

## ПОВЕДЕНИЕ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ВО ВРЕМЯ ПРОЛЕТА И ВЗРЫВА ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА

<sup>1</sup>Н.П. Перевалова, <sup>2,3</sup>Н.В. Шестаков, <sup>4</sup>А.С. Жупитяева, <sup>1</sup>Ю.В. Ясюкевич,  
<sup>1</sup>С.В. Войков, <sup>1</sup>К.А. Кутелев

## DYNAMICS OF TOTAL ELECTRON CONTENT DURING THE PASSAGE AND EXPLOSION OF CHELYABINSK METEOROID

<sup>1</sup>N.P. Perevalova, <sup>2,3</sup>N.V. Shestakov, <sup>4</sup>A.S. Zhupityayeva, <sup>1</sup>Yu.V. Yasyukevich,  
<sup>1</sup>S.V. Voeikov, <sup>1</sup>K.A. Kutelev

Исследовано поведение полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере во время пролета и взрыва Челябинского метеороида 15 февраля 2013 г. В 02:00–05:00 UT в вариациях ПЭС обнаружены возмущения, характерные для ударной акустической волны. Эти возмущения начали регистрироваться через 14 мин после взрыва метеороида, имели период около 15 мин и амплитуду колебаний 0.1–0.5 TECU, превышавшую уровень фоновых флуктуаций в контрольные дни. Возмущения распространялись радиально от точки взрыва с горизонтальной скоростью 320–350 м/с, близкой скорости звука в нижней атмосфере. В 08:00–09:00 UT на большинстве рассматривавшихся GPS-станций зарегистрированы интенсивные возмущения ПЭС амплитудой 0.5 TECU и более, имевшие форму волновых пакетов длительностью 30–40 мин. Решение вопроса, является ли этот эффект следствием взрыва Челябинского метеороида или имеет другую природу, требует дальнейших исследований.

*Ключевые слова:* GPS, ПЭС, ионосферные возмущения, Челябинский метеороид.

The dynamics of total electron content (TEC) in the ionosphere during the flight and explosion of Chelyabinsk meteoroid on 15 February 2013 has been examined. Disturbances which are typical for acoustic shock wave have been revealed in TEC variations at 02:00–05:00 UT. These disturbances started to be recorded 14 min after the meteoroid explosion. They had the period of about 15 min and the oscillation amplitude of 0.1–0.5 TECU which exceeded the level of background fluctuations during control days. The disturbances have been spreading radially from the explosion center with the horizontal velocity of 320–350 m/s that was close to the sound velocity in the lower atmosphere. At 08:00–09:00 UT, the intensive waveshape TEC disturbances with 30–40 min duration and amplitude of 0.5 TECU and more were recorded at the most of GPS stations under consideration. The question whether this effect is caused by Chelyabinsk meteoroid explosion or it has some other origin needs further study.

*Key words:* GPS, TEC, ionospheric disturbances, Chelyabinsk meteoroid.

### Введение

Метеороид, вошедший в атмосферу Земли и разрушившийся 15 февраля 2013 г. около 03:20 UT (09:20 LT) в Челябинской области, является вторым по мощности взрыва с момента падения Тунгусского метеорита в 1908 г. По данным [Popova et al., 2013], Челябинский метеороид имел размер около 19.8 м и массу порядка 13 000 тонн. Его скорость при входе в атмосферу составляла примерно 18.6 км/с. Взрыв произошел в 03:20:22 UT (09:20:22 LT) на высоте около 27 км. Энергия взрыва, по расчетам авторов [Popova et al., 2013], составила 590 кт в тротиловом эквиваленте. По данным различных геофизических инструментов падение и последующий взрыв Челябинского метеороида вызвали эффекты в геомагнитном поле, литосфере, атмосфере, ионосфере [Бернгардт и др., 2013; Горьковый и др., 2013; Черногор, 2013; Гивишили и др., 2013; Тертышников и др., 2013; Гохберг и др., 2013].

