

Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов, В. Н. Федоренко, А. М. Цымбал

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ПОСЛЕДОВАВШИХ ЗА ПАДЕНИЕМ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА

Проанализированы временные вариации полного электронного содержания (ПЭС) в день падения Челябинского метеорита и в контрольные дни. Значения ПЭС получены с помощью GPS-спутников и наземных радиоприемников, отдаленных от места взрыва метеорита на расстояние 240–360 км. Обнаружены квазипериодические (волновые) возмущения ПЭС со временем запаздывания 12–20 мин, периодом 8–10 мин, продолжительностью 30–40 мин и относительной амплитудой примерно 0.6–3.5 %. В ударной волне амплитуда возмущений была в несколько раз большей. Средняя скорость распространения возмущений была близкой к 500 м/с. Такие параметры характерны для акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере.

ВВЕДЕНИЕ

Челябинский метеорит вторгся в атмосферу Земли 15 февраля 2013 г. в 03:20:26 UT (здесь и далее — всемирное время). Он двигался примерно с востока на запад, азимут был близок к 270° . Угол наклона траектории к горизонту при пролете над Челябинским регионом составлял около 20° . Начальный диаметр тела был близок к 18 м, начальная масса — 11 кт, начальная скорость — около 18.5 км/с [6, 7, см. также сайты <http://neo.jpl.nasa.gov/fireball/>, http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html, <http://newsroom.ctbto.org/2013/02/18russian-fireball-largest-ever-detected-by-ctbtos-infrasound-sensors>]. Найденные осколки космического тела свидетельствовали о том, что он представлял собой хондрит.

Основное взрывоподобное выделение энергии произошло вблизи высоты 25 км в точке со следующими географическими координатами: 54.8° с. ш., 61.5° в. д. Энергия взрыва была близка к 10^{15} Дж, энергия ударной волны составляла около $0.6 \cdot 10^{15}$ Дж [6, 7]. По мере удаления ударной волны от области взрыва она постепенно ослабевала, превращаясь в акустико-гравитацион-

ную волну. Последняя, распространяясь во все стороны от места энерговыделения, возмущала атмосферное давление. Его квазипериодические вариации вызывали такие же вариации параметров ионосферной плазмы, и в первую очередь концентрации электронов N .

Как показывают теоретические расчеты, заметные возмущения N должны наблюдаться на расстояниях R в сотни и даже тысячи километров от места взрыва [6, 7].

Поскольку вторжение космического тела с последующим взрывом произошло неожиданно, целенаправленные измерения комплекса эффектов падения тела во всех средах (геосферах) оказались невозможными. Ожидаемые эффекты зарегистрированы лишь «дежурными» средствами. К ним относятся ИСЗ GPS, которые позволяют проводить практически непрерывный мониторинг ионосферы в глобальных масштабах.

Взаимодействию метеорных тел с атмосферой Земли традиционно уделяется большое внимание [2, 4, 8]. Мелкие космические тела производят эффекты в основном в метеорной зоне (высоты 80...120 км). Крупные тела, генерируя при полете ударную волну, способны создавать возмущения во всей ионосфере [3, 5]. Экспериментальных исследований ионосферных эффектов, возникающих при падении крупных (десятки

метров) тел, до настоящего времени не было. Это обусловлено малой частотой подобных событий (для тела, аналогичного Челябинскому метеориту, она составляет один раз в 65 лет [6, 7]).

Целью настоящей работы является изложение и истолкование результатов спутниковых наблюдений квазипериодических (волновых) возмущений в ионосфере, сопровождавших падение Челябинского метеорита.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Для радиопросвечивания ионосферных возмущений, вызванных падением Челябинского метеорита, в данной работе использовались сигналы спутников GPS. Последние оказались удобными для изучения пространственно-временной картины возмущений различной физической природы [1].

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

Перечень спутников и радиоприемников GPS, использованных в настоящей работе, приведен в табл. 1. Там же указаны географические координаты подыоносферных точек в момент начала и окончания изучаемого волнового возмущения (ВВ) (для краткости начальные и конечные координаты). При этом подыоносферные точки находились как вблизи, так и южнее, восточнее и севернее от области взрыва (рис. 1). На рис. 1 приведены расчетные траектории подыоносферных точек в период суток 15 февраля 2013 г. относительно станций наблюдения ARTU, TRIM и TUMP. Положение станций отмечено кружками, местоположение точки взрыва — крестиком.

Положение спутника на орбите определялось по навигационным данным того же дня. В качестве системы координат использовалась система координат с указанием северной широты и восточной долготы в градусах.

Заметим, что прямоугольная сетка координат сохраняет масштаб расстояний только по долготе. Для построения траекторий использовались спутники из табл. 1. Средняя высота ионизированного слоя, в котором формируется

ионосферная поправка, принималась равной 350 км. Так как период обращения GPS-спутника вокруг Земли составляет примерно 12 ч, то в течение суток спутник восходит дважды. Подыоносферные точки в процессе наблюдения ВВ удалялись от приемника на расстояния от нескольких сот до примерно тысячи километров. Высота спутников $z_s \approx 20180$ км, скорость движения $v_s = 3.8$ км/с.

