

**ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ,
СОПРОВОЖДАВШИЕ ПОЛЕТ И ВЗРЫВ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА****Введение**

В последнее время проблеме астероидно-кометной угрозы уделяется значительное внимание [1–4]. Ввиду уникальности события и значимости последствий актуальной проблемой является детальное и всестороннее изучение эффектов падения на Землю каждого крупного космического тела. Ярким примером подобного события является пролет и взрыв Челябинского метеороида. Впервые в истории науки взрыв крупного космического тела над населенными пунктами хорошо задокументирован при помощи ряда технических средств. При взрыве частично пострадали постройки, преимущественно окна, двери, стены и потолки. В Челябинске взрывом было выбито около 20 тыс. м² оконных стекол. От ранений пострадало более 1,6 тыс. человек. Жертв, к счастью, не было. Нанесенный ущерб превышал 30 млн долларов США.

Метеороид вторгся в атмосферу Земли 15 февраля 2013 г. в 03:20:26 UT (UT – здесь и далее всемирное время) [5–7]. Он двигался с юго-востока на северо-запад (азимут составлял 283°) под углом к горизонту около 18°. Начальная масса метеороида – 11 кт, его начальная скорость – 18,5 км/с, а начальный диаметр – 18 м. Найденные осколки метеорита свидетельствуют о том, что космическое тело представляло собой хондрит типа LL5.

Современный анализ метеорных явлений представлен в книге [8]. Эффектам Челябинского метеороида посвящены работы [9 – 15], а также работы автора [16 – 38].

Цель работы – изложение результатов теоретических исследований, анализа результатов наблюдений эффектов Челябинского метеороида и их моделирования.

Результаты теоретических исследований и моделирования

Для изучения всего комплекса явлений потребовался системный подход к объекту Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ).

Пролет и взрыв Челябинского метеороида с начальной кинетической энергией около 440 кт вызвал возмущения во всех геооболочках [16 – 23]. Высота взрыва Челябинского тела была близка к 23 км. Температура во фронте ударной волны была около 10⁴ К. Остывание следа метеороида продолжалось в течение нескольких часов [18, 33]. Избыточное давление на поверхности Земли вблизи эпицентра взрыва составило единицы килопаскалей, что вызвало разрушения элементов конструкций сооружений на площади около 6 тыс. км². Энергия и мощность световой вспышки составляли около 375 ТДж и 313 ТВт соответственно. Энергия вспышки на 1-2 порядка была меньше энергии, при которой возникает воспламенение веществ и пожары. Энергия взрывной волны и акустических колебаний была близка к 560 и 20 ТДж. Магнитуда землетрясения, вызванного взрывом Челябинского тела, не превышала 3-4. Относительные возмущения давления воздуха на ионосферных высотах и концентрации электронов над эпицентром взрыва достигали сотен процентов. Пролет Челябинского тела сопровождался его нагреванием, абляцией, дроблением, ионизацией вещества космического тела, а также плазменными, магнитными, электрическими, электромагнитными и акустическими эффектами [16 – 23]. Возмущение геомагнитного поля на поверхности Земли вблизи метеороида составляло 0,5 – 1 нТл. Возмущения от взрыва распространялись по горизонтали на расстояние в несколько тысяч километров. Космические тела, подобные Челябинскому метеороиду, падают на Землю в среднем с частотой один раз в 60 ± 7 лет.

Результаты наблюдений, моделирования и сравнения

Эффекты газо-аэрозольного плюма [35]. Разработана физико-математическая модель всплывания и опускания газо-аэрозольного облака, возникшего в результате падения и взрыва Челябинского метеороида. При взрыве в атмосферу было выброшено около 10 кт аэрозо-

