

УДК 523.682 + 551.501

ОЦЕНКИ ЭПИЦЕНТРА ВЗРЫВА ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА 15.02.2013 Г. ПО ДАННЫМ ГНСС GPS

А.В. Тертышников, Д.В. Давиденко, Я.В. Глухов

ФГБУ «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова», Москва

На основе результатов диагностики ионосферной задержки сигналов КА GPS над регионом падения Челябинского (Чебаркульского) метеорита и характеристик позиционирования навигационных приемников геометрическим методом определено положение эпицентра взрыва метеорита.

Резонансные события с крупным ущербом от падений крупных космических объектов типа Челябинского (Чебаркульского) метеорита 15.02.2013 г. фиксируются примерно раз в 25-30 лет [3, 4].

По различным оценкам масса Челябинского метеорита при входе в атмосферу оценивалась до 11000 т, при диаметре 17-18 м и плотности 3,6 г/см³. Мощность взрыва составила по разным оценкам 20-500 кТ ТНТ, скорость входа в атмосферу 13,4-19,6 км/с, высота разрушения 32,5-46,7 км. Высота высвобождения основной энергии взрыва при превышении силы торможения предела прочности вещества шелушащегося метеороида составила 5-15 км. Это произошло через 32,5 с после вхождения в атмосферу 15.02.2013 г. в 03:20:33 по мировому времени (UTC) в точке с координатами 54,8° с.ш., 61,1° в.д (местное время = UTC+6) [1].

Ущерб от падения метеорита в районе Челябинска 15.02.2013 г. составил более миллиарда рублей. За медицинской помощью обратилось почти полторы тысячи человек. Психологические эффекты у переживших падение метеоритов были сходны с эффектами после крупных ЧС. Электромагнитный импульс на некоторое время нарушил работу ретрансляторов мобильной связи. Были выявлены последствия взрыва в биосфере, флоре и фауне. Обсуждались также угрозы бактериологических последствий взрыва метеороида [1]. Эффекты от падения метеороида проявились во всех геосферах.

ОСОБЕННОСТИ ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ЗАДЕРЖЕК.

Для мониторинга ионосферы используются технологии [7, 8]: наклонного зондирования ионосферы; наземного и спутникового радиозондирования ионосферы; зондирования на основе сигналов навигационных спутниковых систем; томографии ионосферы; многочастотного зондирования с геостационарных космических аппаратов (ГКА).

В первой группе технологий зондирования ионосферы в России используется редкая сеть наземных станций наклонного зондирования ионосферы. Для второй группы необходима система наземных ионозондов и ионозонды на отечественных КА. В третьей, четвертой и пятой группе для зондирования ионосферы используется просвечивание атмосферы сигналами навигационных КА (НКА) и ГКА [8] и требуется достаточно плотная сеть приемных станций для диагностики морфологии возмущений атмосферы.

Особенностью методов просвечивания ионосферы сигналами НКА и ГКА являются изменение характеристик радиосигналов со спутников в ионосфере и в тропосфере из-за уменьшения фазовой скорости радиоволн, поляризации молекул водяного пара в магнитном поле Земли [7].

Набег фазы при распространении сигнала НКА в неидеальной среде определяется протяженностью L траектории распространения сигнала между приёмником и передатчиком и коэффициентом преломления среды n [7, 8]:

$$\varphi = \frac{2\pi f}{c} \int_0^L n_1 dl + \varphi_0, \quad (1)$$

где φ – набег фазы для рабочей частоты f сигнала, n_1 – коэффициент преломления сигнала вдоль траектории прохождения сигнала, φ_0 – некоторая неизвестная начальная фаза сигнала, c – скорость света.

В ионосфере, если пренебречь малым влиянием соударений частиц среды и магнитного поля [7]:

$$n_i^{\text{ионосф}} \approx 1 - \frac{40,308n_e}{f^2}, \quad (2)$$

где n_e – локальная концентрация электронов.