Радиолуч от спутника к приемнику проходит область ионосферы, в которой формируется фазовое запаздывание сигнала. Пренебрегая, как обычно, толщиной этой области, заменим ре-

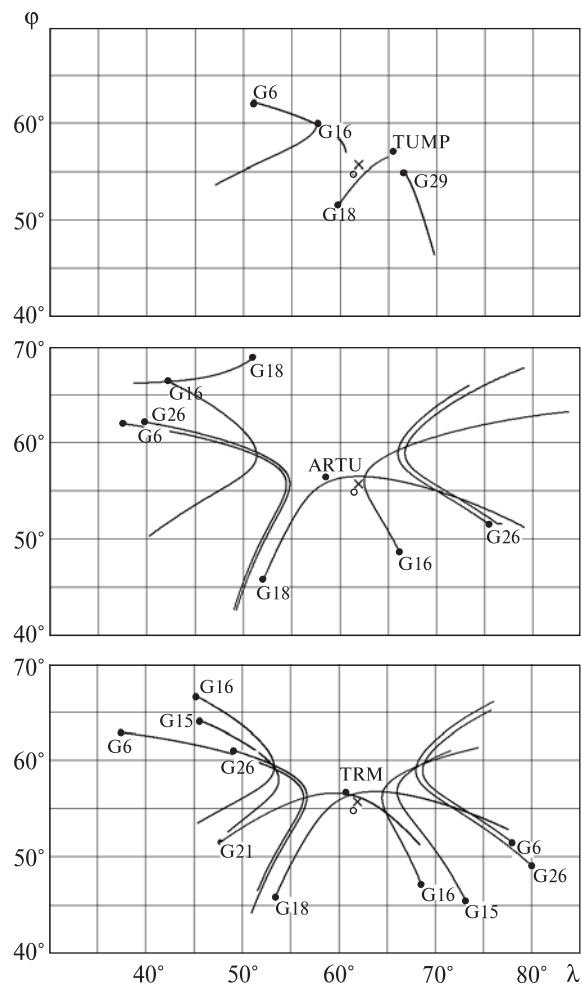


Рис. 1. Траектории подыоносферных точек спутников GPS 15 февраля 2013 г. Кружками отмечены положения пунктов наблюдения с указанием имени станции и крестиком указана точка взрыва

альную ионосферу тонким слоем, расположенном на высоте z_i . Точку пересечения радиолуча с высотой этого слоя назовем ионосферной. Проекция ионосферной точки на поверхность Земли известна как подыоносферная точка [1]. Примем, что ионосферная точка находилась на высоте $z_i \approx 350$ км. При этом ее скорость движения изменялась в пределах 60—500 м/с. Меньшее значение скорости отнесено к моменту прохождения спутника вблизи зенита для каждого приемника. Максимальная скорость достигается при восходе и заходе спутника.

Координаты GPS-приемников и их удаление R_0 от эпицентра взрыва приведены в табл. 2. Видно, что R_0 составляло 240...360 км. Приемники располагались северо-западнее и северо-восточнее от эпицентра взрыва.

Добавим, что из-за относительно малой скорости сканирования (~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 имело место уже после восхода Солнца в ионосфере над г. Челябинск, и эффекты утреннего терминатора уже не проявлялись, вариации ПЭС обусловлены в первую очередь пространственными структурами концентрации электронов. При этом характерный пространственный масштаб (длина волны возмущения) λ может быть оценен из следующей простой формулы:

$$\lambda = v_s \frac{z_i}{z_s} T, \quad (1)$$

где T — период наблюдаемых колебаний. Стро-

Таблица 1. Перечень ИСЗ GPS, начальные и конечные географические координаты волнового возмущения

| ИСЗ | Начальные координаты | | Конечные координаты | | Наименование GPS-приемника |
|-----|----------------------|----------------|---------------------|----------------|----------------------------|
| | широта, с. ш. | долгота, в. д. | широта, с. ш. | долгота, в. д. | |
| G6 | 51.1° | 59.8° | 55.0° | 57.0° | TRIM |
| | 49.4° | 59.0° | 53.0° | 57.0° | ARTU |
| | 55.8° | 60.3° | 58.2° | 58.8° | TUMP |
| G15 | 68.2° | 54.3° | 68.0° | 58.0° | TRIM |
| | 49.0° | 57.7° | 45.0° | 54.6° | ARTU |
| G16 | 50.7° | 58.2° | 45.8° | 54.7° | TRIM |
| | 54.3° | 58.8° | 51.3° | 56.8° | TUMP |
| G18 | 55.4° | 52.5° | 56.0° | 53.5° | ARTU |
| | 56.7° | 52.4° | 57.8° | 53.8° | TRIM |
| G21 | 58.9° | 56.5° | 63.1° | 55.8° | TRIM |
| G26 | 70.2° | 58.0° | 70.2° | 60.3° | TRIM |
| | 68.4° | 58.1° | 68.2° | 60.2° | ARTU |
| G29 | 68.2° | 51.8° | 70.0° | 46.0° | TUMP |

