

ПОВЕДЕНИЕ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ ВЗРЫВА ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА

¹Н.П. Перевалова, ²А.С. Жупитяева, ^{3,4}Н.В. Шестаков, ¹Ю.В. Ясюкевич, ¹С.В. Воейков

IONOSPHERIC BEHAVIOR DURING EXPLOSION OF CHELYABINSK METEORITE

¹N.P. Perevalova, ²A.S. Zhupityaeva, ^{3,4}N.V. Shestakov, ¹Y.V. Yasukevich, ¹S.V. Voeikov

На основе данных о вариациях полного электронного содержания (ПЭС) проведено исследование поведения ионосферы во время взрыва Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г. Через 14 мин после взрыва метеорита в вариациях ПЭС было зафиксировано возмущение, которое имело форму, соответствующую форме ударной акустической волны. Подобные возмущения наблюдались ранее при изучении землетрясений и запусков ракет. Зарегистрированные возмущения ПЭС имели период около 15 мин и амплитуду колебаний от 0.1 до 0.5 TECU, что превышало уровень фоновых флуктуаций в контрольные дни. Возмущения распространялись радиально от точки взрыва до расстояний 500–700 км. Горизонтальная скорость перемещения возмущений составляла около 320–350 м/с, что близко к скорости звука в нижней атмосфере.

We investigated the ionospheric behavior during the Chelyabinsk meteorite explosion of February 15, 2013, using data on total electron content (TEC) variations. Disturbances in the form of shock acoustic waves were registered in TEC variations 14 min after the meteorite explosion. Similar disturbances had been observed after earthquakes and rocket launches. The registered TEC disturbances had a period of about 15 min and amplitude varied from 0.1 to 0.5 TECU and exceeded the level of background fluctuations. TEC disturbances moved radially from the explosion epicenter up to distances of 500–700 km. The horizontal velocity of the disturbances (320–360 m/s) was close to the velocity of sound in the lower atmosphere.

Введение

Утром 15 февраля около 03:20 UT (09:20 UT) произошел взрыв метеорита в районе Челябинска. По данным различных источников, метеорит взорвался на высоте 20–25 км [Шустов, 2013].

Челябинский метеорит имел размер около 18 м, плотность 3.6 г/см³ и массу порядка 11 000 тонн [Шустов, 2013; <http://ru.wikipedia.org>]. Он вошел в атмосферу Земли на скорости около 18.3 км/с. Спустя 32.5 с после входа в атмосферу метеорит взорвался. Взрыв метеорита произошел в точке с координатами 54.8° N, 61.1° E на высоте 23.3 км в 03:20:33 UT. Метеорит начал разваливаться на части при достижении динамического давления 4 МПа. Зафиксировано три взрыва разной мощности. Они сопровождалась яркой вспышкой, которая длилась около пяти секунд, и взрывной ударной волной. Ударная волна сформировалась на высоте от 26 до 30 км. В момент взрыва Челябинского метеорита американские сейсмостанции зафиксировали толчок в 4 балла примерно в километре к юго-западу от центра Челябинска [<http://ru.wikipedia.org>]. Российские сейсмические станции зарегистрировали сопутствующее взрыву землетрясение с магнитудой 3.2 в районе Еманжелинска. Взрыв Челябинского метеорита зафиксировали 17 из 45 мировых инфразвуковых станций слежения. Первой станцией была инфразвуковая станция на Аляске, находящаяся на расстоянии более 6500 км от района падения. Самая дальняя станция расположена в Антарктиде в 15 000 км от источника. Светимость метеорита составила $E_0=3.75 \cdot 10^{14}$ Дж, из чего следует, что полная энергия, выделившаяся при взрыве, составляет около 440 кт. Это делает Челябинский метеорит наибольшим объектом, который сталкивался с Землей за последние 105 лет (с момента падения Тунгусского метеорита) [<http://ru.wikipedia.org>].