Разность задержек сигналов на разных частотах пропорциональна полному электронному содержанию ионосферы (ПЭС).

Формально уравнения для групповых и фазовых измерений имеют одинаковый вид, и ионосферная задержка может быть определена с точностью до неизвестной поправки. Инструментальная задержка мало меняется на временах более нескольких дней, в то время как начальная фаза остается постоянной на временах сеанса связи.

Абсолютное значение ПЭС определяется обычно с помощью моделей ионосферы и базовых станций выверенными приемными устройствами, высокоточными частотомерами (водородный и рубидиевый стандарты частоты). Инструментальные задержки и неизвестные фазы для каждого спутника определяются на основе сравнения с базовыми станциями и оценок, указанных в технической документации (испытаний). Грубые оценки абсолютных значений ПЭС могут быть получены на основе поправок системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ, SBAS) Глобальной навигационной системы спутников (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS, где предусмотрены ретрансляторы – ГКА.

С учётом показателей преломления радиоволн в ионосфере и тропосфере, оценок задержек принимаемых сигналов и координат приёмника и передатчика, можно диагностировать характеристики просвечиваемой среды.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПО СИГНАЛАМ ГНСС ГЛОНАСС/GPS.

Представления о морфологии возмущений ионосферы можно связать с прохождением метеороида через магнитопаузу, затем с возмущениями верхней ионосферы при входе и выходе из неё метеороида, затем с конусом ударных волн, формируемых движением метеороида в средней атмосфере и его взрывом.

Взаимодействие метеороида с магнитопаузой в соответствии с её удалением и скоростью движения метеороида могло проявиться в характеристиках ионосферы за 30-40 минут до взрыва.

При взрыве метеороида в стратосфере произошло воздействие на озоносферу [6], генерирование ударной, инфразвуковых, акустико-гравитационных волн. Их добегание через 2-3 минуты до Е-слоя ионосферы инициировало очередной отклик ионосферы, а добегание до земной поверхности, могло инициировать поверхностную волну Релея.

Возмущения Е-слоя ионосферы распространяются со скоростью 600-800 м/с. Но их проявление, скорее всего, было зашумлено эффектами суперпозиции добегающих возмущений ионосферы, инициированных при входе метеороида в верхнюю ионосферу.

На основе этих представлений, для диагностики эффектов взрыва метеороида в ионосферных задержках сигналов ГНСС можно ограничиться временным отрезком в десятки минут.

Наиболее близко к месту падения метеорита находились навигационные приемники сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS в г. Екатеринбурге, в г. Тюмени и на станции Геофизической службы РАН «ARTU», расположенной на западном склоне Уральского хребта в 135 километрах к юго-западу от города Екатеринбурга, на базе Артинской сейсмической обсерватории. Екатеринбург находится примерно в 200 км от Челябинска (рис. 1).

Оценки относительных значений ПЭС в вертикальном столбе атмосферы в течение суток рассчитывались по технологии [7, 8]. Использовалось видимое созвездие навигационных КА ГНСС GPS с маской 10 градусов. Данные об ионосферных задержках сигналов ГНСС и рассчитанных характеристиках позиционирования приемника имели дискретность измерений в одну минуту.

Для учёта суточного хода ПЭС проводились расчёты среднего за предыдущие 15 суток значения ПЭС, которое вычиталось из текущего. Полученная разность нормировалась на значение среднеквадратического отклонения для анализируемого момента времени.

Результаты использования такого подхода для станции «ARTU» представлены на рис. 2.

В полуденные часы после взрыва достаточно очевидно проявился эффект обеднения ионосферы. Этот эффект близок к критерию ионосферной бури [2], но над регионом.

Анализ полученных с навигационного приёмника в Екатеринбурге оценок ПЭС проводился без учёта суточного хода. В динамике ПЭС в г. Екатеринбурге можно выделить аномальный всплеск за 30–40 минут до взрыва (рис. 3), что примерно соответствует пересечению магнитопаузы метеороидом.