Таблица 2. Географические координаты GPS-приемников и расстояние до места взрыва метеорита (вдоль поверхности Земли)

| Наименование GPS-приемника | Широта, с. ш. | Долгота, в. д. | Расстояние, км |
|----------------------------|---------------|----------------|----------------|
| TRIM | 56.78° | 60.74° | 240 |
| ARTU | 56.43° | 58.56° | 260 |
| TUMP | 57.13° | 65.60° | 360 |

го говоря, λ представляет собой проекцию пространственного масштаба, которая изменяется при изменении траектории ИСЗ по отношению к направлению распространения ВВ.

Для обнаружения ВВ, сгенерированных пролетом Челябинского тела, анализировались временные вариации производной $\dot{N}_L(t)$. Для этого в каждой расчетной точке определялась не только величина N_L , но и оценка ее математического ожидания \bar{N}_L на временном интервале 3–5 мин. Оценка производной N_L по времени рассчитывалась как отношение приращения \bar{N}_L к интервалу времени δt между соседними измерениями. Для различных радиоприемников интервал времени между измерениями составлял 30, 5 или 1 с. Добавим, что погрешность оценки \dot{N}_L была не хуже 10^{-4} TECU/c. При этом погрешность оценки относительной амплитуды δ составила 10^{-5} c^{-1} , а $\delta_N \approx \Delta N/N \approx 0.3\text{--}0.5\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Рассмотрим примеры временных вариаций скорости изменения ПЭС в наклонном столбе N_L , равных $\dot{N}_L = dN_L/dt \approx \Delta N_L/\Delta t$. Для наблюдения возмущений, вызванных взрывом космического тела, важно отделить эффекты солнечного терминатора. Восход Солнца в месте взрыва наблюдался с 00:40 до 02:45 на высотах от 410 до 0 км соответственно.

Состояние космической погоды. Состояние космической погоды в основном определяется распределением концентрации заряженных частиц, скорости и температуры частиц солнечного ветра, измеренных на ИСЗ ACE, плотностей потоков протонов и электронов, измеренных на спутниках GOES-8 и GOES-12 соответственно, а также индексов геомагнитной активности (AE , D_{st} и K_p).

15 февраля 2013 г. концентрация частиц солнечного ветра не превышала $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, их скорость была близка к 400 км/с, температура — около $2 \cdot 10^4 \text{ К}$. Значения индекса D_{st} не опускались ниже -30 нТл , а $K_p \approx 0$ (вблизи момента падения метеорита).

Таким образом, состояние космической погоды было спокойным, отсутствовали возмущения, вызванные процессами на Солнце. Это благоприятствовало выделению возмущений в

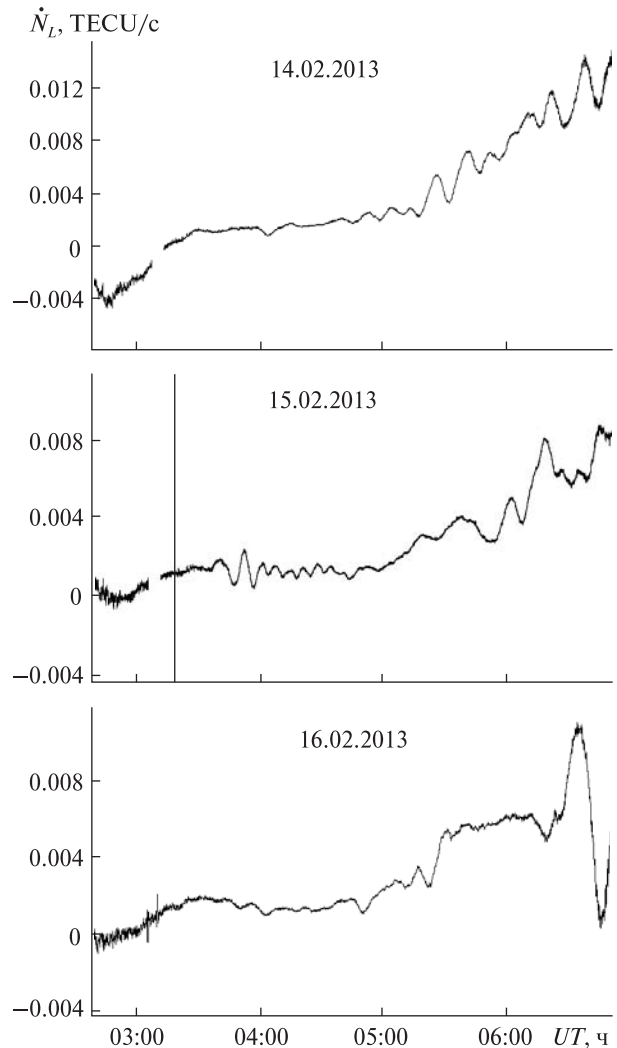


Рис. 2. Временные вариации \dot{N}_L для ИСЗ G6 (станция TRIM). Вертикальной линией здесь и далее показан момент взрыва космического тела

ионосфере, обусловленных падением Челябинского метеорита.