Траектория Челябинского метеорита имела наклон 16.5° к поверхности Земли в точке падения в озеро Чебаркуль. Самая первая версия, высказанная о траектории Челябинского метеорита в атмосфере,

принадлежит председателю регионального отделения Русского географического общества кандидату географических наук Сергею Захарову. По его мнению, метеоритное тело летело с юго-востока на северо-запад, траектория полета шла по азимуту около 290° по линии Еманжелинск–Миасс [<http://ru.wikipedia.org>]. Позже появились две версии о траектории метеорита: по записям камер наблюдения в Челябинске (рис. 1) и по данным спутника Meteosat-9 (рис. 2). По записям камер наблюдения колумбийские астрономы Zuluaga и Ferrin сделали реконструкцию траектории метеорита [Zuluaga, Ferrin, 2013]. Согласно их расчетам метеорит двигался с юго-востока. Эта траектория близка к траектории С. Захарова. При изучении записей астрономы пришли к выводу, что есть неопределенность в расстоянии до точки взрыва метеороида: расстояние от места наблюдения до точки взрыва может составлять от 50 до 72 км. Это приводит к некоторым вариациям параметров траектории: высота взрыва варьирует от 32.5 до 46.7 км, скорость метеорита – от 13.4 до 19.6 км/с, угол наклона траектории к поверхности Земли – от 16.32 до 19.73°, азимут – от 91.60 до 96.48°, широта точки взрыва – от 54.92 до 54.81°, долгота точки взрыва – от 62.06 до 62.35° [Zuluaga, Ferrin, 2013].



Рис. 1. Траектория полета Челябинского метеорита по записям камер наблюдения в Челябинске [<http://ru.wikipedia.org>].



Рис. 2. Траектория полета Челябинского метеорита по данным спутника Meteosat-9 [http://ru.wikipedia.org].

Вторая версия получена по данным спутника Meteosat-9 [Geens, 2013; Zuluaga, Ferrin, 2013]. Согласно этой версии метеорит двигался с северо-востока. Обсуждение данной версии привело к выводу, что траектория по данным спутника Meteosat-9 не совсем верна. Подробный анализ данных спутника Meteosat-9 показал, что спутник, который находится на геостационарной орбите, наблюдал траекторию метеорита низко над горизонтом (рис. 3). Это приводит к неудачному ракурсу на снимке следа метеорита и увеличивает вероятность ошибки в определении азимута [Geens, 2013].

Таким образом, в настоящее время считается, что метеорит летел с юго-востока, в соответствии с версиями Захарова и авторов [Zuluaga, Ferrin, 2013].

Геометрия измерений и анализ геофизической обстановки

Исследования поведения ионосферы во время взрыва Челябинского метеорита проводились на основе данных полного электронного содержания (ПЭС), рассчитанного по двухчастотным фазовым измерениям приемников GPS, расположенных в зоне взрыва. Использовались данные GPS-станций ARTU, KRTV, NOVМ, NRIL, NVSK, входящих в Международную сеть IGS [http://sopac.ucsd.edu], BARN, NNOV, ORNB, SIBG, TRIM, входящих в сеть станций NAVGEOCOM [http://www.navgeocom.ru], и данные станции CHEL, предоставленные компаниями ООО «ГЕОСалют» (Москва) и ООО «Полеос» (Челябинск). На рис. 4 показаны траектории спутников GPS, которые наблюдались на станциях ARTU, CHEL, ORNB и TRIM в зоне взрыва метеорита 15 февраля 2013 г. в 02:00–06:00 UT. Траектории спутников выделены на рисунке черными сплошными линиями (станция ARTU), серыми сплошными (станция CHEL), серыми штриховыми (станция ORNB) и черными штриховыми (станция TRIM) линиями. Анализ вариаций ПЭС был проведен для всех спутников GPS, указанных на рис. 4. Для исследования выбирались непрерывные ряды вариаций ПЭС длительностью от 2 до 6 ч. С целью выделения возмущений, вызванных взрывом метеорита, исходные ряды ПЭС подвергались сглаживанию с временным окном 2 мин и удалению линейного тренда с временным окном 20 мин. Вариации ПЭС в день взрыва сравнивались с поведением ПЭС в предыдущий и последующий дни.