лей, которые вместе с нагретым до 10^4 К газом расширились в направлении, перпендикулярном траектории. Горячее образование длиной около 15 км и радиусом около 0,5 км стало всплывать вверх. Первоначальное ускорение было около 470 м/с^2 . Далее имело место практически равномерное движение со скоростью $125 - 210 \text{ м/с}$. По мере поднятия, облако увеличивалось в размерах, остывало за счет расширения и турбулентного перемешивания. Когда плотность вещества приблизилась к плотности холодного воздуха, подъем облака практически прекратился. За 55 с облако поднялось на 10 км. Далее в течение 400 с аэрозоли размером $\sim 10^{-4}$ м опускались со скоростью $\sim 10 \text{ м/с}$. После подъема аэрозоли участвовали в трех движениях: оседании, турбулентном перемешивании и перемещении в горизонтальном направлении со скоростью ветра. Аэрозоли размером $10^{-6} - 3 \cdot 10^{-4}$ м существовали в стратосфере в течение 20 – 1 суток соответственно. Легкие аэрозоли обогнули Земной шар несколько раз.

Проведено сравнение результатов моделирования с результатами лазерного зондирования, выполненного в Москве и Обнинске [10, 14, 15]. По результатам наблюдений скорость вертикального движения составляла $130 - 170 \text{ м/с}$, максимальное увеличение высоты подъема – 12 км. Следы аэрозолей наблюдались через 20 суток после пролета Челябинского метеороида. Результаты моделирования хорошо согласуются с результатами наблюдений.

Ионосферные эффекты [24, 28, 29, 34]. Обнаружены проявления возмущений концентрации электронов на высотах нижней ионосферы ($z \approx 65 - 70 \text{ км}$) на расстоянии от места взрыва около 1575 км, вызванные воздействием акустической волны с периодом $200 - 230 \text{ с}$, имеющей скорость распространения $v \approx 290 - 400 \text{ м/с}$. Амплитуда колебаний высоты области отражения составляла около $0,1 - 0,2 \text{ км}$. Амплитуда колебаний фазы сигнала равнялась $4 - 7^\circ$. Относительные возмущения концентрации электронов равнялись $2,7 - 4,6 \%$. Ионозондовые наблюдения позволили обнаружить вблизи максимума слоя $F2$ проявления внутренних гравитационных волн (ВГВ) с $T \approx 70 - 135 \text{ мин}$ и $v \approx 520 - 700 \text{ м/с}$. Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов составляла $10 - 20 \%$. Продолжительность возмущения была $4 - 5 \text{ ч}$. Значительное возмущение критической частоты f_oF2 (до $0.5 - 1 \text{ МГц}$), наблюдаемое в интервале времени с $09:00$ до $16:00$ на сильно удаленных друг от друга ионозондах, в принципе, также могло быть вызвано пролетом и взрывом метеороида. Проведенный анализ временных вариаций полного электронного содержания (ПЭС) вблизи от места взрыва космического тела (на расстояниях в несколько сот километров) показал наличие волновых возмущений (ВВ) с $v \approx 500 - 550 \text{ м/с}$, длительностью $40 - 60 \text{ мин}$ и $T \approx 10 - 15 \text{ мин}$. Относительная амплитуда ВВ ПЭС была порядка $1 - 10 \%$. Результаты оценок и наблюдений в целом соответствуют друг другу.

Магнитные эффекты [25, 30]. Проведен анализ временных вариаций компонент геомагнитного поля в день падения метеорита «Челябинск» и в контрольные дни. Для анализа выбраны обсерватории Хабаровск, Якутск, Новосибирск, Алма-Ата, АРТИ, Борок, Киев и Львов. Расстояние R от места взрыва до обсерватории изменялось от нуля до 5 тыс. км. Пролет и взрыв Челябинского тела сопровождался квазипериодическими вариациями в основном горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля с периодом $T \approx 30 - 40 \text{ мин}$, амплитудой $0.4 - 2 \text{ нТл}$ для $R \approx 5 - 1 \text{ тыс. км}$ соответственно и продолжительностью $2 - 3 \text{ ч}$. Горизонтальная скорость распространения ВВ геомагнитного поля была близка к $260 - 370 \text{ м/с}$.