Станция TRIM. Временные вариации \dot{N}_L , полученные на станции TRIM для спутников G6 и G16, показаны на рис. 2 и 3. Видно, что примерно через 18 и 15 мин после взрыва метеорита для спутников G6 и G16 соответственно возникло колебание \dot{N}_L с периодом T , равным 15 и 13 мин, длительностью около 60 мин и относительной амплитудой $\delta = 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ($\delta = \Delta \dot{N}_{L\text{max}} / \bar{N}_L = 0.001 \text{ TECU}/10 \text{ TECU}$ ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$)). Характер поведения \dot{N}_L для спутника G6 отличает-

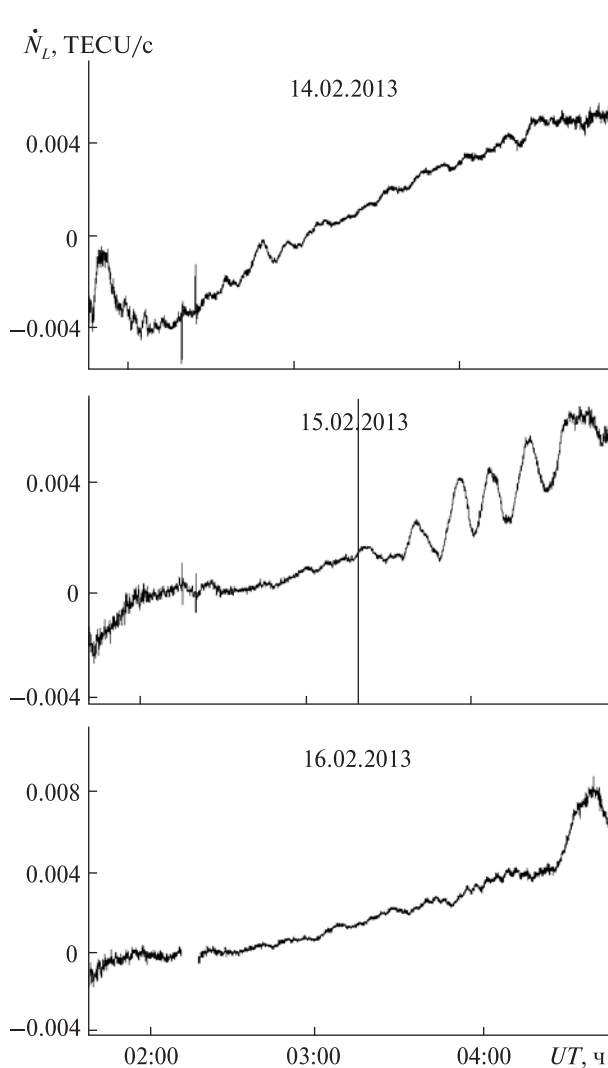


Рис. 3. Временные вариации \dot{N}_L для ИСЗ G16 (станция TRIM)