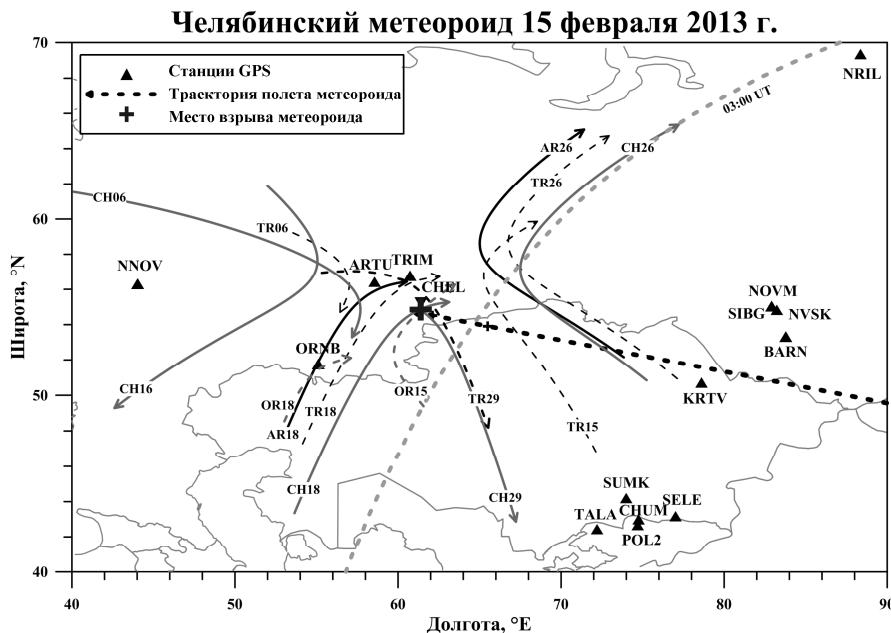
Сопутствующие взрыву короткопериодные колебания зафиксировали 12 сейсмических станций [Бернгардт и др., 2013]. Магнитуда землетрясения, вызванного Челябинским метеороидом, не превышала 2–3 [Бернгардт и др., 2013; Черногор, 2013]. Движение метеороида привело к генерации в атмосфере акустических и внутренних гравитационных волн [Черногор, 2013]. По данным [Черногор, 2013], инфразвуковые волны трижды обогнули земной шар. Обнаружены квазипериодические (период 30–40 мин, длительность 2–3 ч) колебания горизонтальной компоненты главного геомагнитного поля [Черногор, 2013]. Записи индукционных магнитометров показали наличие шумового всплеска в вариациях геомагнитного поля за 35 мин до взрыва метеороида

[Бернгардт и др., 2013]. С помощью низкоорбитальной томографии на вертикальных разрезах ионосферы над Европейской территорией России выявлены волновые возмущения (длина волны ~1.2° по широте), появившиеся спустя 2.5–3 ч после взрыва [Тертышников и др., 2013]. По данным GPS-станции ARTU обнаружено уменьшение полного электронного содержания (ПЭС) после взрыва метеороида [Тертышников и др., 2013], а также отчетливые возмущения ПЭС в форме инвертированной N-волны [Гохберг и др., 2013]. Распределение амплитуды зарегистрированных возмущений ПЭС не являлось сферически-симметричным [Гохберг и др., 2013]. Отклик ионосферы на взрыв метеороида имел ряд особенностей (форма сигнала, осевая симметрия в распределении амплитуды ионосферного отклика), отличающих его от откликов на другие геофизические процессы с большим энерговыделением (землетрясения, цунами, взрывы, извержения вулканов) [Гохберг и др., 2013].

В настоящей работе представлены результаты исследования эффектов, которые наблюдались в вариациях ПЭС в ионосфере во время падения и взрыва Челябинского метеороида, по данным ряда станций GPS, расположенных в районе взрыва метеороида, а также вблизи и на удалении от траектории его движения.