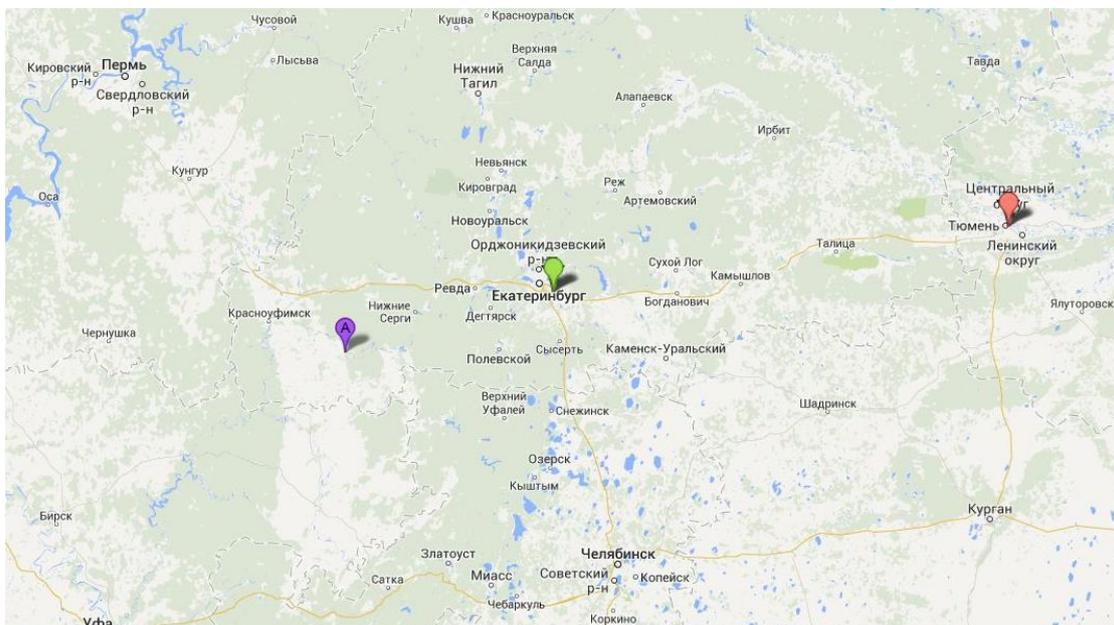


Рис. 1. Географическое расположение приемников в эксперименте по диагностике эффектов взрыва.