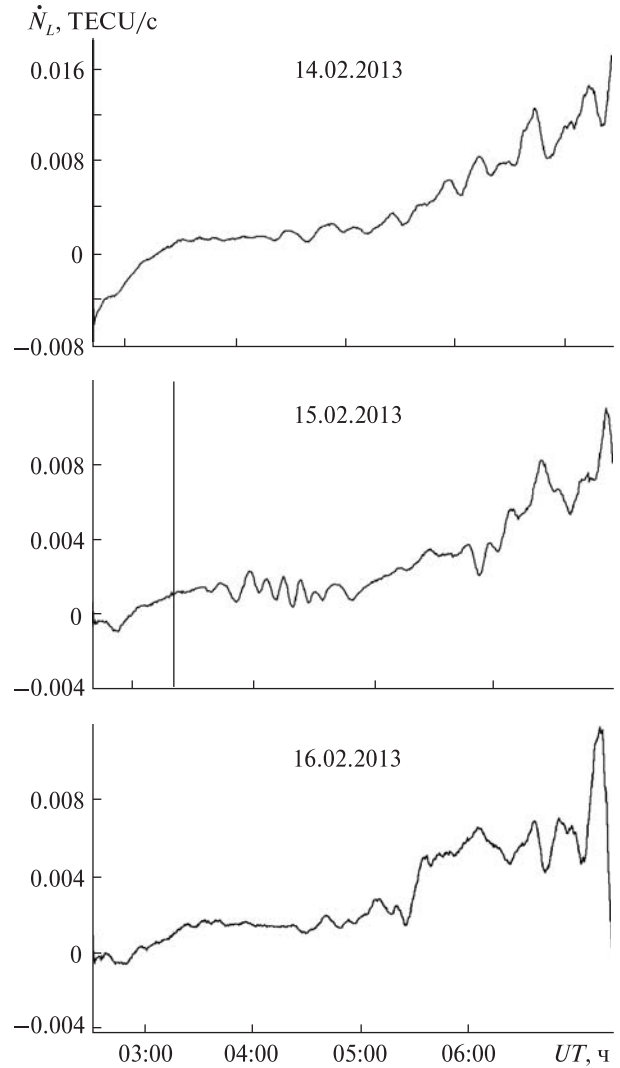


Рис. 4. Временные вариации \dot{N}_L для ИСЗ G6 (станция ARTU)

ся от аналогичного параметра для ИСЗ G16. Для первого спутника наблюдался сильный выброс \dot{N}_L сначала в сторону положительных значений, а затем в сторону отрицательных значений. Такое поведение свойственно ударным волнам. После указанных всплесков имело место квазипериодическое изменение \dot{N}_L , при этом $T \approx 8$ мин.

Примерно через 2 ч после описанного квазипериодического колебания также наблюдался еще один цуг колебаний, амплитуда которого была как больше, так и меньше амплитуды первого колебания (см. рис. 2).

Станция ARTU. Временные вариации \dot{N}_L показаны на рис. 4 и 5. Видно, что примерно через 18 мин после взрыва возникли квазипериодические вариации \dot{N}_L с периодом 8 и 16 мин соответственно. Продолжительность колебаний была равна приблизительно 60 и 45 мин, амплитуда — 0.0008 и 0.003 TECU/c соответственно. При $\bar{N}_L = 10$ TECU имеем $\delta \dot{N}_L = (8...30) \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$.

Для спутника G26 характер вариаций $\dot{N}_L(t)$ был подобным характеру вариаций, вызванных ударной волной.

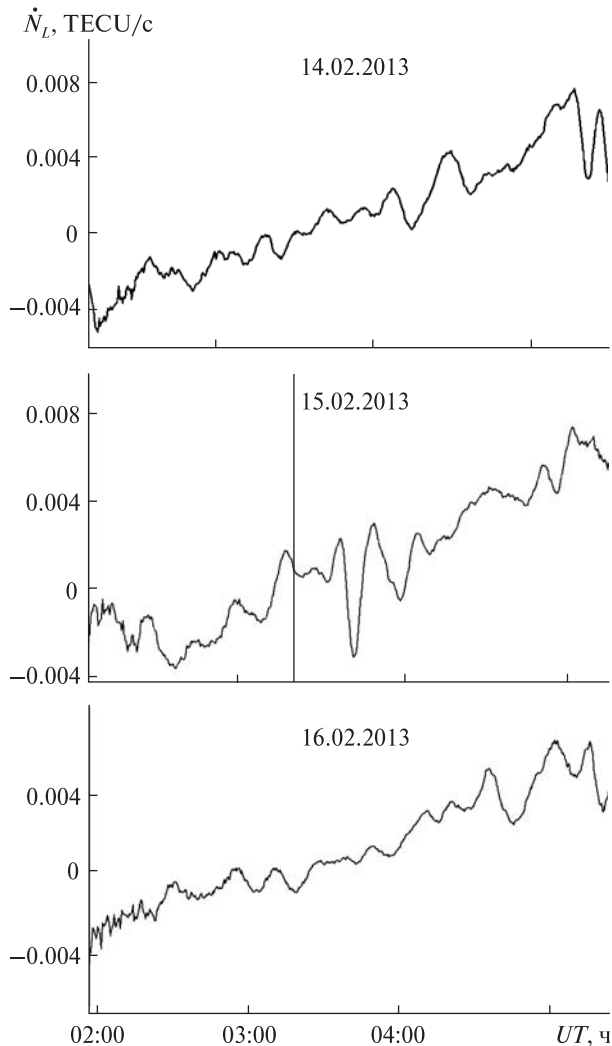


Рис. 5. Временные вариации \dot{N}_L для ИСЗ G26 (станция ARTU)

