

УДК 533.6.011.6 + 523.682, 550.388

Л. Ф. Черногор¹, В. В. Барабаш²

¹Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина
пл. Свободы 4, Харьков, 61022
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

²Институт ионосферы Национальной академии наук Украины и МОН Украины
ул. Червонопрапорна 16, Харьков, 61002

Ионосферные возмущения, сопровождавшие пролет челябинского тела

По данным сети ионозондов, расположенных на расстояниях около 1500—3100 км от места падения метеорита «Челябинск», проанализированы ионосферные возмущения на высоте около 300 км, которые последовали за пролетом и взрывом космического тела. Установлено, что падение метеороида сопровождалось генерацией гравитационных волн в нейтральной атмосфере и перемещающихся ионосферных возмущений. Скорость последних была около 600—700 м/с, период 70—135 мин, а амплитуда относительных возмущений концентрации электронов составляла 10—20 %. В течение 6—7 ч в ионосфере наблюдались волновые возмущения концентрации электронов с относительной амплитудой 10—20 %, которые могли быть вызваны долгоживущими вихрями в верхней атмосфере.

ІОНОСФЕРНІ ЗБУРЕННЯ, ЯКІ СУПРОВОДЖУВАЛИ ПРОЛІТ ЧЕЛЯБІНСЬКОГО ТІЛА, Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. — За даними мережі іонозондів, розташованих на відстанях близько 1500—3100 км від місця падіння метеорита «Челябінськ», проаналізовано іоносферні збурення на висоті близько 300 км, що слідували за прольотом і вибухом космічного тіла. Встановлено, що падіння метеороїда супроводжувалося генерацією гравітаційних хвиль в нейтральній атмосфері та рухомих іоносферних збурень. Швидкість останніх була близькою до 600—700 м/с, період 70—135 хв, а амплітуда відносних збурень концентрації електронів становила 10—20 %. Протягом 6—7 год в іоносфері спостерігалися хвильові збурення концентрації електронів з відносною амплітудою 10—20 %, які могли бути викликані довгоживущими вихорами у верхній атмосфері.

IONOSPHERE DISTURBANCES ACCOMPANIED THE CHELYABINSK BODY FLYING, by Chernogor L. F., Barabash V. V. — According to data of the network of ionosondes situated about 1500—3100 km from the place of meteorite “Chelyabinsk” fall, ionospheric disturbances at an altitude of about 300 km are analyzed. The meteoroid's fall was accompanied by the generation of gravitational waves in the neutral atmosphere and of travelling ionospheric disturbances. The velocity of the travelling ionospheric disturbances was about 600—700 m/s, the period was 70—135 min, and the amplitude of relative disturbances of electron concentration reached 10—20 %. Wave disturbances with a relative amplitude of electron concentration of 10—20 % which could be caused by long-living whirlwinds in the top atmosphere were observed during 6—7 hours.

ВВЕДЕНИЕ

Взрыв Челябинского космического тела над населенными пунктами, сопровождавшийся яркой вспышкой и грохотом, нашел резонансный отклик среди большого количества людей. Частично пострадали постройки, преимущественно окна, двери, стены и потолки. В Челябинске взрывом было выбито около 20 тыс. м² оконных стекол. В Челябинской области пострадало от мелких ранений более 1.6 тыс. человек. Жертв, к счастью, не было. Нанесенный ущерб превышал 30 млн долл. США.

Исходные данные о Челябинском космическом теле представлены на сайте [http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение_метеорита_Челябинск].

Метеороид вторгся в атмосферу Земли 15 февраля 2012 г. в 03:20:26 УТ. Космическое тело двигалось примерно с востока на запад (азимут составлял около 270°) под углом к горизонту около 20°. Начальная масса тела $m_0 = 11$ кт, начальная скорость $v_0 = 18.5$ км/с, а начальный диаметр тела $d_0 = 18$ м. Найденные осколки метеорита свидетельствуют о том, что он был каменным. Точнее, космическое тело представляло собой хондрит типа LL5, в составе которого были металлическое железо, оливин и сульфиты. Остатки тела упали в озеро Чебаркуль и вблизи него.

Физика метеорных явлений, а также особенности падения крупных космических тел обсуждаются в целом ряде работ [2, 3, 8, 9, 13, 17, 26]. Принципиальной особенностью является генерация сильной ударной волны крупными телами.

В работах [18, 19, 22—25, 28, 29] теоретически оценены основные физические эффекты, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. При этом использовалась теория, изложенная в книгах [3, 8, 9, 17]. В работах [19, 23] показано, что основное энерговыделение величиной около 0.2 Мт ТНТ имело место вблизи высоты 25 км, где скорость потери массы была порядка 10 кт/с, энергия оптического излучения достигала нескольких сотен тераджоулей. В работах [19, 23]

предсказано, что падение тела должно было привести к возмущению не только нижней, но и верхней атмосферы, а также ионосферы на расстоянии не менее нескольких тысяч километров от места падения.

Результаты первых наблюдений ряда эффектов в ионосфере и геомагнитном поле, которые сопровождали падение Челябинского метеороида, описаны в работах [20—22]. Представляет несомненный интерес поиск возмущений в атмосфере и ионосфере на значительных удалениях от места падения Челябинского метеорита. Как известно, его вторжение в атмосферу Земли произошло неожиданно. Поэтому целенаправленные измерения всего комплекса физических эффектов падения космического тела во всех средах (во всех геосферах) оказались невозможными. Часть эффектов зарегистрировано «дежурными» средствами. К ним относится сеть ионозондов, которая позволяет проводить практически непрерывный мониторинг ионосферы почти в глобальных масштабах.

Целью настоящей работы является изложение результатов ионозондовых наблюдений возмущений в ионосфере, последовавших за пролетом и взрывом Челябинского метеороида, их истолкование и поиск волновых возмущений.