Согласно предложенной модели, эти возмущения геомагнитного поля вызваны движением ВГВ, сгенерированной в атмосфере падающим космическим телом, и возникшими при этом перемещающимися ионосферными возмущениями, которые модулировали ионосферный ток на высотах динамо-области ионосферы. Последний стал источником возмущений геомагнитного поля. Расчетные значения амплитуд ВВ составляли $0,5 - 1,8 \text{ нТл}$ для $R \approx 5 - 1 \text{ тыс. км}$ соответственно. В то же время возмущения уровня геомагнитного поля в диапазоне периодов $1 - 1000 \text{ с}$ (обсерватория Харьков) оказались менее 1 нТл . Результаты наблюдений и оценок хорошо согласуются между собой.

Магнитосферные эффекты [36]. Анализ вариаций H -компоненты геомагнитного поля, зарегистрированных в перечисленных выше магнитных обсерваториях, показал, что за $33 - 38 \text{ мин}$ до взрыва метеороида наблюдались аperiodические вариации величиной

1,2 – 1,5 нТл и длительностью 22 – 33 мин. Вариации уровня горизонтальных Н- и D-компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов 1 – 1000 с, зарегистрированные в обсерватории Харьков, достигали 2 – 3 нТл, длились 27 и 38 мин, имели квазипериод 13 – 15 мин и время упреждения 44 и 47 мин соответственно. Предложена модель магнитных возмущений при подлете метеороида. При вхождении космического тела в магнитосферу возникает перемещающееся со скоростью метеороида отрицательное возмущение геомагнитного поля в направлении, перпендикулярном траектории тела. Область возмущения по форме близка к форме цилиндра длиной около 10 тыс. км и радиусом 1 – 8 тыс. км при параметре Мак-Илвейна $L \approx 5-10$ соответственно. Продолжительность возмущения составляла около 27 мин. При тех же L возмущение магнитного поля в магнитосфере было около 6 – 1 мкТл, а на поверхности Земли – 1 – 2 нТл.

В обсерватории Монды (51.4° N, 100.5° E) за 45 – 22 мин до взрыва метеороида в диапазоне частот 0,2 – 5 Гц зарегистрирован также шумоподобный всплеск уровней Н- и D-компонент магнитного поля длительностью около 23 мин. Описанные магнитные возмущения могли возникнуть только в магнитосфере. Они были связаны с генерацией плазменной турбулентности в следе метеороида с удельной мощностью 10^9-10^{12} Вт/кг. На поверхности Земли амплитуда вариаций магнитного поля составляла 0,1 – 0,2 нТл, а их период – 0,7 – 10 с.

Результаты моделирования хорошо согласуются с результатами наблюдений.

Акустические эффекты [37]. Порожденные Челябинским метеороидом инфразвуковые волны, испытав многократные отражения, преломление и рассеяние в атмосфере и преодолев расстояние в тысячи км были зарегистрированы микробарографами. Ближайшая от места взрыва метеороида станция расположена в Казахстане (расстояние 540 км), наиболее удаленная станция – в Антарктиде (расстояние 15000 и 25000 км). Время запаздывания инфразвукового сигнала увеличивалось примерно по линейному закону при увеличении расстояния между акустическим источником и местом наблюдения. Получена соответствующая регрессионная зависимость. Средняя скорость распространения инфразвуковой волны была около 266 ± 3 м/с. В спектре инфразвукового сигнала с периодами $T \approx 20 - 90$ с преобладала гармоника с периодом $30,09 \pm 0,44$ с. При увеличении расстояния между пунктами генерации и регистрации инфразвука от 520 до 5780 км амплитуда сигнала уменьшалась от 5 – 7 до 0,2 – 0,3 Па. Длина затухания инфразвука в зависимости от трассы составляла 2000 – 7000 км. Начальная энергия метеороида, оцененная из наблюдений инфразвука, была близка к $434,9 \pm 18,5$ кт, что согласуется со значением энергии, оцененной по свечению метеороида, действию ударной волны и сейсмическому эффекту. Показано, что длительность инфразвукового сигнала определялась протяженностью источника (около 50 – 90 км) и дисперсионным расплыванием, зависящим от расстояния, проходимого волной. Общая длительность сигнала $\Delta T \approx 6 - 30$ мин при $R \approx 540 - 5780$ км соответственно. При R , равном 15000 и 25000 км (Челябинск – Антарктида), ΔT составляла 25 и 40 мин соответственно. Период основного колебания определялся осцилляцией нагретой области взрыва. По оценкам, период составлял около 33 с, а по наблюдениям – 25 – 34 с. Результаты оценок и наблюдений хорошо согласуются.