### Данные измерений и методы их анализа

Исследование вариаций ПЭС в ионосфере во время падения Челябинского метеороида проводилось на основе анализа записей фазовых измерений двухчастотных приемников GPS. На рис. 1 показано положение GPS-станций, данные которых использова-



*Рис. 1.* Карта GPS-измерений во время падения и взрыва Челябинского метеороида. Положение GPS-станций отмечено треугольниками. Линии со стрелками показывают траектории ионосферных точек, цифры у траекторий обозначают номера спутников GPS. Серая штриховая линия отмечает положение солнечного терминатора в 03:00 UT. Толстой штриховой линией показана траектория метеороида по данным [Zuluaga, Ferrin, 2013], черным крестом отмечено место его взрыва.

лись в настоящем исследовании. Данные GPS-станций ARTU, KRTV, NOVM, NVSK, SUMK, SELE, CHUM, TALA, POL2, NRIL, входящих в Международную сеть IGS, были взяты с сайта аналитического центра SOPAC [<http://sopac.ucsd.edu>], данные GPS-измерений на станциях TRIM, ORNB, NNOV, BARN, SIBG, при- надлежащих компаниям НАВГЕОКОМ, – с сайта [<http://www.navgeocom.ru>]. Кроме того, мы получили возможность использовать данные станции CHEL, любезно предоставленные компаниями ООО «ГЕО-Салют» (Москва) и ООО «Полеос» (Челябинск).

Основной вклад в значение ПЭС вносит область в районе главного максимума ионизации (слой F2). Мы приняли высоту этого слоя равной  $h_{\max} = 300$  км и представили пути перемещения спутников GPS, которые наблюдались на станциях ARTU, CHEL, ORNB, TRIM 15 февраля 2013 г. в 02:00–05:00 UT, траекториями ионосферных точек, т. е. точками пересечения луча приемник–спутник со слоем F2 (тонкие линии со стрелками: черные сплошные линии – для станции ARTU, серые – для станции CHEL; черные штриховые линии – для станции TRIM, серые – для станции ORNB, рис. 1).

Анализ вариаций ПЭС проведен для спутников GPS, наблюдавшихся на всех использованных в данной работе станциях в 02:00–10:00 UT 15 февраля 2013 г. Для выделения возмущений, вызванных падением и взрывом метеороида, исходные ряды ПЭС были отфильтрованы в диапазоне периодов 2–20 мин. Вариации ПЭС в день взрыва сравнивались с поведением ПЭС в предыдущий и последующий дни.

Геомагнитная обстановка во время падения и взрыва метеороида была спокойной:  $K_p \leq 1$  в интервале 00:00–12:00 UT, мощные солнечные вспышки отсутствовали. Рассматриваемый период характеризовался спокойным сейсмическим фоном на террито-

рии Челябинской области и близлежащих районов. Затруднило выделение возмущений ПЭС, вызванных падением и взрывом метеороида, то, что падение космического тела произошло на восходе Солнца, когда состояние ионосфера отличается сильной изменчивостью.

#### Поведение ПЭС во время падения метеороида

В работах [Afraimovich et al., 2009; Едемский и др., 2011] показано, что солнечный терминатор вызывает образование возмущений ПЭС в ионосфере. Такие возмущения часто имеют форму волновых пакетов. Волновые возмущения, вызванные солнечным терминатором, могут наблюдаться в течение 2–4 ч и даже предшествовать терминатору, что связано с его прохождением в магнитосопряженной области.

На рис. 2 приведены примеры волновых возмущений ПЭС, зарегистрированные на станциях ARTU, TRIM, ORNB, SING в 02:00–06:00 UT 14–16 февраля 2013 г. Видно, что в вариациях ПЭС присутствовали довольно интенсивные колебания с амплитудой ~0.2 TECU и периодом около 17 мин. Как правило, подобные колебания наблюдались и в контрольные дни. Вероятнее всего, они были вызваны прохождением солнечного терминатора. Ввиду интенсивных фоновых колебаний ПЭС нам не удалось выделить возмущения, вызванные полетом метеороида.