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ И СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Сеть ионозондов. Для оценки состояния ионосферы использовались ионограммы ионозондов, размещенных как северо-западнее от места взрыва метеороида (станция Москва, географические координаты 55.5 с. ш., 37.3 в. д.), так и юго-восточнее (станция Алма-Ата, 43.15 с. ш., 76.54 в. д.). Для оценки возможности распространения ионосферных возмущений на большие расстояния ($R > 3000$ км) привлекались результаты наблюдений на станциях Прухониц (50.0 с. ш., 14.6 в. д.) и Юлиусрух (54.6 с. ш., 13.4 в. д.). Ионограммы размещены на сайте [<http://umlcar.uml.edu/stationlist.html>].

Расстояние вдоль земной поверхности от места взрыва космического тела до станций Москва, Алма-Ата, Прухониц и Юлиусрух составляло около 1510, 1730, 3145 и 3020 км соответственно. Ионограммы на всех станциях, функционирующих в дежурном режиме, снимались каждые 15 мин. Лишь на станции Алма-Ата интервал времени t между регистрацией ионограмм составлял 5 мин. При этом статистическая погрешность оценки времени запаздывания возмущений составляет

$$\frac{t}{\sqrt{12}},$$

т. е. 3.5 мин (для станции Алма-Ата 1.4 мин).

Методика анализа. Основным параметром, который описывает состояние ионосферы вблизи максимума ионизации, является критическая частота ионосферного слоя F2:

$$f_0 F_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{e^2 N}{m}},$$

где e и m — заряд и масса электрона, e_0 — электрическая постоянная, N — концентрация электронов. Вариации N приводят к изменениям $f_0 F_2$. При этом

$$\frac{\Delta N}{N} = 2 \frac{\Delta f_0 F_2}{f_0 F_2}. \quad (1)$$

Соотношение (1) имеет место при $\frac{\Delta N}{N} \ll 1$. В общем случае

$$\frac{\Delta N}{N} = \left(\frac{\Delta f_0 F_2}{f_0 F_2} \right)^2, \quad (2)$$

где $\overline{f_0 F_2}$ — сглаженные либо невозмущенные значения $f_0 F_2$.

Аналізу подлежали временные вариации $f_0 F_2(t)$ 15 февраля 2013 г. и в контрольные дни 14 и 16 февраля 2013 г. Кроме $f_0 F_2(t)$, также анализировались временные вариации флуктуаций

$$f_0 F_2(t) - \overline{f_0 F_2(t)},$$

где $\overline{f_0 F_2(t)}$ — тренд, вычисляемый на интервале времени 180 мин со скольжением на 15 мин (для станции Алма-Ата — на 5 мин).

Далее зависимости $f_0 F_2(t)$ подвергались системному спектральному анализу с использованием взаимодополняющих оконного и адаптивного преобразований Фурье и вейвлет-преобразования [11, 16]. В последнем случае в качестве базисной функции применялась функция Морле

$$f(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cos t,$$

где t и ω — безразмерные время и частота. Такой вид вейвлета целесообразно использовать для обнаружения цугов колебаний [11].

Спектральный анализ осуществлялся в диапазоне периодов T 30...180 мин. Выбор минимального значения $T = 30$ мин обусловлено частотой получения ионограмм (одна ионограмма в 15 мин). Выбор максимального значения $T = 180$ мин объясняется тем, что такие периоды относятся еще к атмосферным гравитационным волнам. При $T > 180$ мин существенно сказываются суточные вариации $f_0 F_2$ и приливные колебания этого параметра (точнее, их высшие гармоники) [5].

Кроме спектрограмм, анализировались также энергограммы (распределение энергии колебаний по периодам). Целесообразность одновременного применения трех интегральных преобразований (оконного и адаптивного преобразований Фурье, а также вейвлет-преобразования) обоснована в работах [11, 16]. Первое из них обладает лучшей локализацией по времени, второе — по периодам. Вейвлет-преобразование более наглядно демонстрирует динамику спектров, трансформацию одних колебаний в другие.

Состояние космической погоды [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>]

Дата, февраль 2013 г.	W	$F_{10.7}$	K_p		D_{st} , нТл		AE , нТл	
			max	min	max	min	max	min
14	38	100	4	1	-11	-36	944	23
15	48	100	1	1	1	-19	328	20
16	54	103	4	1	15	-20	1219	23

Состояние солнечной активности оценивалось по числам Вольфа W и индексу $F_{10.7}$, а геомагнитной активности — по индексам K_p , D_{st} , AE (таблица). Видно, что состояние космической погоды характеризовалось как спокойное. Это обстоятельство облегчило поиск эффектов, вызванных падением космического тела.

ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ЧАСТОТЫ f_0F2

Станция Москва. Восход Солнца на высоте $z = 300$ км имел место в 03:00 UT (здесь и далее всемирное время), а на уровне поверхности земли — в 04:45. 14—16 февраля 2013 г. минимальное значение f_0F2 наблюдалось в интервале времени 03:30...04:30 (рис. 1). После этого отмечалось увеличение f_0F2 примерно от 3 до 7-8 МГц. После 10:00...11:00 в контрольные дни 14 и 16 февраля 2013 г. имело место постепенное уменьшение f_0F2 . На регулярный ход $f_0F2(t)$ накладывались флуктуации с отклонением, как правило, в несколько десятых долей мегагерц. В день падения метеорита уровень флуктуаций (амплитуда колебаний f_0F2) увеличился. Заметные отклонения от регулярного хода $f_0F2(t)$ начались примерно в 04:00 (увеличилась глубина провала). Их уровень существенно возрос в интервале времени с 07:00 до 14:00 (см. рис. 1, рис. 3, б). Амплитуда выбросов f_0F2 достигала 1 МГц. Наблюдалось квазипериодическое изменение f_0F2 с периодом $T = 135$ мин. В контрольные дни подобный квазипериодический процесс не наблюдался (см. рис. 1). Кроме того, уменьшение f_0F2 после 10:00...11:00, имевшее место в контрольные дни, отсутствовало до 14:00.