Рис. 3. Траектория Челябинского метеорита по данным спутника Meteosat-9 [Geens, 2013].

В анализируемый нами период времени геомагнитная обстановка была спокойной (индекс K_p не превышал 1 в интервале 00–12 UT). Во время полета и взрыва метеорита отсутствовали мощные солнечные вспышки. Исследуемый период времени характеризовался спокойным сейсмическим фоном на территории Челябинской области и близлежащих районов. Падение и взрыв Челябинского метеорита произошли на восходе Солнца, поэтому колебания ПЭС, вызванные терминатором, затруднили выделение возмущений, связанных со взрывом метеорита. Из рис. 5, 6, 7 видно, что в вариациях ПЭС на некоторых лучах присутствовали довольно интенсивные колебания с амплитудой ~ 0.2 TECU и периодом около 17 мин. Как правило, подобные колебания наблюдались и в контрольные дни. Такая картина характерна для солнечного терминатора (СТ) [Едемский и др., 2011]. Действительно, по времени взрыв метеорита совпал с прохождением СТ вблизи Челябинска в 03:00 UT. Линия СТ в 03:00 UT показана толстой серой штриховой линией на рис. 4. На фоне СТ возмущения ПЭС, связанные со взрывом метеорита, не удалось выделить, например, на лучах ARTU–PRN15 (рис. 5, з), ARTU–PRN22 (рис. 5, э) ORNB–PRN15 (рис. 6, з).

Возмущения во временных вариациях ПЭС

На рис. 5, 6, 7 приведены отфильтрованные вариации ПЭС $dI(t)$, полученные на станциях ARTU (рис. 5), ORNB (рис. 6) и TRIM (рис. 7) в день взрыва метеорита, а также в предыдущий и последующий дни. Несмотря на присутствие колебаний ПЭС, вызванных терминатором, на отдельных лучах «приемник–спутник» можно выделить характерные возмущения, форма которых близка к форме ударной акустической волны. На рис. 5, 6, 7 характерные возмущения обведены штриховыми линиями. Такие возмущения регистрировались ранее после землетрясений и запусков ракет. Подобные возмущения генерируются ударными волнами. Зарегистрированные возмущения представляли собой колебания с периодом около 15 мин и амплитудой от 0.1 до 0.5 TECU, что превышало уровень фоновых флуктуаций в контрольные дни. Возмущения начали регистрироваться через 14 мин после взрыва метеорита.

Динамика возмущений ПЭС

Для анализа пространственного распределения зарегистрированных возмущений ПЭС на рис. 8 нанесены траектории ионосферных точек (на высоте