#### Возмущения ПЭС, инициированные взрывом метеороида

Несмотря на присутствие колебаний ПЭС, вызванных прохождением терминатора, на станциях ARTU, ORNB, CHEL и TRIM на отдельных лучах приемник–спутник удалось выделить возмущения, имеющие характерную форму, соответствующую ударной акустической волне. На рис. 3 такие возмущения

## Поведение полного электронного содержания во время пролета и взрыва Челябинского метеороида

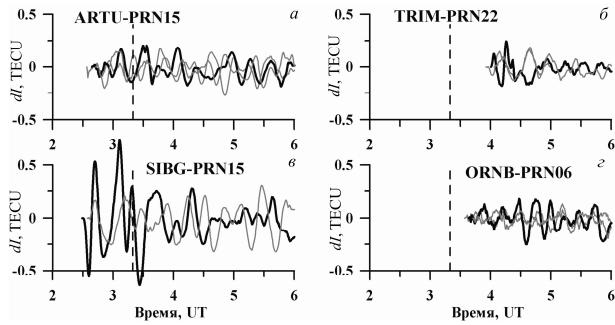


Рис. 2. Волновые возмущения ПЭС, вызванные прохождением солнечного терминатора и зарегистрированные на GPS-станциях ARTU (спутник PRN-15), TRIM (спутник PRN-22), SIBG (спутник PRN-15), ORNB (спутник PRN-06). Черными линиями показаны вариации ПЭС в день падения метеороида, серыми – в предыдущий и последующий дни. Штриховой линией отмечен момент взрыва метеороида.

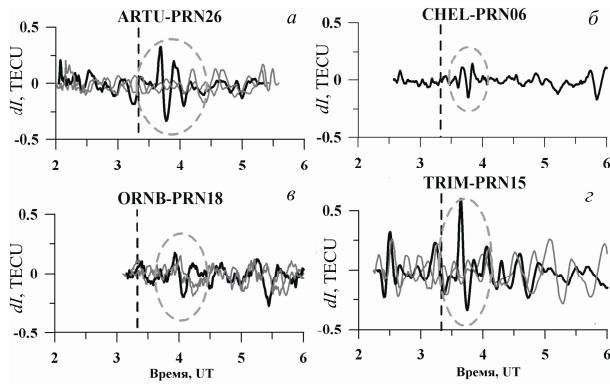


Рис. 3. Волновые возмущения ПЭС, вызванные ударной волной от взрыва метеороида и зарегистрированные на GPS-станциях ARTU (спутник PRN-26), CHEL (спутник PRN-06), ORNB (спутник PRN-18), TRIM (спутники PRN-15). Черными линиями показаны вариации ПЭС в день падения метеороида, серыми – в предыдущий и последующий дни. Вертикальной штриховой линией отмечен момент взрыва метеороида.

выделены штриховым овалом. Возмущения подобной формы, вызванные ударными акустическими волнами, наблюдаются обычно после землетрясений и запусков космических аппаратов [Calais, Minster, 1995; Afraimovich et al., 2001; Афраимович, Перевалова, 2006; Astafyeva et al., 2009]. Зарегистрированные 15 февраля 2013 г. возмущения ПЭС представляли собой колебания с периодом около 15 мин и амплитудой 0.1–0.5 TECU, превышающей уровень фоновых флюктуаций в контрольные дни. Возмущения начали регистрироваться через 14 мин после взрыва метеороида. Характерная форма колебаний и отсутствие их в контрольные дни позволяет сделать заключение, что данные возмущения вызваны ударной волной от взрыва метеороида.