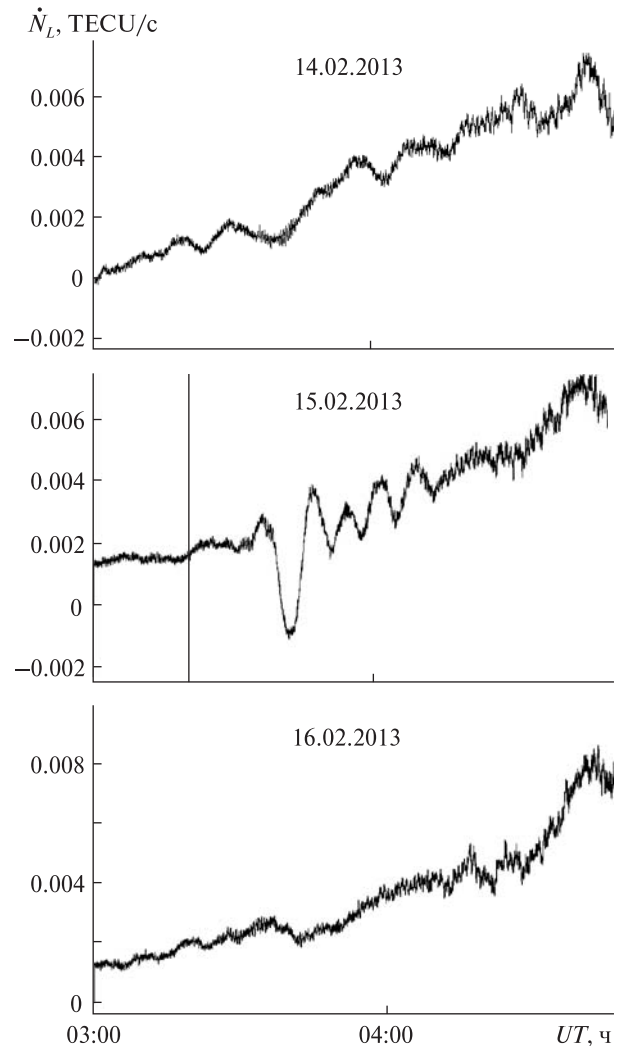


Рис. 6. Временные вариации \dot{N}_L для ИСЗ G16 (станция TUMP)

Станция TUMP. Примерно через 15–20 мин после взрыва метеорита возникли квазипериодические вариации $\dot{N}_L(t)$ с периодами около 8–10 и 25 мин (рис. 6 и 7) и длительностью 35–40 мин. Амплитуда колебаний достигала 0.002 и 0.0035 TECU/c. При $\bar{N}_L = 10$ TECU имеем $\delta \dot{N}_L = (2...3.5) \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$. В начале цугов наблюдалась реакция на прохождение ударной волны.

ОБСУЖДЕНИЕ

Скорости распространения волнового возмущения. На всех регистрациях $\dot{N}_L(t)$ для трех стан-

ций и восьми спутников наблюдались квазипериодические вариации ПЭС. Время запаздывания этих вариаций слабо зависело от расстояния между областью взрыва и GPS-приемником. Учитывая, что ионосферная точка находилась практически над приемником, по времени запаздывания легко оценить скорость распространения колебания от места взрыва до ионосферной точки.

Считается, что основной вклад в ПЭС дает область высот вокруг ионосферной точки (т. е. 200–500 км).

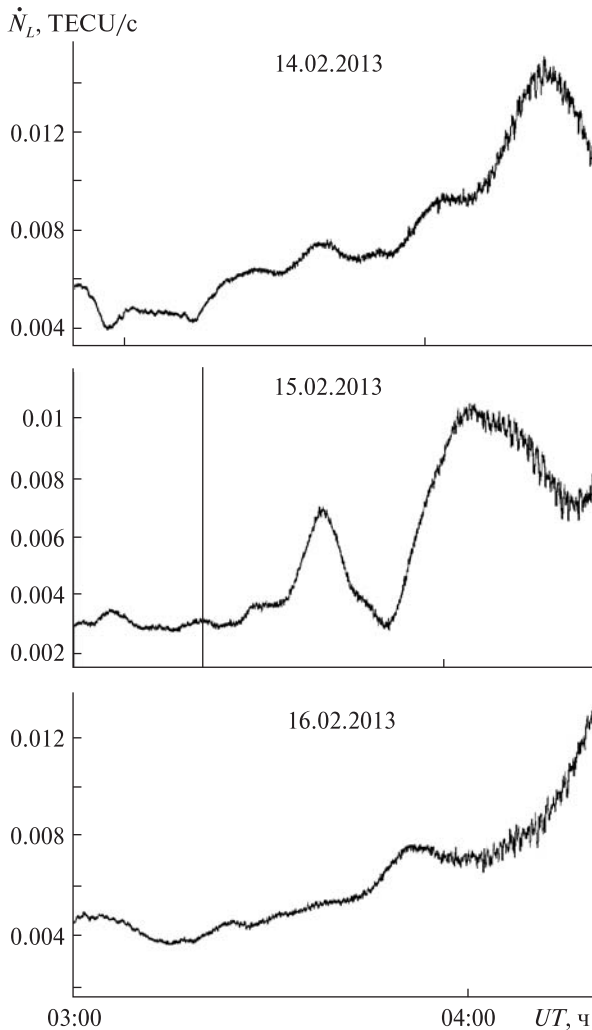


Рис. 7. Временные вариации \dot{N}_L для ИСЗ G29 (станция TUMP)

Скорость распространения ВВ в горизонтальном направлении дается очевидным соотношением

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

где R — удаление ионосферной точки от места взрыва, Δt — время распространения возмущения от области взрыва до высоты, где находится область ионосферы, дающая основной вклад в ПЭС (около 350 км).

