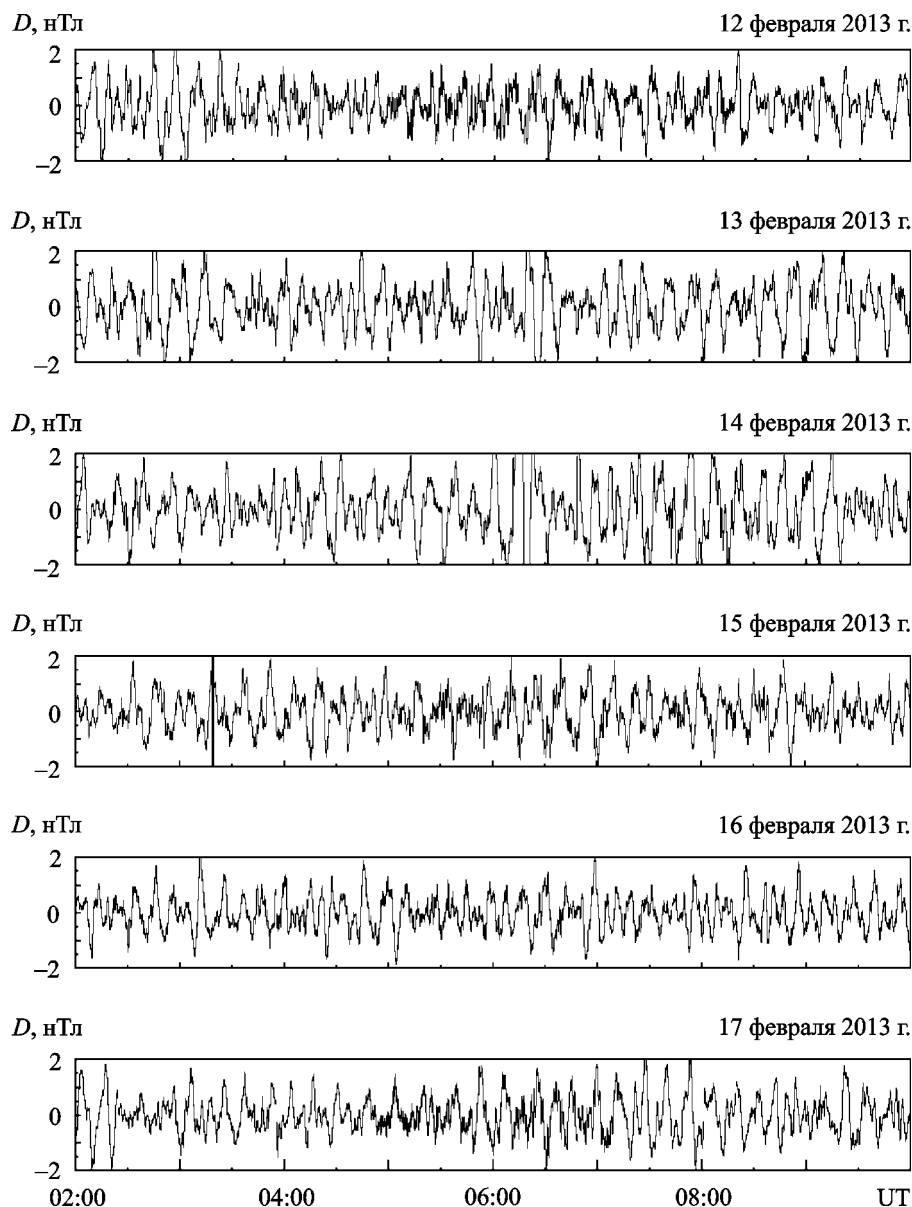


Рис. 10. Временные вариации  $D$ -компоненты геомагнитного поля 12–17 февраля 2013 г. в диапазоне периодов  $1 \div 1000$  с

мерно такой же, как и 15 февраля 2013 г., в пользу того, что колебание в этот день было вызвано взрывом метеороида, свидетельствует постоянство его периода и регулярность осцилляций в течение примерно 4 ч.

**Станция Прухониц.** Квазипериодическое увеличение  $f_oF2$  с периодом около 135 мин началось в 04:35. При этом  $\Delta t \approx 75$  мин, а  $v \approx 800$  м/с. Значение  $\delta_N \approx 20\%$ , поскольку  $\delta f_oF2 \approx 0.4 \div 0.6$  МГц и  $f_oF2 \approx 4 \div 6$  МГц.