Сейсмические эффекты [38]. Ударная волна, достигнув поверхности Земли, возбудила в литосфере сейсмические волны, которые были зарегистрированы на расстояниях до 15000 км от места взрыва. Согласно энергетической оценке, магнитуда землетрясения $M \approx 3,5 - 4,1$. По данным сейсмических наблюдений $M \approx 3,6 - 4,2$. Наблюдения показали, что высотный взрыв метеороида генерировал в основном поверхностную волну Рэлея. По расчетам и данным наблюдений время запаздывания ударной волны в местах разрушений по отношению к моменту ее генерации на высотах 23 – 53 км составляло 77 – 295 с (при удалении 23 – 84 км). Продолжительность ударноволнового воздействия была близка к 97 с. По расчетам и результатам наблюдений длина области разрушений от действия ударной волны при избыточном давлении не менее 0,7 кПа составляла около 125 – 130 км, а ее ширина на разных участках траектории космического тела – от 16 до 60 км. Установленная по регистра-

циям сейсмограмм средняя скорость сейсмических волн равняется 3,08 км/с (по расчетам – 3,07 км/с). Найдена регрессия для зависимости длительности сейсмического сигнала от пройденного сейсмической волной расстояния. По результатам расчетов и наблюдений характерное время действия сейсмического источника составляло около 40 с. Для сейсмических волн с периодом $T = 20 - 50$ с установлена дисперсионная зависимость (групповая скорость $v_g \propto T^{1/3}$). При этом фазовая скорость $v_{ph} = (4/3)v_g$. Оценена глубина затухания сейсмических волн ($\sim 10 - 20$ Мм) для $T = 0,3 - 4$ с. По оценкам амплитуда скорости движения упругой среды при ударноволновом воздействии составляла 5,7 – 7,0 мкм/с, а по результатам наблюдений – 5,8 – 7,0 мкм/с (для $T \approx 1$ с). В энергию сейсмических волн преобразовалось около $10^{-5} - 10^{-4}$ начальной кинетической энергии метеороида.

Имеет место хорошее согласие результатов моделирования и наблюдений.

Основные результаты

1. Продемонстрировано, что падение Челябинского метеорита привело к самому сильному удару из космоса за последнее сто лет. Эффекты Челябинского метеороида хорошо задокументированы: засняты многими камерами видеонаблюдения, зарегистрированы наземными сейсмографами, магнитометрами, мониторами частиц, ионозондами, мониторами атмосферных возмущений, микробарографами, а также приборами, установленными на ИСЗ.

Пролет и взрыв Челябинского метеороида вызвал целый комплекс механических, физических, химических и сейсмических процессов в системе ЗАИМ.

2. Впервые проведено детальное комплексное физико-математическое моделирование основных процессов, сопровождавших падение и взрыв Челябинского метеороида. Рассмотрены процессы нагревания, абляции, ионизации и разрушения космического тела, планирование его осколков, генерация баллистической и взрывной ударных волн, возникновение теплового, плазменного следов и плюма, возмущение акустического, геомагнитного, электрического, электромагнитного и сейсмического полей. Проанализирована динамика теплового следа и газо-аэрозольного плюма в атмосфере.

3. Проведен комплексный анализ наблюдений возмущений в атмосфере, ионосфере, магнитосфере и земной коре, вызванных пролетом и взрывом Челябинского метеороида. Обнаружены квазипериодические возмущения во всех подсистемах системы ЗАИМ. Построены физико-математические модели наблюдаемых процессов. Возмущения, вызванные взрывом Челябинского тела, распространялись как по вертикали на сотни километров вверх, так и по горизонтали на расстояния в тысячи километров. Изучение этого комплекса явлений потребовало системного подхода к объекту ЗАИМ.