Для получения картины отклика ПЭС на взрыв космического тела были построены карты распределения возмущений ПЭС (рис. 4, 5). На рис. 4 показано пространственное распределение минимумов и максимумов зарегистрированных колебаний ПЭС (черные и серые точки) по отношению к теоретически вычисленным положениям сферического волнового фронта (концентрические штриховые линии). Видно, что распределение в пространстве максимумов и минимумов ПЭС не является сферически симметрич-

ным относительно места взрыва метеороида: наблюдается вытянутость в направлении восток–запад. Этот эффект, так же как и вытянутость линий теоретического волнового фронта в том же направлении, обусловлен используемой картографической проекцией, разным масштабом вдоль координатных осей и становится заметным на расстоянии более 200 км от источника возмущений. При визуальном анализе анизотропии распространения возмущений ПЭС данный эффект обязательно должен учитываться. При сравнении наблюдаемого пространственного распределения минимумов и максимумов колебаний ПЭС в 02:00–05:00 UT и теоретически вычисленного положения сферического волнового фронта на рис. 4 легко видеть, что в первом приближении характер возмущений ПЭС соответствует сферическому фронту волны, распространяющейся от места взрыва. Для более точного определения формы фронта возмущений ПЭС необходимы измерения на большем количестве GPS-станций.

Рисунок 5 дает представление о временной динамике развития возмущений ПЭС. Ее анализ показывает, что возмущения ПЭС распространялись радиально от точки взрыва до расстояний 500–700 км. Длина волны возмущения при этом составляла около 200 км.

Оценка скорости, выполненная по времени распространения возмущений от места взрыва до точек регистрации, показала, что средняя горизонтальная скорость перемещения возмущений составляет 324 м/с. Использование метода разнесенного приема D1-GPS [Афраимович, Перевалова, 2006; Afraimovich et al., 1998] позволило рассчитать не только модуль скорости, но и азимут перемещения возмущения ПЭС. Для этого были выбраны два трехкомпонентных GPS-интерферометра, образованных ионосферными точками: ARTU-PRN-26, TRIM-PRN-26, SELE-PRN-26 и ARTU-PRN-18, TRIM-PRN-18, SELE-PRN-18. Первый интерферометр располагался к северо-востоку, а второй – к юго-востоку от места взрыва. Полученные с их помощью азимуты  $\alpha$  указывают соответственно на северо-восточное и юго-восточное распространение возмущений ПЭС. Значения  $\alpha$  на каждом интерферометре близки направлениям на предполагаемое место взрыва метеороида, что также свидетельствует о радиальном распространении возмущений от места взрыва. Средняя скорость перемещения возмущений ПЭС по данным интерферометров составила 361 м/с, что согласуется с ее оценками по времени распространения и близко скорости звука в нижней атмосфере.

## Поведение ПЭС спустя 3–6 ч после взрыва метеороида

Спустя 5–6 ч после взрыва метеороида (в 08:00–09:00 UT) на большинстве использовавшихся в данной работе GPS-станций наблюдались интенсивные колебания ПЭС с периодами 10–15 мин. Примеры таких колебаний приведены на рис. 6. Как правило, колебания имели форму волнового пакета длительностью 30–60 мин. Амплитуда колебаний превосходила амплитуды возмущений, вызванных взрывом метеороида, и нередко превышала 0.5 TECU.

В ряде случаев волновому пакету в 08:00–10:00 UT предшествовал волновой пакет большей интенсивности