Станция Алма-Ата. Восход Солнца на высоте 300 км наблюдался в 00:20, а на высоте $z = 0$ — в 02:00. Ночные значения f_0F2 не превышали 4 МГц (рис. 1). Примерно после 01:00 значения f_0F2 стали увеличиваться от ночных значений до 8—10 МГц. На регулярный ход $f_0F2(t)$ накладывались флуктуационные изменения с отклонением до 1 МГц. В день падения метеорита заметное изменение f_0F2 началось примерно в 04:00—04:15. Возможно, оно заключалось в подавлении существовавшего до этого квазипериодического процесса. Скорее

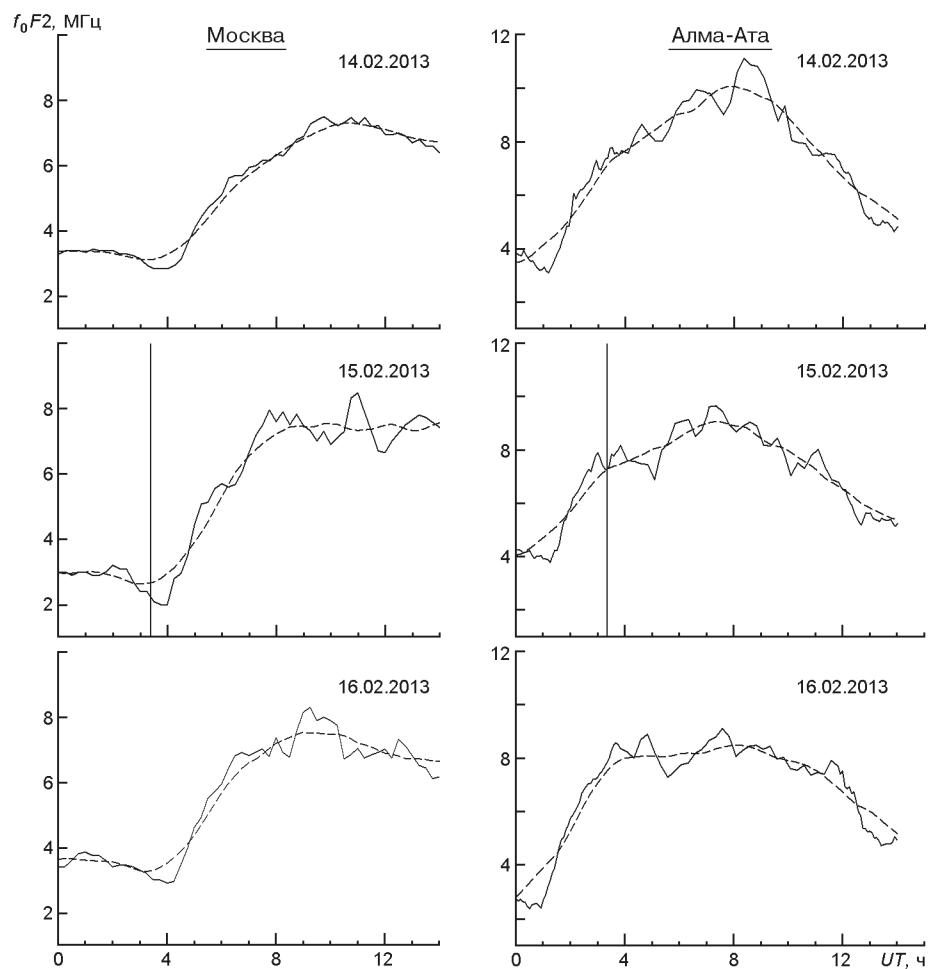


Рис. 1. Временные вариации f_0F2 для станций Москва и Алма-Ата. Здесь и далее вертикальной линией показан момент падения челябинского метеорита, а штриховой — скользящее среднее $f_0F2(t)$

всего, пришла отрицательная полуволна нового квазипериодического процесса с периодом 80—100 мин и амплитудой $f_0F2 \approx 0.5$ МГц ($f_0F2 \approx 8-9$ МГц). Этот процесс наблюдался в течение 4-5 ч. В контрольные дни также имели место существенные флуктуации f_0F2 , однако квазипериодические процессы были выражены менее четко.

Этот процесс наблюдался в течение 4-5 ч. В контрольные дни также имели место существенные флуктуации f_0F2 , однако квазипериодические процессы были выражены менее четко.

Станция Прухониц. Восход Солнца на высотах около 300 и 0 км имел место около 03:50 и 05:35 соответственно. Ночные значения f_0F2 были близки к 3.5—4 МГц (рис. 2). Примерно после 05:00 началось стремительное увеличение f_0F2 от ночных значений до 7—8 МГц. Кроме регулярного хода, наблюдались флуктуации f_0F2 , достигавшие 0.5...1 МГц. В день падения космического тела флуктуации критической частоты, начавшиеся примерно в 04:30...04:45, стали квазипериодическими с периодом $T = 135$ мин и амплитудой 0.4...