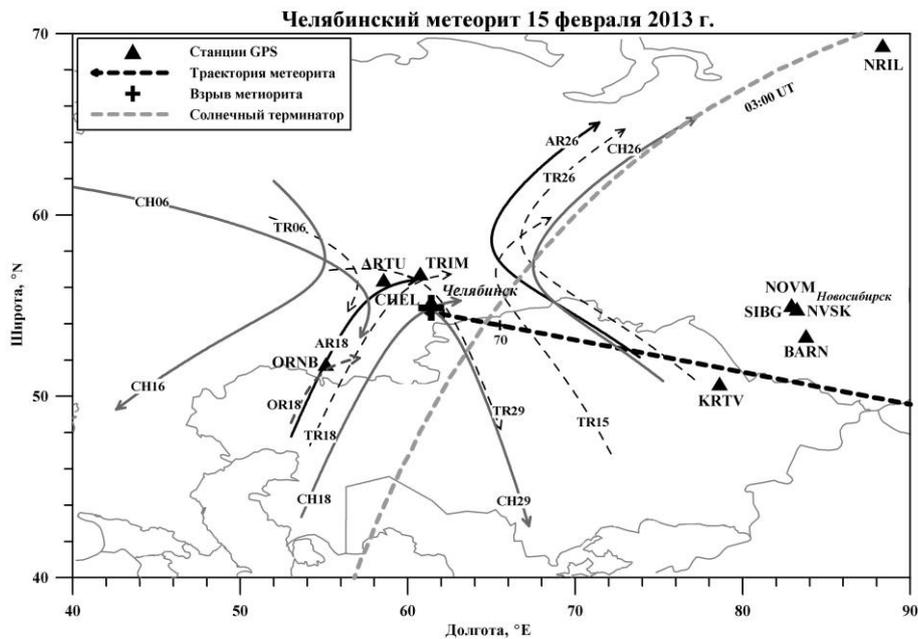


Рис. 4. Схема измерений во время полета Челябинского метеорита. Положение GPS-станций отмечено треугольниками, цифры у траекторий обозначают номера спутников GPS. Крестиком показано место взрыва метеорита. Толстой черной штриховой линией отмечена траектория метеорита. Серая штриховая линия показывает расположение солнечного терминатора в 03:00 UT.

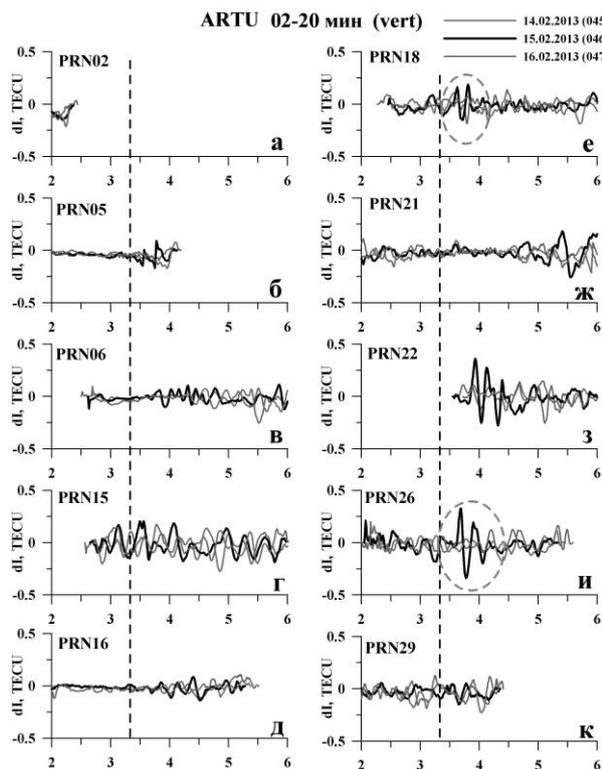


Рис. 5. Отфильтрованные вариации ПЭС, полученные для спутников GPS на станции ARTU 14–16 февраля 2013 г. Момент взрыва метеорита отмечен штриховой линией.

максимума ионизации $h_{\max}=300$ км) для спутников GPS PRN06, PRN16, PRN18, PRN26, PRN29, которые наблюдались на станциях ARTU, CHEL, ORNB и TRIM 15 февраля 2013 г. в 02:00–06:00 UT. Серыми точками показаны максимумы, а черными – минимумы зарегистрированных колебаний ПЭС. Тонким штрихом отмечены линии равного расстояния от точки взрыва