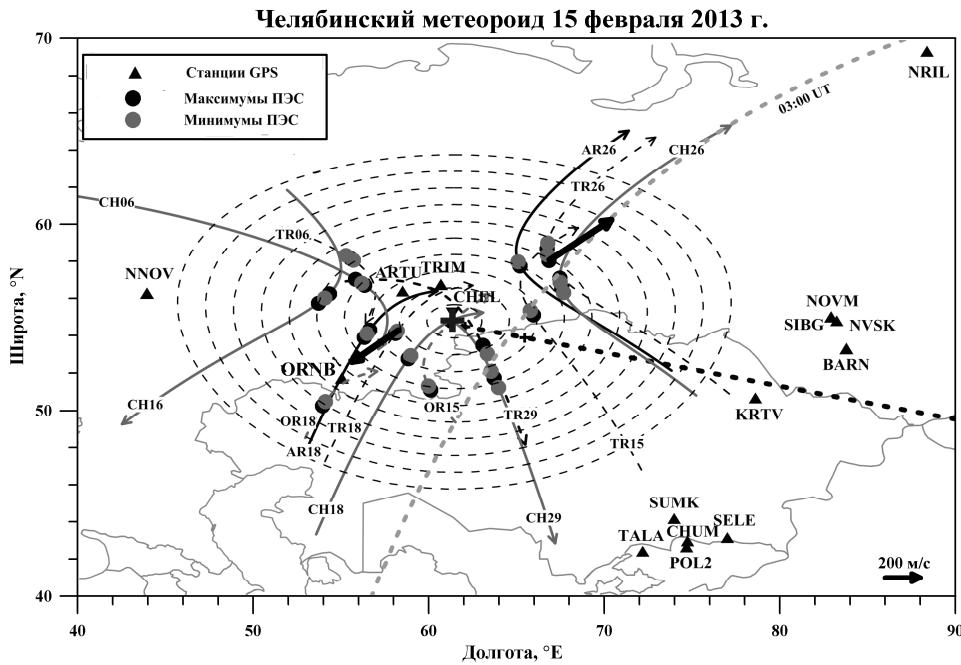


Рис. 4. Пространственное распределение возмущений ПЭС в 02:00–05:00 UT 15 февраля 2013 г. Серая штриховая линия отмечает положение солнечного терминатора в 03:00 UT. Толстой штриховой линией показана траектория метеороида по данным [Zuluaga, Ferrin, 2013], черным крестом отмечено место его взрыва. Концентрические штриховые линии построены через 100 км и соответствуют теоретическим положениям сферического фронта волны, распространяющейся от места взрыва метеороида. Толстые черные стрелки – скорости перемещения возмущений ПЭС. Масштаб скорости дан в правом нижнем углу.