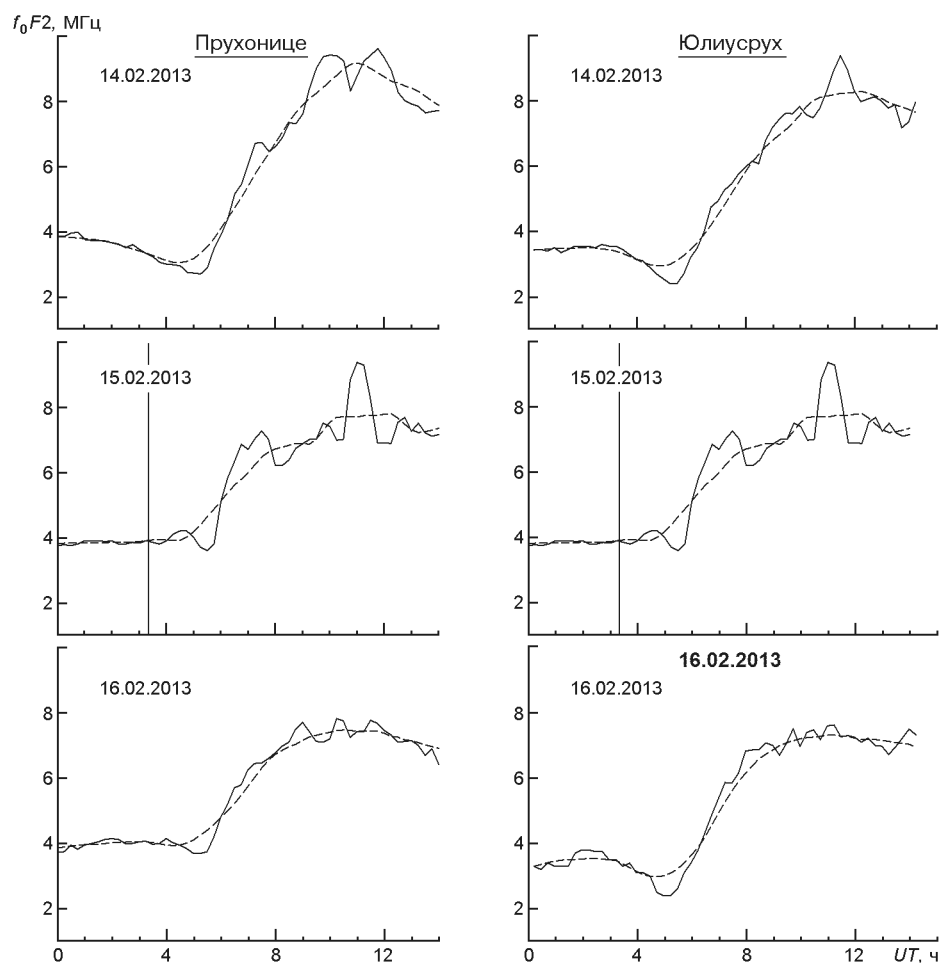


Рис. 2. То же для станций Прухонице и Юлиусрух

0.6 МГц. При этом $\overline{f_0F2} = 4 \dots 6$ МГц. Особенно сильный всплеск f_0F2 до 1.7 МГц отмечался около 11:00, т. е. практически тогда, когда подобный всплеск зафиксирован и на станции Москва (см. рис. 1). Заметим, что в контрольные дни подобный цуг колебаний не наблюдался.

Станция Юлиусрух. Восход Солнца на станциях Прухонице и Юлиусрух имел место примерно в одно и то же время. Ночные значения f_0F2 были близки к 3.5 МГц, минимальное значение этого параметра отмечалось около 05:00, после чего начался его быстрый рост до 7–8 МГц (рис. 2). Как и на других станциях, на регулярный ход $f_0F2(t)$ накладывались флуктуации f_0F2 с отклонением 0.3...0.5 МГц.

В день падения метеорита «Челябинск» около 04:30...04:35 началось незначительное (на 0.2 МГц) увеличение f_0F2 , которое продолжалось примерно до 09:00. С 09:00 до 16:00 отмечалось сильное колебание f_0F2 с периодом около 70 мин, длительностью $T = 5$ ч и амплитудой 0.5—1.0 МГц, при этом $\overline{f_0F2} = 7$ МГц. В контрольные дни также

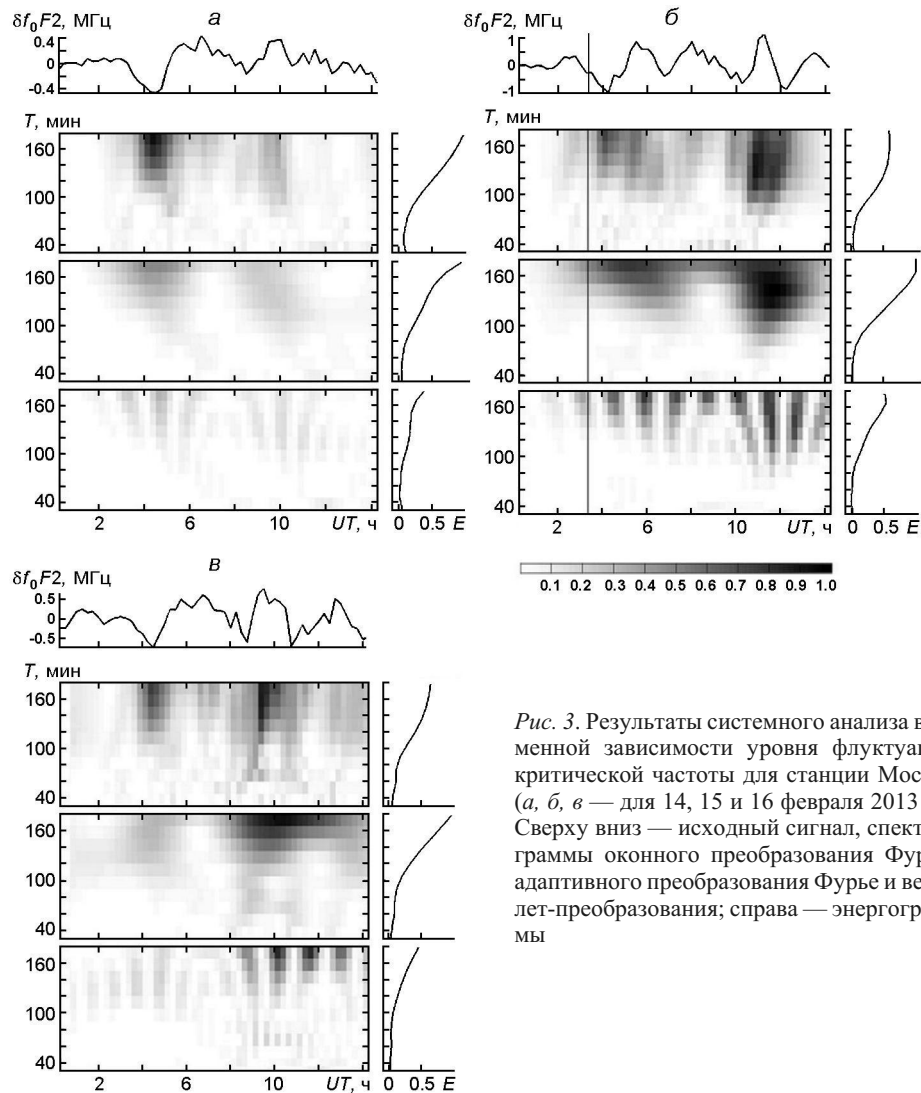


Рис. 3. Результаты системного анализа временной зависимости уровня флуктуаций критической частоты для станции Москва (а, б, в — для 14, 15 и 16 февраля 2013 г.). Сверху вниз — исходный сигнал, спектрограммы оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования; справа — энергограммы

наблюдались сильные (до 0.5—1 МГц) всплески f_0F2 , однако они не были квазипериодическими.