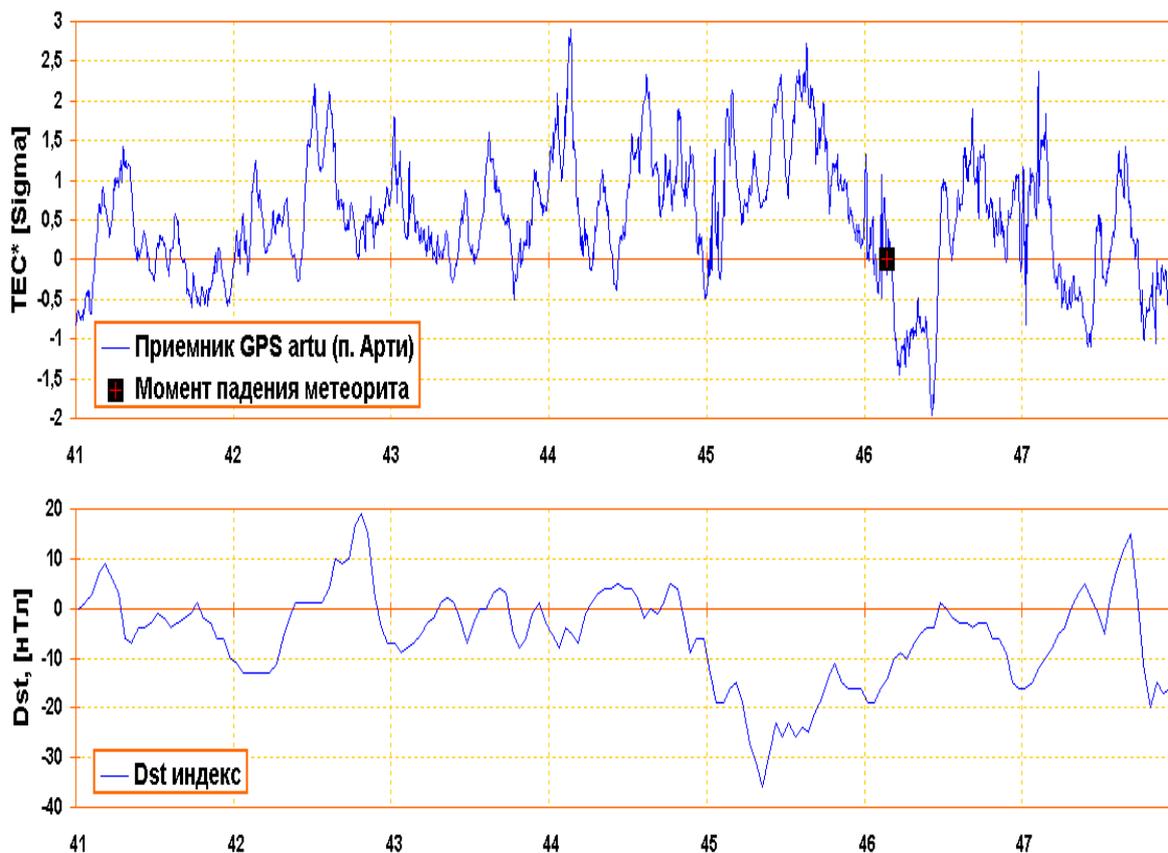


Рис. 2. Нормированные отклонения полного электронного содержания в атмосфере в единицах СКО над станцией ARTU от фона. Падение метеорита произошло в 46 сутки = 15.02.2013 г. На нижнем фрагменте представлены сопутствующие изменения Dst-индекса.

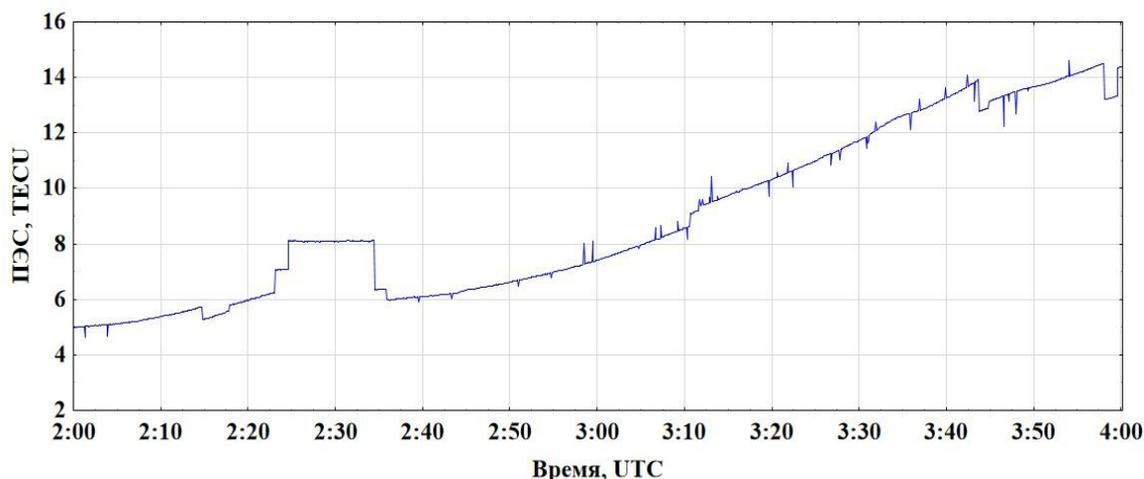


Рис. 3. Относительное изменение ПЭС над Екатеринбургом 15.02.2013 г. до и после взрыва Челябинского метеороида.