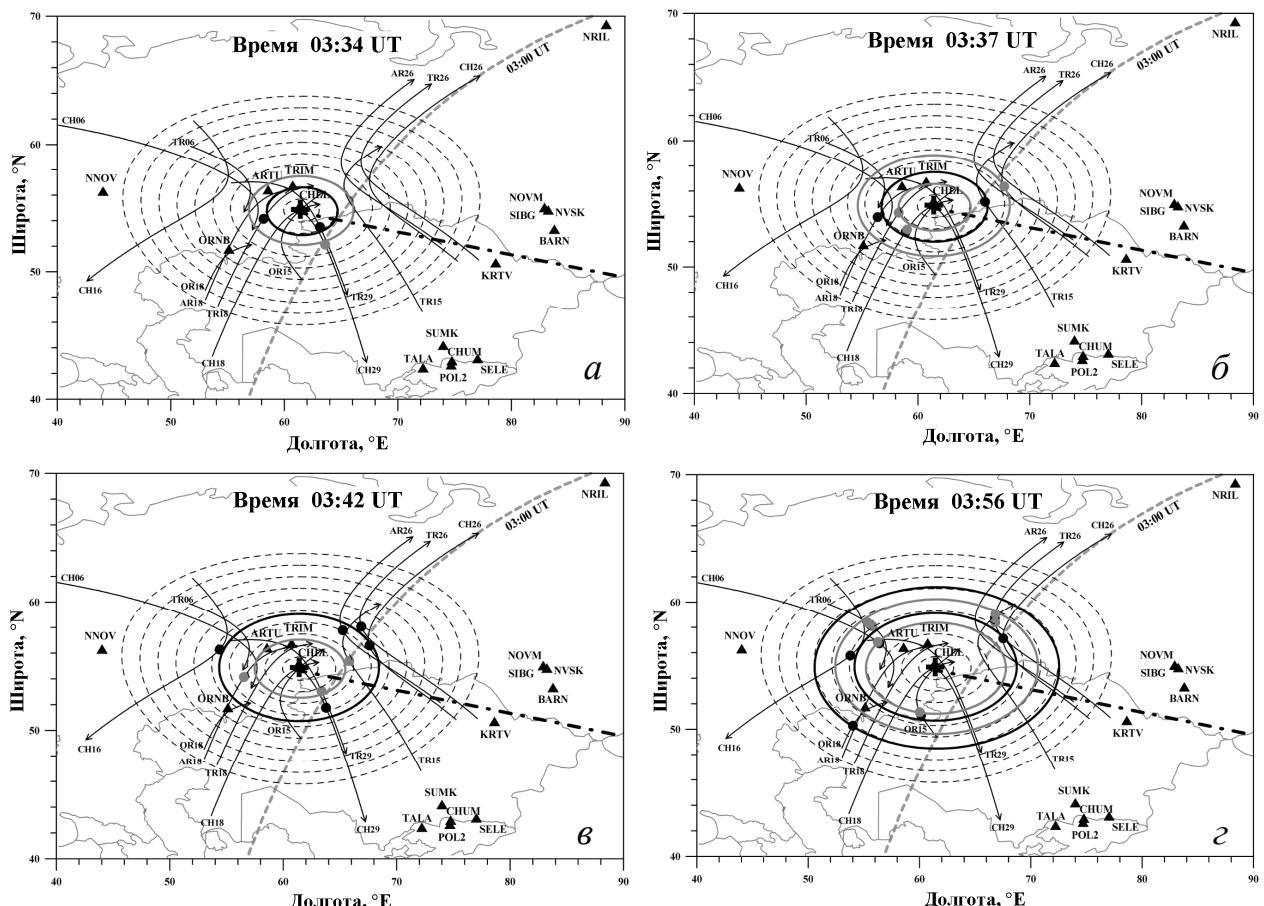


Рис. 5. Распространение возмущений ПЭС, вызванных ударной волной от взрыва метеороида. Толстыми концентрическими линиями показано положение волнового фронта возмущения, который можно провести через минимумы (серые кружки) и максимумы (черные кружки) возмущений ПЭС в каждый момент времени.

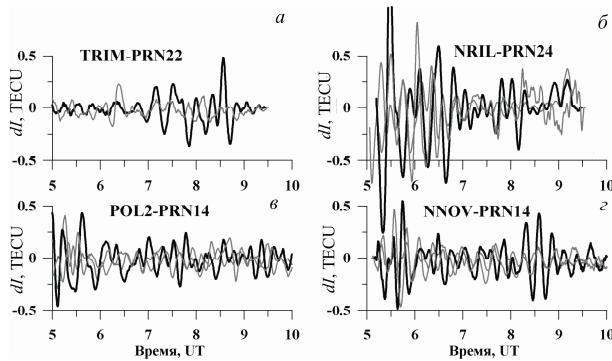


Рис. 6. Возмущения ПЭС в 05:00–09:00 UT, зарегистрированные на GPS-станциях TRIM (спутник PRN-22), NRIL (спутник PRN-24), POL2 (спутник PRN-14), NNOV (спутник PRN-14). Черными линиями показаны вариации ПЭС в день падения метеороида, серыми – в предыдущий и последующий дни.

в 05:00–06:00 UT, наблюдавшийся, как правило, и в контрольные дни. Возмущения в 08:00–09:00 UT, скорее всего, не могут быть связаны с солнечным терминатором, так как в большинстве случаев они регистрировались в дневные часы местного времени и наблюдались только в день падения метеороида. Геомагнитная обстановка при этом оставалась спокойной: возмущение в геомагнитном поле началось после 15:00 UT. Тем не менее зарегистрированные колебания ПЭС свидетельствуют о сильной возмущенности ионосферной плазмы в 06:00–09:00 UT. По GPS-данным, возмущения в ионосфере охватывают большую территорию от Норильска до Казахстана и от Новосибирска до Нижнего Новгорода. Наличие сильных возмущений в ионосфере в указанный период на большой территории подтверждается данными ионозондов и спутниковых измерений [Черногор, 2013; Гивишили и др., 2013; Тертышников и др., 2013]. Решение вопроса, является ли этот эффект следствием взрыва Челябинского метеороида или имеет другую природу, требует дальнейших исследований.