Для обсуждаемых станций $R \approx 450...705$ км. Тогда при $\Delta t \approx 16...24.5$ мин из соотношения (2) имеем $v \approx 500...530$ м/с.

Заметим, что в ряде случаев ВВ имело форму ударной волны. Вследствие сферической расходимости ударной волны ее амплитуда достаточно быстро убывала по мере удаления от места взрыва. Поэтому скорость ударной волны лишь немного превышала скорость акустической волны. Далее отличие скоростей не учитывается, так как это было бы превышением точности оценки v .

Периоды волнового возмущения. В спутниковых наблюдениях возникают искажения величины периода колебаний ПЭС. К этому приводит движение ИСЗ, точнее ионосферной точки, и усреднение несинфазных по высоте (дальности) ВВ концентрации электронов вдоль наклонного радиолуча от спутника до приемника. Рассмотрим эти искажения периода несколько подробнее.

Измеренная частота колебаний ω' связана с реальной частотой ω периодического процесса следующим соотношением:

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

где \mathbf{k} — волновой вектор ВВ, \mathbf{w} — скорость движения ионосферной точки. Изменение частоты ВВ вызвано эффектом Доплера. Переходя к периодам $T' = 2\pi/\omega'$, получим, что

$$T = T' \left(1 + \frac{w_{\parallel}}{v} \right), \quad (3)$$

где $w = (\mathbf{k}\mathbf{w})/k$ — проекция \mathbf{w} на вектор \mathbf{k} , v — скорость ВВ. Полагая, что $w \approx 70$ м/с, $v \approx 700$ м/с, и используя (3), приходим к соотношению $(T - T')/T' \approx 0.1$. Таким образом, для спутников GPS изменением ω и T за счет эффекта Доплера часто можно пренебречь.

В ряде случаев более существенной является вторая причина. Поскольку в диапазоне высот 200—500 км начальная фаза ВВ существенно отличается на разных дальностях, при усреднении вдоль радиолуча происходит не только кажущееся уменьшение периода, но и уменьшение амплитуды ВВ. Кроме того, ВВ сильно локализовано по высоте. Оно занимает эффективный диапазон высот $\Delta z \approx 50...100$ км. Наши модельные расчеты показали, что и период ВВ из-за несинфазности колебаний на разных высотах могут уменьшиться на десятки процентов и более. Амплитуда ВВ $\delta_N = \Delta N/N$ обычно уменьшается в 1.3 раза, т. е. $\delta_N \approx 1.3\delta$.

По соотношению (1) оценим пространственный масштаб ВВ. Если наблюдаемый период колебаний $T = 8...10$ мин, то $\lambda \approx 32...40$ км. При $v = 500$ м/с на высоте $z_i = 350$ км имеем период ВВ $\lambda/v \approx 64...80$ с. Такие периоды свойственны инфразвуку на высотах F -области ионосферы.

Амплитуда волнового возмущения. По экспериментальным данным для всех станций $\dot{\delta} = (8...35) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Несинфазность колебаний на различных высотах привела к занижению $\dot{\delta}$ в 1.2...1.3 раза. Тогда реальное значение $\dot{\delta} = (1...4.6) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Необходимо также учесть, что δ примерно в 3...5 раз меньше δ_N [1]. С учетом этого $\dot{\delta} = (3...23) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

Наконец, при оценке величины $\dot{\delta}$ необходимо иметь в виду, что на нее существенно влияет ракурсный эффект [1].

Зная $\dot{\delta}$ и T , по соотношению

$$\delta = \frac{\dot{\delta} T}{2\pi} \quad (4)$$

можно вычислить δ . Оказалось, что при периоде $T = 8...10$ мин амплитуды δ и δ_N ВВ на расстоянии в несколько сотен километров от эпицентра взрыва не превышали 0.8...4.6 % и 2.4...23 % соответственно. В ударной волне $\dot{\delta}$ и квазипериод больше примерно в 2 и 1.5 раза соответственно. При этом с учетом [6] в три раза больше как δ , так и δ_N .

Важно, что амплитуда ВВ, последовавших за взрывом метеорита, была заметно больше, чем в контрольные интервалы времени.

Полученные параметры ВВ свидетельствуют о том, что взрыв Челябинского метеорита привел к генерации акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере. Параметры волн хорошо согласуются с параметрами, оцененными как теоретически, так и из наблюдений, проведенных в г. Харькове.