Ежесуточные отрезки полученных в Екатеринбурге оценок сравнивались между собой. Разность вариаций ПЭС в Екатеринбурге 14.02.2013 г. на отрезке времени с 6 утра до полудня возросла в 2 раза по сравнению с данными накануне и на следующие сутки после взрыва. Различная возмущенность магнитного поля (магнитное поле Земли 15.02.2013 г. было спокойным, а накануне слабо возмущенным), возможно, проявилась и в повышенных вариациях ПЭС в сутки взрыва метеорита над Екатеринбургом.

Аномальные уменьшения ПЭС над Екатеринбургом с уровнем случайности по критерию Стьюдента менее 5% для интервала времени в полтора часа соответствовали 8,25 минуте после взрыва. Аномальное увеличение ПЭС началось через 33 минуты после взрыва.

Малая амплитуда вариаций ПЭС от взрыва метеороида предполагает целесообразность исследований спектрально-временных характеристик рассчитанных рядов ПЭС, в том числе для диагностики возможных предвестниковых эффектов. Однако в динамике нормированных спектрально-временных диаграмм, рассчитанных с помощью быстрого преобразования Фурье в скользящем окне шириной в 64 минуты, значимых эффектов не проявилось. Отмечена повышенная амплитуда вариаций перед взрывом метеороида в диапазоне периодов 12, 15-19 и 23-25 минут за 40-70 минут до взрыва. Перед взрывом произошло аномальное уменьшение амплитуд для периодов вариаций ПЭС в 19-22 минуты. После взрыва повысилась амплитуда вариаций ПЭС на периодах 20 минут и 28-30 минут.

Если бы не близость по времени эффекта прохождения терминатора, эффекты взрыва метеороида были бы четче.

Достаточно интересный результат в исследовании эффектов взрыва Чебаркульского метеороида связан с диагностикой изменений характеристик позиционирования, рассчитываемых приёмником сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS в Екатеринбурге, Тюмени и на станции Арту.

На рис. 4 представлены оценки аномальных изменений широты и долготы в Екатеринбурге 15.02.2013 г.

Для 31 минуты суммарные отклонения кажущейся ошибки превысили 10 метров, что не проявлялось сутками ранее и сутками позже и выходит за границы 99% доверительного интервала, рассчитанного с учетом суточного хода оценок позиционирования в анализируемом отрезке времени с использованием известных критериев параметрической и непараметрической статистики. При этом существенных изменений рассчитанных оценок ПЭС не выявлено (рис. 3).

В Тюмени (исходные данные предоставлены ООО «Навгеоком») и на станции Арту (рис. 5) 15.02.2013 г. аналогичные эффекты выявлены через 13 минут после взрыва.

Эффекты потери точности позиционирования связаны с кратковременными искажениями сигналов спутников ГНСС GPS. Близкое расположение по времени этих эффектов друг к другу и к событиям в Челябинске позволяет сделать предположение о наличии причинно-следственной связи между взрывом Чебаркульского метеороида и возникновением описываемых эффектов и произвести расчёт эпицентра взрыва.