### Заключение

Проведенные по данным GPS-измерений исследования вариаций ПЭС во время полета в атмосфере Земли и взрыва Челябинского метеороида показали, что через 14 мин после взрыва в вариациях ПЭС наблюдалось возмущение, имевшее форму, характерную для ударной акустической волны. Подобные возмущения регистрировались ранее при изучении землетрясений и запусков ракет. Колебания ПЭС, зарегистрированные 15 февраля 2013 г., имели период ~15 мин и амплитуду 0.1–0.5 TECU, что превышало уровень фоновых флюктуаций в контрольные дни. Возмущения распространялись практически радиально от точки взрыва до расстояний 500–700 км. Горизонтальная скорость их перемещения была близка скорости звука в нижней атмосфере и составляла 320–350 м/с. В 08:00–09:00 UT на большинстве GPS-станций зарегистрированы интенсивные возмущения ПЭС, имевшие форму волновых пакетов длительностью 30–40 мин и амплитудой ~0.5 TECU. Их природа пока не выяснена и требует дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность ИПА РАН за предоставление данных станции BADG, ИФМ СО РАН за предоставление данных станции ULAZ, ООО «ГЕОСалют» (Москва) и лично С. Паршину, а также ООО «Полеос» (Челябинск) за предоставление данных станции CHEL, компании НАВГЕОКОМ за предоставление данных сети приемников GPS в РФ, а также Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) за предоставление данных глобальной сети приемников GPS. Работа выполнена при поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 11, гранта № НШ-2942.2014.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ, грантов РФФИ № 12-05-00865, 13-05-00979, 12-05-00855а, 13-05-92101ЯФ, 14-05-00514-а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.

Бернгардт О.И., Добринина А.А., Жеребцов Г.А. и др. Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеорита // Докл. Академии наук. 2013. Т. 452, № 2. С. 205–207.

Гивишили Г.В., Лещенко Л.Н., Аллатов В.В. и др. Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеоритом // Астрон. вестник. 2013. Т. 47, № 4. С. 304–311.

Горьковый Н.Н., Тайдакова Т.А., Проворникова Е.А. и др. Аэрозольный шлейф Челябинского болида // Там же. 2013. Т. 47, № 4. С. 299–303.

Гохберг М.Б., Ольшанская Е.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. Челябинский метеороид: отклик ионосферы по измерениям GPS // Докл. Академии наук. 2013. Т. 452, № 2. С. 208–212.

Едемский И.К., Войиков 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.

Тертышников А.В., Аллатов В.В., Глухов Я.В. и др. Региональные возмущения ионосферы и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. // Гелиофеофиз. иссл. (электронный журнал). 2013. № 4. С. 16–23.

Черногор Л.Ф. Физические эффекты Челябинского метеороида в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера // «Радиофизические исследования ионосферы»: Тезисы докл. I Украинской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.А. Мисюры. Харьков, 2013. С. 13–17.

Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1998. V. 60. P. 1205–1223.

Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., et al. The use of GPS-arrays in detecting shock-acoustic waves generated during rocket launchings // Ibid. 2001. V. 63, N 18. P. 1941–1957.

Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Leonovich A.S., et al. The MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. P. L15106. doi:10.1029/2009GL039803.36.

Astafyeva E., Heki K., Afraimovich E., et al. Two-mode long-distance propagation of coseismic ionosphere disturbances // J. Geophys. Res. Space Phys. 2009. V. 114. P. A10307. doi:10.1029/2008JA013853.

Calais E., Minster J.B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 1994, Northridge earthquake // Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22. P. 1045–1048.

Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., et al. (the Chelyabinsk Airburst Consortium). Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // <http://www.sciencemag.org/content/early/recent> / 7 November 2013 / Page 1 / 10.1126/science.1242642.

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://sopac.ucsd.edu>.

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

<sup>1</sup>*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

<sup>2</sup>*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*

<sup>3</sup>*Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, Россия*

<sup>4</sup>*Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*