**Станция Юлиусрух.** Если первое увеличение  $f_oF2$  в 04:35 связано со взрывом Челябинского тела,  $\Delta t \approx 75$  мин. При  $\Delta t_0 \approx 9$  мин и  $R \approx 3020$  км

имеем  $v \approx 760$  м/с. При  $\delta f_oF2 \approx 0.2$  МГц и  $f_oF2 \approx 3.5$  МГц получаем  $\delta_N \approx 11\%$ . Для более сильного колебания, наблюдавшегося в интервале времени 09:00–16:00,  $\delta_N \approx 14 \div 28\%$ .

**Сравнение результатов наблюдений.** Таким образом, параметры колебаний, последовавших за падением Челябинского тела, для станций Москва, Прухониц и Юлиусрух были близкими. В то же время они заметно отличались от параметров колебаний  $\delta f_oF2$  на станции Алма-Ата. Для этого есть несколько причин. Во-первых, реакция на падение тела на станциях Москва, Прухониц и Юлиусрух наложилась на реакцию

ионосферы на движение утреннего терминатора. На станции Алма-Ата событие пришлось на дневное время. Значения амплитуды  $\delta f_o F2$  на всех четырех станциях были почти одинаковыми (около 0.5 МГц), из-за отличий  $\overline{f_o F2}$  значение  $\delta_N$  в дневное время (станция Алма-Ата) оказалось примерно в 2 раза меньше. Во-вторых, различие в скоростях можно объяснить тем, что в переходное время суток (станции Москва, Прухониц и Юлиусрух) высота максимума ионизации больше, а значит и больше значение  $\nu$ . Кроме того, скорость внутренних гравитационных волн существенно зависит от скорости нейтрального ветра, а значит и от направления распространения этих волн. Все это объясняет заметное отличие параметров колебаний, наблюдавшихся на станции Алма-Ата, от аналогичных параметров на других станциях.

Для всех станций скорость ВВ была несколько меньше скорости звука на высотах максимума слоя F2 ионосферы. Хорошо известно, что этим свойством обладают гравитационные волны с периодами, заметно превышающими период Бранта–Вяйсаля [7, 8].

Таким образом, ионозондовые наблюдения позволили предположить, что за взрывом метеороида последовало ВВ, распространявшееся в слое F2 со скоростью около 800 м/с и относительной амплитудой  $\delta_N \approx 10 \div 20 \%$ . Период ВВ был 60 ÷ 135 мин. Такие параметры ВВ свойственны внутренним гравитационным волнам на высотах слоя F2 (см., например, [7, 8]). Возмущение  $\delta f_o F2$ , наблюдавшееся в интервале времени с 10:30 до 12:00, в принципе могло быть вызвано взрывом космического тела. Оно регистрировалось синхронно на значительно удаленных друг от друга станциях.

### 4.3. Квазипериодические возмущения ПЭС

Обсудим далее квазипериодические вариации  $\dot{N}_L$ , наблюдавшиеся после взрыва метеорита. Спутниковые наблюдения приводят к искажению периодов и амплитуд ВВ. Причин искажений две. Во-первых, колебания концентрации электронов  $N$  на разных высотах (дальностях) не являются синфазными. При интегрировании несинфазных возмущений  $N$  вдоль наклонного луча происходит частичное их ослабление и уменьшение периода. Во-вторых, вследствие движения точки пересечения радиолуча с уровнем максимума ионизации

ионосферы и возникающего эффекта Доплера происходит смещение частоты колебаний  $N$  в соответствии с соотношением

$$\omega' = \omega - \vec{k}\vec{w},$$

где  $\omega$  – истинная частота колебаний,  $\vec{k}$  – волновой вектор ВВ,  $\vec{w}$  – скорость движения ионосферной точки. Относительное изменение частоты

$$\delta_\omega = \frac{\omega - \omega'}{\omega} = \frac{w_{\parallel}}{\nu},$$

где  $w_{\parallel}$  – проекция вектора  $\vec{w}$  на вектор  $\vec{k}$ ,  $\nu$  – скорость волны. Для спутников GPS  $w_{\parallel} \approx 10 \div 100$  м/с, а  $\nu \approx 600 \div 800$  м/с. Тогда  $\delta_\omega \approx 0.01 \div 0.17$ . Изменением  $\omega$  и  $T$  за счет эффекта Доплера при использовании спутников GPS часто можно пренебречь. В то же время искажение периодов и амплитуд вследствие несинфазного сложения колебаний  $N$  является существенным. Оба параметра, как показывают модельные исследования, могут существенно уменьшиться (до 20 ÷ 30 % период и в 3 ÷ 5 раз амплитуда).