4. Впервые экспериментально обнаружено и теоретически объяснено, что за 50 – 30 мин до взрыва метеороида, т.е. при его движении в магнитосфере, а затем в термосфере и ионосфере возникли первичные эффекты.

Пролет и взрыв Челябинского тела в стратосфере вызвал вторичные эффекты в системе ЗАИМ.

5. Сравнение результатов наблюдений и физико-математического моделирования показало их полное соответствие.

Список литературы: 1. *Gehrels T.* (Edit.) *Hazards due to comets and asteroids* // Tucson; London: Univ. Arizona Press, 1994. – 1300 p. 2. *Катастрофические* воздействия космических тел ; под ред. В. В. Адушкина и И.В. Немчинова. - М. : ИКЦ «Академкнига», 2005. – 310 с. 3. *Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра* ; под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 384 с. 4. *Черногор Л. Ф.* Физика и экология катастроф. – Харьков : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. – 556 с. 5. *NASA Fireball and Bolide Reports.* NASA Near-Earth Object Program Office (<http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs>). 6. *Yeomans D., Chodas P.* (http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html) 7. *NASA – Asteroid 2012 DA14 – Earth Flyby Reality Check*, 15 February 2013. (<http://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/asteroidflyby.html>) 8. *Кручиненко В. Г.* Математико-физический анализ метеорного явища. - К. : Наук. думка, 2012. – 294 с. 9. *Астероиды и кометы.* Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль // Материалы конференции. Междунар. науч.-практ. конф. (Чебаркуль, 21 – 22 июня 2013 г.) – 168 с. 10. *Алпатов В.В., Буров В.А., Вагин Ю.П.* и др. Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. – М. : ФГБУ «ИПГ», 2013. – 37 с. 11. *Геохимия.* – 2013. – Т. 51, № 7. (Тематический выпуск). 12. *Астрономический вестник.* – 2013. – Т. 47, № 4.