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Результаты системного спектрального анализа зависимости $f_0F2(t)$ для станции Москва приведены на рис. 3. Видно, что спектральные составы вариаций $f_0F2(t)$ в день падения метеорита (рис. 3, б) и в контрольные дни (рис. 3, а и в) существенно различались. Различия начались примерно в 04:00 и продолжались до 14:00. 15 февраля 2013 г. спектр флуктуаций был более узким, в нем преобладала составляющая с периодом около 160 мин. Амплитуда этой составляющей была в 2-3 раза больше, чем в контрольные дни.

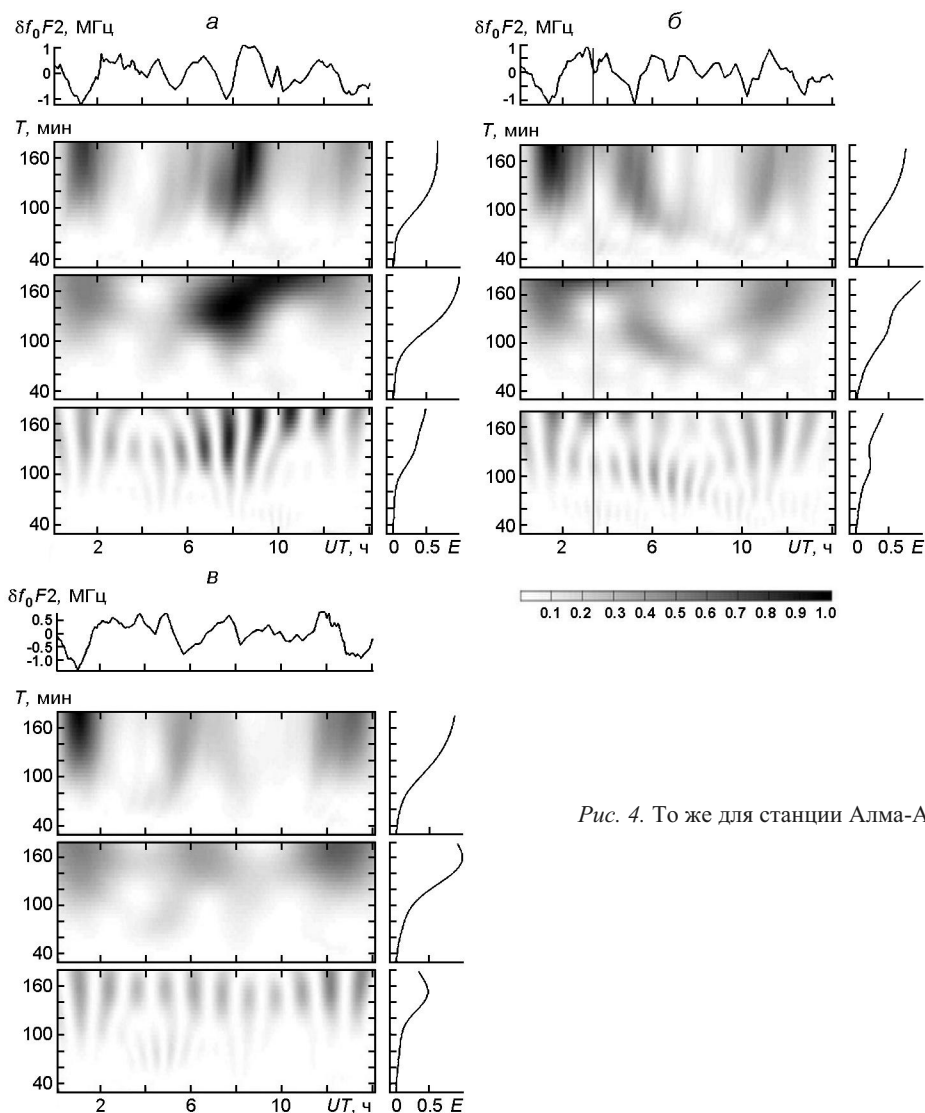


Рис. 4. То же для станции Алма-Ата

На рис. 4 приведены результаты системного спектрального анализа временных вариаций $f_0F2(t)$ для станции Алма-Ата. Из рис. 4, б видно, что спектральный состав флуктуаций критической частоты существенно отличался, начиная с интервала времени 04:00...05:00, в спектре флуктуаций $f_0F2(t)$ усилилась составляющая с периодом около 70—80 мин. Кроме этой составляющей, усилился также компонент с периодом $T = 100...120$ мин. В контрольные дни преобладали составляющие с периодом 140...160 мин.

Результаты системного спектрального анализа уровня флуктуаций критической частоты для станции Прухониц приведены на рис. 5. Видны существенные различия спектральных характеристик в день пролета космического тела и в контрольные дни 14 и 16 февраля 2013 г. В спектрах преобладали составляющие с $T = 140...180$ мин, а