Время запаздывания квазипериодических возмущений  $N_L$  по отношению к моменту взрыва для станций TUMP и ARTU составило около 10 и 8 мин соответственно. Именно такое время необходимо для распространения волны плотности от высоты взрыва до ионосферы, точнее до ионосферной точки. Полагая, что пройденное волной расстояние равно 330 ÷ 400 км, получим, что средняя горизонтальная скорость ВВ  $\nu \approx 670 \div 690$  м/с.

Для станции TRIM положительный всплеск  $\dot{N}_L$ , сменившийся далее отрицательным всплеском, начался через 7 мин после взрыва. При расстоянии между областью взрыва и ионосферной точкой в 300 км получаем, что  $\nu \approx 710$  м/с. Эта скорость лишь немного больше оцененной выше (670 ÷ 690 м/с). Это может быть связано с тем, что на станции TRIM наблюдалась ярко выраженная реакция на ударно-волновое воздействие. Известно, что скорость слабых ударных волн несколько превышает скорость линейных волн той же природы.

Исходя из соотношения (1), оценим относительную амплитуду ВВ  $N_L$ . При  $\Delta \dot{N}_{Lm} \approx 0.00075 \div 0.0015$  TECU/с,  $T \approx 10 \div 15$  мин и  $\bar{N}_L \approx 10$  TECU имеем  $\delta = \Delta N_L / \bar{N}_L \approx 7.5 \div 22.5 \%$ . При этом  $\delta_N$  в 3 ÷ 5 раз больше  $\delta$ , т. е. около 30 ÷ 100 %.

#### 4.4. Возмущения уровня геомагнитных пульсаций

Анализ временных вариаций уровня  $H$ - и  $D$ -компоненты геомагнитного поля в диапазоне периодов  $1 \div 1000$  с не позволил обнаружить значительные возмущения геомагнитного поля. Это представляется несколько удивительным, поскольку пролет и взрыв Витимского болида, скорее всего, сопровождался усилением уровня геомагнитных пульсаций [9, 10]. Между тем энергия его взрыва была на два порядка меньше, а расстояние до магнитометра, напротив, в 2.8 раза больше.

Малость изменения уровня геомагнитного поля в диапазоне периодов  $1 \div 1000$  с может быть объяснена слабостью ионосферных токов на высотах динамо-области ионосферы ( $90 \div 150$  км) в утреннее время. Известно, что плотность этих токов  $j_0$  зависит прежде всего от концентрации электронов и скорости нейтрального ветра на указанных высотах. Действительно, при  $j_0 \approx 10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>,  $\delta_N \approx 10\%$  и эффективной толщине слоя с током  $\Delta z \approx 30$  км для амплитуды геомагнитных пульсаций имеем [9, 10]

$$\Delta B \approx \mu_0 \delta_N j_0 \Delta z \approx 0.4 \text{ нТл.}$$

Здесь  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Добавим, что взрыв Тунгусского тела также сопровождался изменением уровня главного геомагнитного поля на 30 нТл на расстоянии около 950 км от места взрыва (см, например, [10]). Важно, что продолжительность магнитного возмущения была около 3.5 ч. Энергия взрыва  $E_e$  Тунгусского тела была в  $30 \div 50$  раз больше энергии взрыва Челябинского метеороида. Если полагать, что возмущение главного геомагнитного поля пропорционально  $E_e^{1/3}/R$ , возмущение геомагнитного поля 15 февраля 2013 г. на расстоянии около 1700 км должно быть в  $6 \div 7$  раз меньше, чем при взрыве Тунгусского тела, и составлять около  $4 \div 5$  нТл. Такой эффект должен наблюдаться при помощи магнитометров, регистрирующих вариации уровня главного геомагнитного поля.

#### 5. Выводы

Проведенные при помощи наземных и спутниковых средств наблюдения за вариациями параметров зондирующих сигналов и уровня геомагнитного поля позволяют сделать следующие выводы.

1. Обнаружены проявления возмущений концентрации электронов на высотах нижней ионосферы ( $z \approx 65 \div 70$  км) на расстоянии от места взрыва около 1575 км, вызванные воздействием акустической волны с периодом  $200 \div 230$  с, имеющей скорость распространения  $290 \div 400$  м/с. Относительные возмущения концентрации электронов равнялись  $2.7 \div 4.6\%$ . Амплитуда колебаний высоты области отражения при этом составляла около  $0.1 \div 0.2$  км. Амплитуда колебаний фазы сигнала равнялась  $4^\circ \div 7^\circ$ .