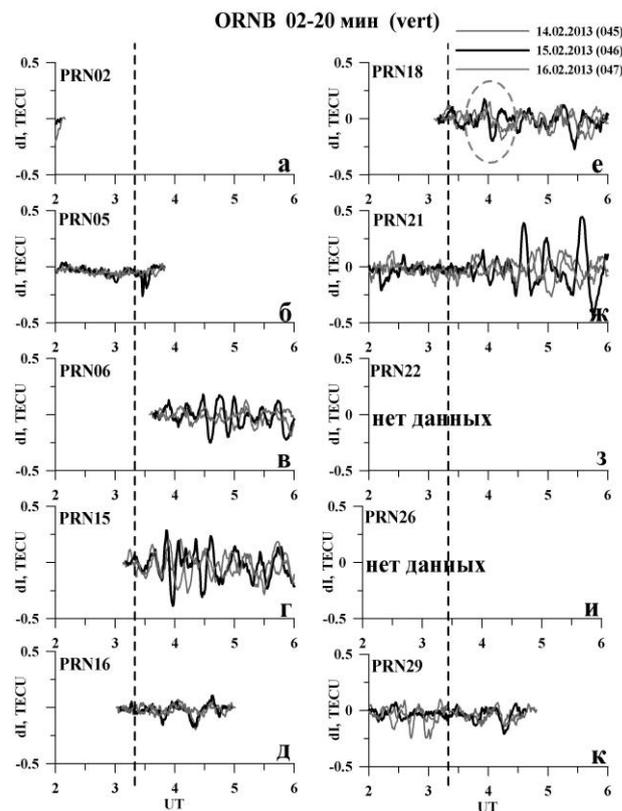


Рис. 6. Отфильтрованные вариации ПЭС, полученные для спутников GPS на станции ORNB 14–16 февраля 2013 г. Момент взрыва метеорита отмечен штриховой линией.

с шагом в 100 км. Видно, что пространственное распределение максимумов и минимумов колебаний ПЭС соответствует кольцевому фронту волны, распространяющейся от места взрыва.

На рис. 9 показано перемещение со временем максимумов и минимумов возмущений ПЭС после

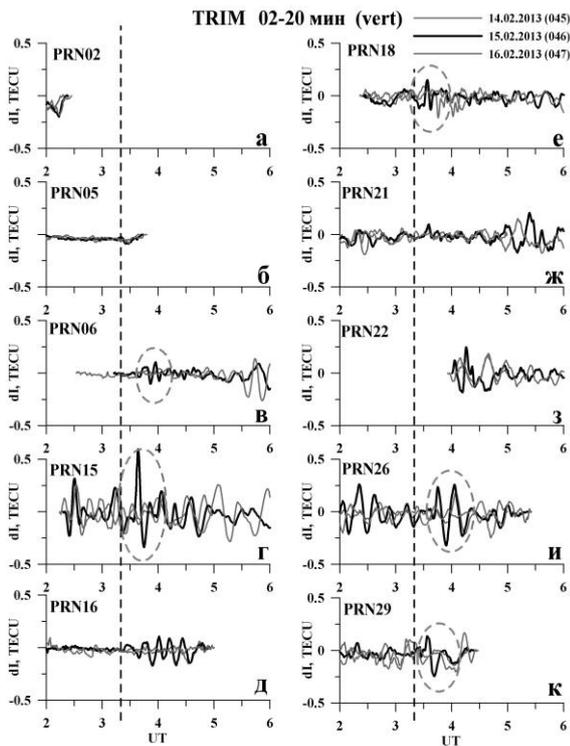


Рис. 7. Отфильтрованные вариации ПЭС, полученные для спутников GPS на станции TRIM 14–16 февраля 2013 г. Момент взрыва метеорита отмечен штриховой линией.