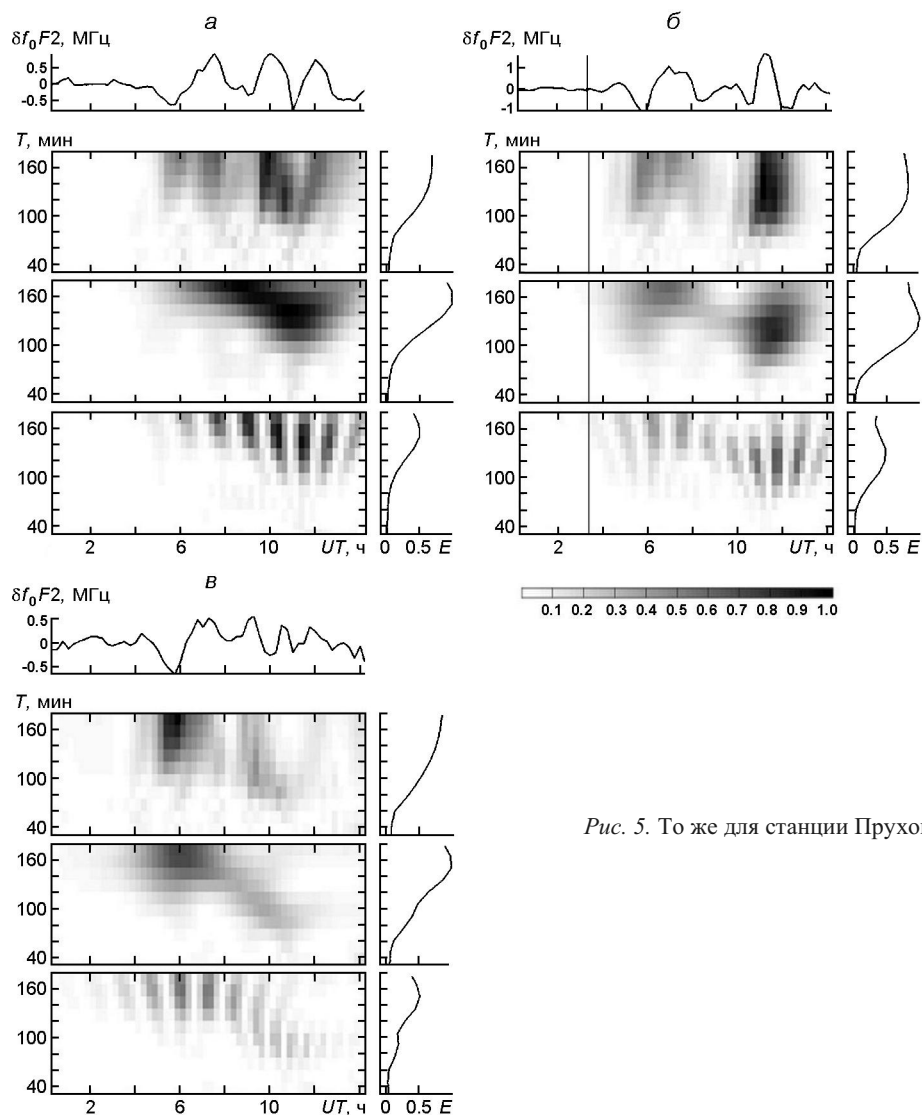


Рис. 5. То же для станции Прухониц

15 февраля 2013 г. — с $T = 100 \dots 140$ мин. В день падения метеорита амплитуда основного колебания была в 1.5–2 раза больше, чем в контрольные дни.

На рис. 6 приведены результаты системного спектрального анализа временной зависимости $f_0 F2(t)$ для станции Юлиусрух. Спектрограммы и энергограммы для 14, 15 и 16 февраля 2013 г. заметно различались. В день падения Челябинского тела усилились составляющие с периодами сначала 130–160, а затем и 60–80 мин. Их амплитуда была заметно больше (1.5–2 раза) амплитуды в контрольные дни. 14 и 16 февраля 2013 г. преобладали колебания с $T = 160 \dots 180$ мин, их амплитуда не превышала 0.5 МГц.