2. Ионозондовые наблюдения позволили обнаружить вблизи максимума слоя F2 проявления внутренних гравитационных волн, распространявшихся со скоростью 800 м/с на расстояния не менее 3000 км. Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов составляла  $10 \div 20\%$ . Продолжительность возмущения была около  $4 \div 5$  ч.

Значительное возмущение  $f_oF2$  (до  $0.5 \div 1$  МГц), наблюдавшееся в интервале времени с 09:00 до 16:00 на сильно удаленных друг от друга ионозондах, в принципе, могло быть вызвано пролетом и взрывом метеороида. Такое возмущение следует отнести к долгоживущим.

3. Проведенный анализ временных вариаций ПЭС вблизи от места взрыва космического тела (на расстояниях в несколько сот километров) показал наличие квазипериодических ВВ со скоростью распространения около  $670 \div 690$  м/с, длительностью  $40 \div 60$  мин и периодом  $10 \div 20$  мин. Относительная амплитуда ВВ ПЭС была порядка  $10 \div 20\%$ .

4. Не обнаружены значительные возмущения уровня геомагнитного поля в диапазоне периодов  $1 \div 1000$  с.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yeomans D. Fireball and Bolide Reports [Электронный ресурс] // NASA/JPL Near-Earth Object Program Office. – Режим доступа: <http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>
2. Yeomans D. Additional Details on the Large Fireball Event over Russia on Feb. 15, 2013 [Электронный ресурс] // NASA/JPL Near-Earth Object Program Office. – March 1, 2013. – Режим доступа: [http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball\\_130301.html](http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html)
3. Greicius T. Asteroid 2012 DA14 – Earth Flyby Reality Check [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/asteroidflyby.html>
4. Chernogor L. F. Physical effects of Chelyabinsk meteorite in the atmosphere and geospace / In: Astronomy and Space

- Physics in Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference. – Kyiv (Ukraine). – 2013. – P. 82–84.
5. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Поднос В. А., Тырнов О. Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина – средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах / В книге: Космический проект “Ионосат-микро”. Под ред. С. А. Засухи, О. П. Федорова. – Киев: Академперіодика, 2013. – С. 160–182.
  6. Черногор Л. Ф. Механизмы генерации колебаний инфразвукового диапазона в верхней атмосфере под действием мощного периодического радиоизлучения // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 240–252.
  7. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
  8. Григорьев Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, № 1. – С. 3–25.
  9. Chernogor L. F. Oscillations of the Geomagnetic Field Caused by the Flight of Vitim Bolide on September 24, 2002 // Geomagnetism and Aeronomy. – 2011. – Vol. 51, No. 1. – P. 116–130.
  10. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф: Монография. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. – 556 с.

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

#### ЗБУРЕННЯ В ГЕОКОСМОСІ, ЩО СУПРОВОДЖУВАЛИ ПАДІННЯ МЕТЕОРИТУ “ЧЕЛЯБІНСЬК”

Наведені результати спостереження збурень у нижній і верхній іоносфері, а також геомагнітного поля в діапазоні періодів  $1 \div 1000$  с, що супроводжували проліт і вибух

космічного тіла “Челябінськ”. Ефекти поблизу місця прольоту метеороїда вивчалися за допомогою варіацій повного електронного вмісту, що реєструвалися GPS-радіоприймачами. Спостереження за іоносферою на відстанях  $\sim 2000 \div 3000$  км здійснювались за допомогою іонозондів і вимірювань параметрів сигналу з частотою  $66\frac{2}{3}$  кГц на трасі Москва–Харків. Виявлено прояви як акустичних, так і гравітаційних хвиль, що настали за вибухом космічного тіла. Не вдалося виявити суттєві зміни в рівні геомагнітних пульсацій (період  $1 \div 1000$  с).

L. F. Chernogor and K. P. Garmash

V. Karazin National University of Kharkiv, 4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

#### DISTURBANCES IN GEOSPACE ASSOCIATED WITH THE CHELYABINSK METEORITE PASSAGE

Observations of disturbances in the geomagnetic field in the  $1 \div 1000$  s period range and in the lower and upper ionosphere that followed the Chelyabinsk meteorite passage and explosion are presented. The effects in the vicinity of the Chelyabinsk meteorite path were studied through the variations in the total electron content recorded by the GPS satellites. Ionospheric observations at a distance of  $\sim 2000 \div 3000$  km were made using ionosonde data and the parameters of  $66\frac{2}{3}$  kHz radio signal along the Moscow–Kharkiv path. The manifestation of both acoustic and gravitation waves that followed the meteorite explosion were detected. Appreciable variations in the geomagnetic field were not revealed ( $1 \div 1000$  s period).

Стаття поступила в редакцію 27.06.2013