(Тематический выпуск). 13. *Метеорит Челябинск – год на Земле : материалы Всерос. науч. конф. [редкол.: Н.А. Антипин и др.]*. – Челябинск, 2014. – 694 с. 14. *Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization // Science*. – 2013. – V. 342. – P. 1069–1073. 15. *Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V. et al. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization // (www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1)*. 16. *Chernogor L. F. Physical effects of Chelyabinsk meteorite in the atmosphere and geospace // Book of Abstracts. Astronomy and Space Physics in Kyiv University. Int. Conf. Kyiv, May 21 – 24, 2013*. – P. 82 – 84. 17. *Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage // Problems of Atomic Science and Technology*. – 2013. – Vol. 86, No 4. – Pp. 136 – 139. 18. *Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита "Челябинск" // Инженерная физика*. – 2013. – № 8. – С. 23 – 40. 19. *Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеорита: результаты теоретических расчетов и наблюдений // Ukrainian conference on space research. Yevpatoria, Crimea, Ukraine. 2 – 6 September 2013. Abstracts*. – Kyiv, 2013. – P. 44. 20. *Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионозондовые наблюдения возмущений в ионосфере, сопровождающих падение Челябинского метеорита // Ukrainian conference on space research. Yevpatoria, Crimea, Ukraine. 2 – 6 September 2013. Abstracts*. – Kyiv, 2013. – P. 48. 21. *Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита // Доповіді Національної академії наук України*. – 2013. – № 10. – С. 97 – 104. 22. *Черногор Л. Ф. Физические эффекты Челябинского метеороида // International School-Conference "Remote Radio Sounding of the Ionosphere". Book of Abstracts. September, 30 – October, 4 2013. Malyi Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine*. – P. 21. 23. *Черногор Л. Ф. Электрические, магнитные, электромагнитные и плазменные эффекты Челябинского метеорита // Глобальная электрическая цепь. Материалы Всерос. конф. Борок, 28 октября – 1 ноября 2013 г. – Ярославль, 2013*. – С. 112 – 113. 24. *Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита "Челябинск" // Радиофизика и радиоастрономия*. – 2013. – Т. 18, № 3. – С. 231 – 243. 25. *Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // Радиофизика и электроника*. – 2013. – Т. 4 (18), № 3. – С. 47 – 54. 26. *Черногор Л. Ф. Физические эффекты Челябинского метеороида в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера // Радиофизические исследования ионосферы (РФИИ – 2013)*. – Сборник тезисов докладов I Украинской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В. А. Мисюры. – Харьков, 24 – 25 октября 2013 г. – С. 13 – 17. 27. *Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Федоренко В. Н., Цымбал А. М. Возмущения полного электронного содержания ионосферы, вызванные падением Челябинского метеороида // Радиофизические исследования ионосферы (РФИИ – 2013)*. – Сборник тезисов докладов I Украинской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В. А. Мисюры. – Харьков, 24 – 25 октября 2013 г. – С. 40 – 43. 28. *Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Федоренко В. Н., Цымбал А. М. Спутниковые наблюдения ионосферных возмущений, следовавших за падением Челябинского метеорита // Космічна наука і технологія*. – 2013. – Т. 19, № 6. – С. 38 – 46. 29. *Chernogor L. F., Barabash V. V. Ionosphere disturbances accompanying the flight of the Chelyabinsk body // Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. – 2014. – V. 30, N. 3. – Pp. 126–136. 30. *Chernogor L. F. Geomagnetic field effects of the Chelyabinsk meteoroid // Geomagnetism and Aeronomy*. – 2014. – V. 54, N. 5. – Pp. 613 – 624. 31. *Милованов Ю. Б., Черногор Л. Ф. Численное моделирование эффектов пролета Челябинского космического тела // Ukrainian conference on space research. Uzhhorod, Ukraine. 8 – 12 September 2014. Abstracts*. – Kyiv, 2014. – P. 36. 32. *Черногор Л. Ф. Радарное обнаружение миниастероидов // Известие вузов. Радиоэлектроника*. – 2013. – Т. 56, № 11. – С. 54 – 62. 33. *Черногор Л. Ф. Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования // Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всерос. науч. конф. [редкол.: Н. А. Антипин и др.]*. – Челябинск, 2014. – С. 229–265. 34. *Chernogor L. F. Ionospheric effects of the Chelyabinsk meteoroid // Geomagnetism and Aeronomy*. – 2015. – Vol. 55, No. 3 – P. 353–368. 35. *Chernogor L. F. The movement of the gas-aerosol cloud created by the Chelyabinsk Meteorite on February 15, 2013 // Астрономія та фізика космосу в Київському університеті. Збірник тез доповідей. Міжнар. конф. в рамках ІХ Всеукр. фестивалю науки, присвячена 170 річниці Астрономічної обсерваторії Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка, 110 річниці професора С. К. Всесвятського, 100 річниці М. А. Яковкіна, 25–29 травня 2015 року*. – 2015. – P. 97–98. 36. *Chernogor L. F. Magnetospheric effects during the Chelyabinsk Meteorite on February 15, 2013 // Астрономія та фізика космосу в Київському університеті. Збірник тез доповідей. Міжнар. конф. в рамках ІХ Всеукр. фестивалю науки, присвячена 170 річниці Астрономічної обсерваторії Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка, 110 річниці професора С. К. Всесвятського, 100 річниці М. А. Яковкіна, 25–29 травня 2015 року*. – 2015. – P. 105–106. 37. *Черногор Л. Ф. Акустический эффект Челябинского метеороида // 15th Ukrainian conference on space research. Odesa. 24 – 28 August 2015. Abstracts*. – Kyiv, 2015. – P. 149. 38. *Черногор Л. Ф. Сейсмический эффект Челябинского метеороида // Астрономія та фізика космосу в Київському університеті. Збірник тез доповідей. Міжнар. конф. в рамках ІХ Всеукр. фестивалю науки, присвячена 170 річниці Астрономічної обсерваторії Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка, 110 річниці професора С. К. Всесвятського, 100 річниці М. А. Яковкіна, 25–29 травня 2015 року*. – 2015. – P. 150.

Харьковский национальный
университет имени В. Н. Каразина

Поступила в редколлегию 20.03.2016