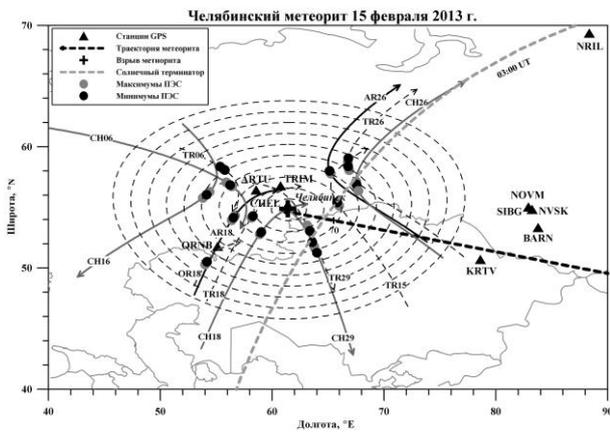


Рис. 8. Траектории ионосферных точек спутников GPS, наблюдавшихся на станциях ARTU, CHEL, ORNB и TRIM 15 февраля 2013 г. Положение станций отмечено треугольниками, цифры у траекторий обозначают номера спутников GPS. Крестиком показано место взрыва метеорита.

взрыва Челябинского метеороида. Как видно из рис. 9, возмущения ПЭС распространялись радиально от точки взрыва. Сплошными линиями обозначено положение волнового фронта возмущения в определенный момент времени. Горизонтальная скорость перемещения возмущений, рассчитанная по смещению волнового фронта, составила 320–350 м/с, что близко к скорости звука в нижней атмосфере. Возмущения распространялись до расстояний 500–700 км.

Залючение

Исследования поведения ионосферы во время взрыва Челябинского метеорита показали, что через 14 мин после взрыва в вариациях ПЭС было зафиксировано возмущение, форма которого соответствовала форме ударной акустической волны.

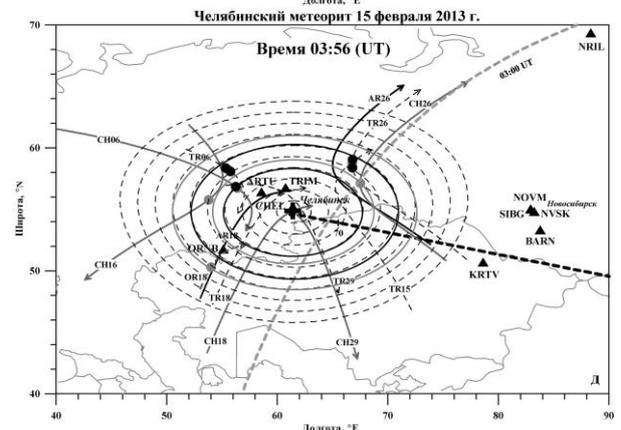
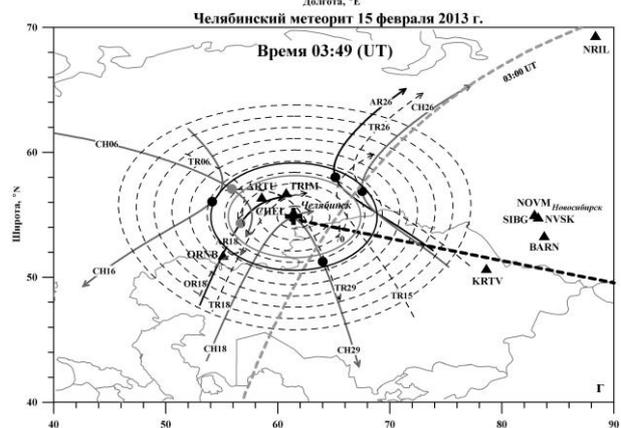
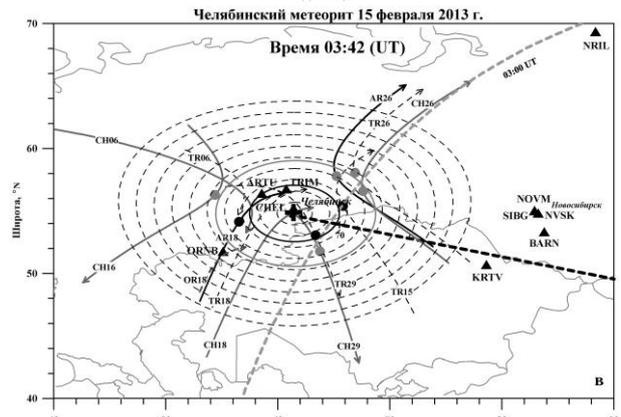
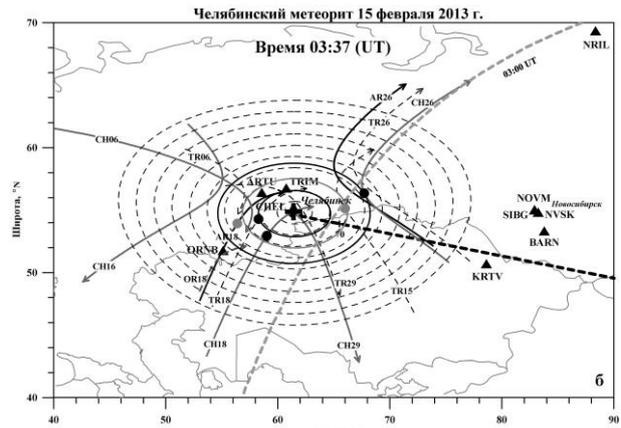