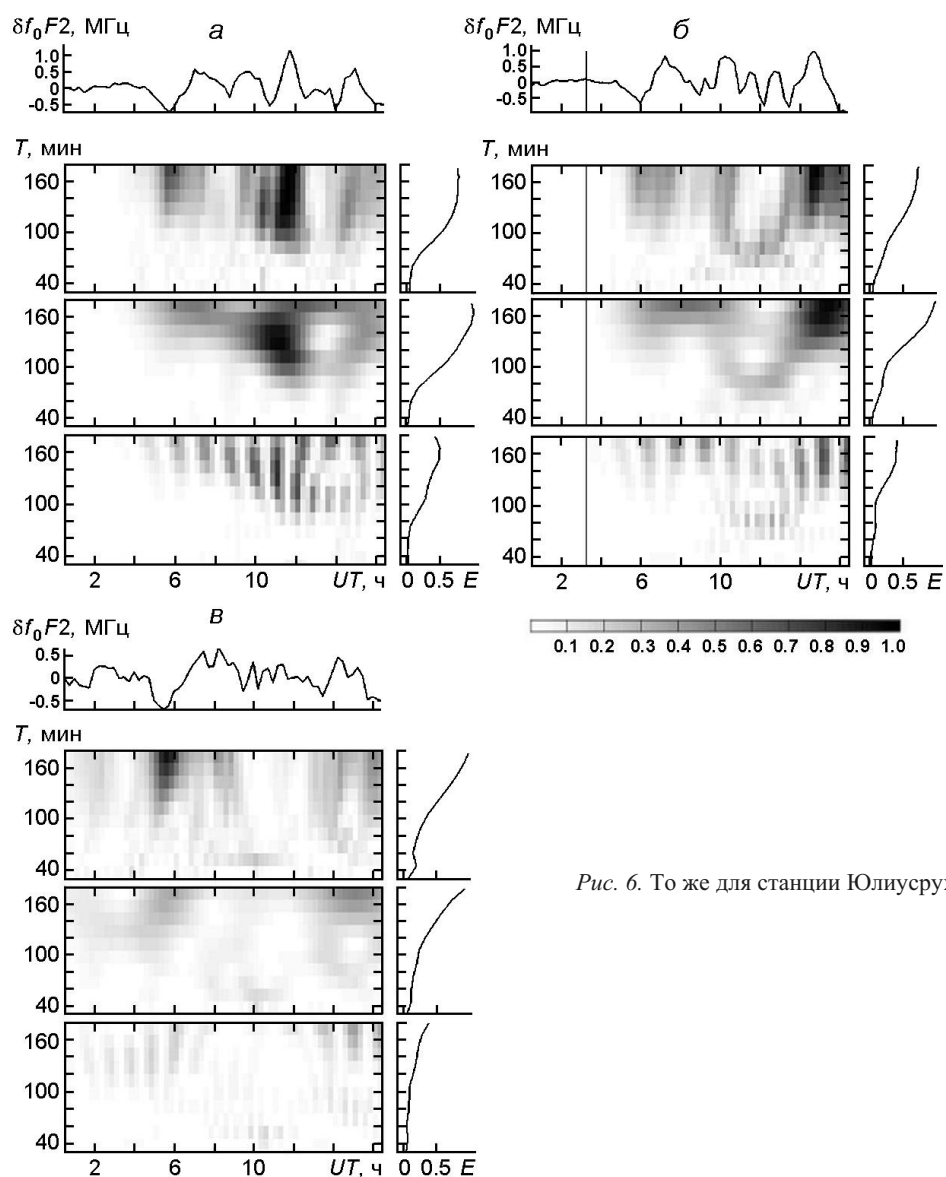


Рис. 6. То же для станции Юлиусрух

ОБСУЖДЕНИЕ

Временные вариации критической частоты. На станциях Москва, Прухониц и Юлиусрух момент наступления реакции на взрыв космического тела и восход Солнца практически совпали. Это серьезно осложнило выделение возмущений, связанных с движением метеороида. На станции Алма-Ата процессы, вызванные непосредственно восходом Солнца, к моменту падения космического тела, закончились. Продолжаться, однако, могли волновые процессы, сгенерированные движением утреннего терминатора.

На станции Москва первое заметное отклонение f_0F2 от регулярного хода отмечались около 04:00. Если оно обусловлено взрывом метеороида, то время запаздывания возмущения равно $t \approx 40$ мин. Зная t и длину траектории волны, можно вычислить среднюю скорость распространения волновых возмущений (ВВ). К сожалению, траектория волны точно неизвестна. При больших (более 1000 км) удалениях ионозонда от места взрыва можно считать, что волна распространяется до ионосферы практически вертикально, затем она захватывается в атмосферные волноводы и далее распространяется почти горизонтально. При этом среднюю скорость можно оценить по очевидной формуле

$$v = \frac{R}{t - t_0}, \quad (3)$$

где R — расстояние вдоль поверхности между местом взрыва тела и ионозондом, t_0 — время распространения ВВ до атмосферного волновода (области F ионосферы). Время t_0 легко оценить, зная высотный профиль скорости звука v_s в верхней атмосфере:

$$t_0 = \int_{z_e}^{z_m} \frac{dz}{v_s}, \quad (4)$$

где z_e — высота взрыва космического тела, z_m — высота максимума слоя $F2$, которому соответствует частота f_0F2 . Для типичной модели $v_s(z)$ интегрирование (4) дает $t_0 \approx 9$ мин. Это же значение можно получить путем оценки интеграла (4). Скорость $v_s \approx 300\text{--}700$ м/с на высотах 25...300 км. Тогда при среднем значении $v_s \approx 500$ м/с и $z = 275$ км получаем $t_0 \approx 550$ с ≈ 9.2 мин. При $t_0 \approx 9$ мин и $R = 1510$ км имеем $v \approx 810$ м/с. Для станции Москва при $f_0F2 = 0.3\text{--}0.5$ МГц и $\overline{f_0F2} = 3\text{--}6$ МГц получаем $N = 17\text{--}20\%$. Вблизи 11:00 $f_0F2 = 7$ МГц, а $f_0F2_{\max} = 8.5$ МГц. При этом $N = (f_0F2/\overline{f_0F2})^2 = 1 \approx 47\%$ (см. выражение (2)).

На станции Прухониц и Юлиусрух заметное отклонение f_0F2 от регулярного хода началось в интервале времени 04:30...04:45, при этом $t \approx 70\text{--}85$ мин. Тогда при $R = 3100$ км имеем $v \approx 690\text{--}860$ м/с (среднее значение скорости около 780 м/с). Около 11:00 на станции Прухониц $f_0F2 = 9.4$ МГц, а $\overline{f_0F2} = 7$ МГц, при этом согласно формуле (2) $N = 80\%$. В это же время на станции Юлиусрух $f_0F2 = 8$ МГц, а $\overline{f_0F2} = 7$ МГц, тогда $N = 31\%$.

На станции Алма-Ата заметные отклонения частоты f_0F2 начались около 04:00...04:45. Если они были обусловлены падением метеороида, то $t \approx 40\text{--}55$ мин. При $t_0 \approx 9$ мин и $R = 1760$ км получаем $v \approx 650\text{--}980$ м/с (среднее значение 810...820 м/с). При $f_0F2 = 0.5$ МГц и $\overline{f_0F2} = 7.5\text{--}8.5$ МГц имеем $N = 12\text{--}13\%$.

Если же при распространении волны не разделять горизонтальное и вертикальное движение, то для оценки средней скорости достаточно воспользоваться формулой (3), где $t_0 = 0$. При этом для станций Москва, Алма-Ата, Прухониц и Юлиусрух получены значения 630, 520...720, 610...740 и 610...740 м/с соответственно.

Таким образом, на всех четырех ионозондах возмущения распространялись в горизонтальном направлении со средней скоростью около 600...700 м/с. Значение периода ВВ составило 70...135 мин. Такие параметры имеют гравитационные волны в атмосфере на высотах $z \approx 300$ км [5, 7].

Обсудим природу сильных всплесков f_0F2 в дневное время, и в частности около 11:00. На сильно разнесенных в пространстве ионозондах они наблюдались почти одновременно. Это означает, что они носили крупномасштабный характер (около 4–5 тыс. км) и могли быть вызваны внешним источником, например нестационарным процессом на Солнце. Анализ состояния космической погоды не позволил связать это изменение f_0F2 (а значит и N) с процессами на Солнце. Неизвестен и крупномасштабный источник в тектоносфере, литосфере или в приземной атмосфере, который мог вызвать столь крупномасштабное возмущение на высотах около 300 км.

Можно предположить, что упомянутые величины f_0F2 в дневное время связаны с долгоживущими возмущениями в верхней атмосфере. Подобные возмущения наблюдались в работах [1, 10] при весьма слабых наземных взрывах с энерговыделением порядка всего 1 т ТНТ.

Возможность появления долгоживущих вихрей, впервые описанных в работе [12] и упомянутых в работе [6], требует, однако, дополнительных исследований. Нельзя исключать и тот факт, что долгоживущие возмущения могут быть связаны с нарушением сложившегося до пролета метеороида взаимодействия подсистем в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера [14, 15, 17].