Сравнительный анализ. Представляет интерес сравнение параметров ВВ, сопровождавших падение Челябинского метеороида, с параметрами волн, генерируемых землетрясениями, мощными взрывами и стартами крупных ракет. Мониторинг ВВ, вызванных этими источниками, проведен в работе [1]. При магнитуде землетрясения $M \approx 7...8$ (энерговыведение порядка $10^{15}...10^{17}$ Дж $\approx 0.25...25$ Мт ТНТ) получено, что $T \approx 3...10$ мин,

$\delta \approx 1...3$ % на расстояниях 100...1000 км от эпицентра. Средняя скорость ВВ была близка к 700 м/с.

Наземный взрыв с энерговыведением 2 кт ТНТ привел к возникновению над эпицентром на ионосферных высотах N -образного возмущения концентрации электронов с $T \approx 3$ мин, $\delta \approx 7.5$ %. Скорость распространения ВВ была близка к 700 м/с [1].

При стартах мощных ракет (энерговыведение $10^{11}...10^{13}$ Дж $\approx 0.25...25$ кт ТНТ) ВВ имели следующие параметры: $T \approx 3...6$ мин, $v \approx 600...900$ м/с и $\delta \approx 1$ % [1].

Из приведенных данных следует, что разные по своей физической природе источники генерировали колебания инфразвукового диапазона с близкими периодами. Значения относительных амплитуд, естественно, зависели от величины энерговыведения и расстояния от источника до места наблюдения. Как правило, хорошо проявлялись особенности ударно-волнового воздействия.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлено, что пролет и взрыв Челябинского метеороида привел к генерации и распространению волнового возмущения с параметрами акустических волн ($T = 64...80$ с).
2. Длительность волнового цуга составляла не более 5-6 периодов.
3. Значения периодов наблюдаемых волнового возмущения составляли 8...10 мин.
4. Нескорректированные значения относительных амплитуд ВВ $\dot{\delta} = (8...35) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, $\delta_N = 2...1.7$ %. С учетом коррекции $\dot{\delta} = (1...4.6) \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, а $\delta_N = 2.4...23$ %. В ударной волне δ и δ_N примерно в три раза больше.
5. Скорость распространения ВВ составляла около 500 м/с.

Авторы благодарны Международной службе IGS, а также сотрудникам станций TRIM, TUMP за возможность использования первичных данных измерений.

1. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. — Иркутск, ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. — 480 с.
2. Бронитэн В. А. Физика метеорных явлений. — М.: Наука, 1981. — 416 с.

3. *Катастрофические* воздействия космических тел / Под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчинова. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. — 310 с.
4. *Кручиненко В. Г.* Математико-фізичний аналіз метеорного явища. — К.: Наук. думка, 2012. — 294 с.
5. *Черногор Л. Ф.* Физика и экология катастроф. — Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. — 556 с.
6. *Черногор Л. Ф.* Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск» // Инженер. физика. — 2013. — № 8. — С. 23—40.
7. *Черногор Л. Ф.* Физические эффекты пролета Челябинского метеорита // Доп. Нац. академії наук України. — 2013. — № 10. — С. 97—104.
8. *Чурюмов К. И., Гулиев А. С., Кручиненко В. Г., Чурюмова Т. К.* Кометно-астероидная опасность, истина и вымыслы. — Киев-Баку, 2012. — 178 с.

Стаття надійшла до редакції 05.07.13

*Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов,
В. М. Федоренко, А. М. Цимбал*

СУПУТНИКОВІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ІОНОСФЕРНИХ ЗБУРЕНЬ, ЩО ВІДБУЛИСЯ ПІСЛЯ ПАДІННЯ ЧЕЛЯБІНСЬКОГО МЕТЕОРИТУ

Проаналізовано часові варіації повного електронного вмісту (ПЕВ) у день падіння Челябінського метеориту

та в контрольні дні. Значення ПЕВ отримані за допомогою GPS-супутників та наземних радіоприймачів, віддалених від місця вибуху метеорита на відстань 240—360 км. Виявлені квазіперіодичні (хвильові) збурення ПЕВ з часом запізнення 12—20 хв, періодом 8—10 хв, тривалістю 30—40 хв і відносною амплітудою близько 0.6—3.5 %. В ударній хвилі амплітуда збурень була в декілька разів більшою. Середня швидкість поширення збурень була близькою до 500 м/с. Такі параметри мають акустико-гравітаційні хвилі у верхній атмосфері

*L. F. Chernogor, Yu. B. Milovanov,
V. N. Fedorenko, A. M. Tsymbal*

SATELLITE OBSERVATIONS OF IONOSPHERIC DISTURBANCES WHICH FOLLOWED THE CHELYABINSK METEORITE PASSAGE

The GPS TEC data obtained during the Chelyabinsk meteorite passage and on reference days were examined. The GPS receivers were located at 240—360 km away from the meteorite explosion. Quasi-periodic (wave-like) oscillations in TEC with time delays of 12—20 min, periods of 8—10 min, durations of 30—40 min, and amplitudes of 0.6—3.5 % were detected. The middle speed of propagation of these disturbances was approximately 500 m/s. Such parameters belong to acoustic-gravity waves in the upper atmosphere.