Рис. 9. Распределение возмущений ПЭС после взрыва Челябинского метеорита: а – через 14 мин, б – через 17 мин, в – через 22 мин, г – через 29 мин, д – через 36 мин. Серыми точками обозначены максимумы амплитуды колебаний ПЭС, черными – минимумы. Серыми и черными сплошными линиями показано положение волнового фронта возмущения в определенный момент времени.

Подобные возмущения наблюдались ранее при изучении землетрясений и запусков ракет. Зарегистрированные возмущения ПЭС имели период около 15 мин и амплитуду колебаний от 0.1 до 0.5 TECU, что превышало уровень фоновых флуктуаций в контрольные дни. Возмущения распространялись радиально от точки взрыва до расстояний 500–700 км. Горизонтальная скорость перемещения возмущений составляла около 320–350 м/с, что близко к скорости звука в нижней атмосфере.

Авторы выражают благодарность Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) за предоставление данных глобальной сети приемников GPS, компании НАВГЕОКОМ за предоставление данных сети приемников GPS в РФ, ООО «ГЕОСалют» (Москва) и ООО «Полеос» (Челябинск) за предоставление данных станции CHEL. Работа выполнена при поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 11, грантов РФФИ № 12-05-00865, 12-05-33032, 13-05-00979, 12-05-00855а, 13-05-92101, грантов Президиума ДВО РАН 12-ПА-08-186 и 12-И-Р4-07, а также Министерства образования и науки РФ (госконтракт № 14.518.11.7065, соглашения № 8699, 8388).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Едемский И.К., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В. Сезонные и широтные вариации параметров волновых возмущений МГД-природы, генерируемых солнечным терминатором // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 107–116.

Шустов Б.М. Информационное сообщение. Так что же произошло 15 февраля 2013 года? [Электронный ресурс] // Институт астрономии РАН: оф. сайт. 19.02.2013. URL: http://www.inasan.ru/rus/asteroid_hazard/chelyabinsk_bolid.html (дата обращения 04.03.2013).

Geens S. Reconstructing the Chelyabinsk meteor's path, with Google Earth, YouTube and high-school math [Электронный ресурс] // Ogle Earth. February 16, 2013. <http://ogleearth.com/2013/02/reconstructing-the-chelyabinsk-meteors-path-with-google-earth-youtube-and-high-school-math/> (дата обращения 28.03.2013).

Zuluaga J.I., Ferrin I. A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid // arXiv:1302.5377v1 [astro-ph.EP] 21 Feb. 2013.

<http://ru.wikipedia.org>.

<http://sopac.ucsd.edu>.

<http://www.navgeocom.ru>.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

³Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

⁴Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, Россия