Результаты спектрального анализа. Выполненный в работе системный анализ подтвердил, что спектральные составы f_0F2 в контрольные дни и день пролета Челябинского метеороида существенно различались. Эти различия наблюдались как вскоре после взрывоподобного выделения энергии (через 40—70 мин), так и в течение 9–10 ч после этого.

Как следует из энергограмм (лучше всего это видно для адаптивного преобразования Фурье), среднее значение периодов возмущений 15 февраля составляли 170, 110, 130 и 170 мин для станций Москва, Алма-Ата, Прухониц и Юлиусрух соответственно. В контрольные дни они, вообще говоря, заметно различались. Более того, в контрольные дни в ряде случаев вообще не наблюдался максимум распределения энергии по периодам.

Оценки периодов и амплитуд ВВ подтвердили, что падение космического тела сопровождалось генерацией и распространением гравитационных волн в верхней атмосфере, а также, возможно, возникновением долгоживущих возмущений.

Подчеркнем, что параметры ВВ, описанных выше, хорошо согласуются с результатами теоретических исследований [18, 19, 22—26, 28, 29]. Сам факт генерации гравитационных волн в атмосфере теоретически предсказан еще в работе [4].

ВЫВОДЫ

Анализ временных вариаций критических частот слоя F_2 ионосферы, измеренных на сети ионозондов, позволяет сделать следующие выводы.

1. Падение Челябинского космического тела сопровождалось заметными изменениями характера временных вариаций частоты f_0F_2 и их спектрального состава.

2. От места падения метеорита распространялись волновые возмущения, имевшие среднюю скорость около 600—700 м/с, амплитуду относительных возмущений концентрации электронов 10—20 % и период 70—135 мин. Такие параметры свойственны атмосферным гравитационным волнам и вызываемым ими перемещающимся ионосферным возмущениям.

3. Волновые возмущения распространялись на расстояния не менее 3 тыс. км от места падения метеорита.

4. В светлое время суток в ионосфере наблюдались возмущения концентрации электронов продолжительностью около 6–7 ч, которые могли быть вызваны долгоживущими вихрями в верхней атмосфере. Относительная амплитуда при этом составляла 10—20 %.

Авторы благодарны рецензенту за тщательное изучение рукописи и сделанные замечания, учет которых способствовал улучшению качества рукописи.

1. Андреева Е. С., Гохберг М. Б., Куницын В. Е. и др. Радиотомографическая регистрация возмущений ионосферы от наземных взрывов // Космич. исслед.—2001.—**39**, № 1.—С. 13—17.
2. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. — М.: Физматлит, 2010.—384 с.
3. Бронштэн В. А. Физика метеорных явлений. — М.: Наука, 1981.—416 с.
4. Голицын Г. С., Григорьев Г. И., Докучаев В. П. Излучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.—1977.—**13**, № 9.—С. 926—935.
5. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978.—532 с.
6. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. — М.: Наука, 2008.—295 с.
7. Григорьев Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика.—1999.—**42**, № 11.—С. 3—25.
8. Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2005.—310 с.

9. Кручиненко В. Г. Математико-фізичний аналіз метеорного явища. — К.: Наук. думка, 2012.—294 с.
10. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. — М.: Физматлит, 2007.—336 с.
11. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009.—576 с.
12. Обухов А. М. К вопросу о геострофическом ветре // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз.—1949.—**13**, № 4.—С. 281—289.
13. Стулов В. П., Мирский В. Н., Вислый А. И. Аэродинамика болидов. — М.: Наука, Физматлит, 1995.—240 с.
14. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—**8**, № 1.—С. 59—106.
15. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008.—528 с.
16. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрономия.—2008.—**48**, № 5.—С. 681—702.
17. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2012.—556 с.
18. Черногор Л. Ф. Основные физические явления при полете Челябинского космического тела // Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль: Матер. конф. (Чебаркуль, 21—22 июня 2013 г.). — Чебаркуль, 2013.—С. 148—152.
19. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск» // Инженерная физика.—2013.—№ 8.—С. 23—40.
20. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // Радиофизика и электроника.—2013.—**4** (18), № 3.—С. 47—54.
21. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита «Челябинск» // Радиофизика и радиоастрономия.—2013.—**18**, № 3.—С. 231—243.
22. Черногор Л. Ф. Электрические, магнитные, электромагнитные и плазменные эффекты Челябинского метеорита // Глобальная электрическая цепь: Матер. Всероссийской конф. (Борок, 28 октября — 1 ноября 2013 г.). — Ярославль, 2013.— С. 112—113.
23. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита // Доп. Нац. акад. наук України.—2013.—№ 10.—С. 97—104.
24. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Челябинского метеороида // Remote Radio Sounding of the Ionosphere: Abstracts Int. School-Conf. (September, 30 — October, 4, 2013, Maly Mayak, Crimea, Ukraine) . — 2013.—Р. 21.
25. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеорита: результаты теоретических расчетов и наблюдений // Ukrainian conf. on space research: Abstracts (Yevpatoria, Crimea, Ukraine, 2—6 September 2013). — Kyiv, 2013.—Р. 44.
26. Чурюмов К. И., Гулиев А. С., Кручиненко В. Г., Чурюмова Т. К. Кометно-астероидная опасность, истина и вымыслы. — Киев-Баку, 2012.—178 с.
27. Chernogor L. F. Oscillations of the geomagnetic field caused by the flight of Vitim bolide on September 24, 2002 // Geomagnetism and Aeronomy.—2011.—**51**, N 1.—Р. 116—130.
28. Chernogor L. F. Physical effects of Chelyabinsk meteorite in the atmosphere and geospace // Astronomy and Space Physics in Kyiv University: Abstracts. Int. Conf.

(Kyiv May 21—24, 2013). — Kyiv, 2013.—P. 82—84.

29. *Chernogor L. F., Rozumenko V. T.* The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage // *Probs Atomic Sci. and Technology.*—2013.—**86**, N 4.—P. 136—139.

Статья поступила в редакцию 08.07.13