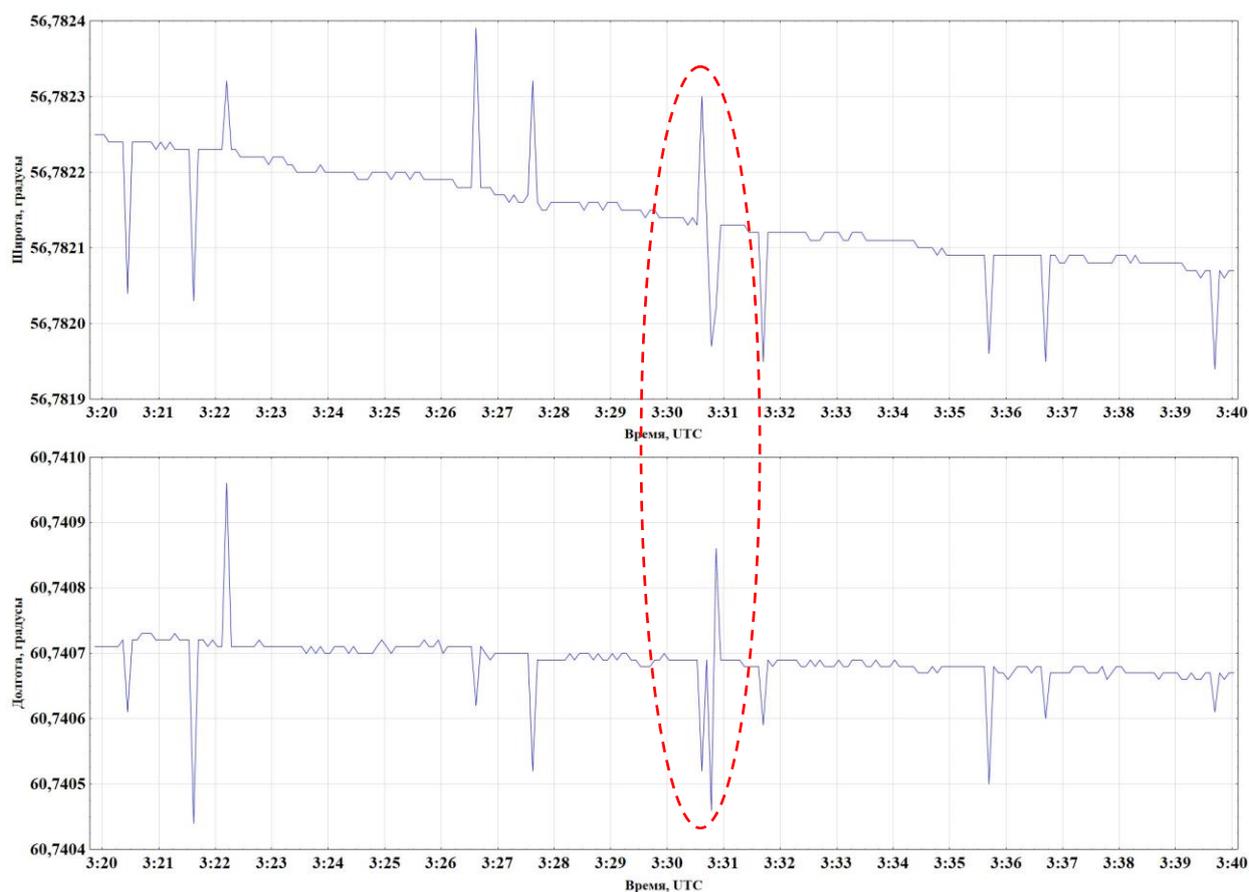


Рис. 4. Изменение рассчитанной приёмником широты (верхний фрагмент) и долготы в Екатеринбурге 15.02.2013 г.

Анализ данных о вариациях ПЭС в точках над приемниками не выявил сильных возмущений ионосферы на момент проявления эффектов потери точности позиционирования. Отсутствие возмущений в ионосфере над приёмниками свидетельствует о том, что искажение сигналов спутников GPS не связано с ионосферной рефракцией. Следовательно, при расчёте расстояния до эпицентра взрыва можно не учитывать распространение возмущения до нижней ионосферы.

На рис. 6 представлены оценочные границы области, в которой произошёл взрыв. Чёрными точками обозначены точки пересечения окружностей с центрами в точках расположения приёмников (фиолетовая метка – Арту, зеленая – Екатеринбург, красная – Тюмень) и радиусами, рассчитанными в соответствии со временем распространения возмущения (266 км для 13 мин после взрыва и 225 для 11 мин после взрыва). Средняя скорость волнового возмущения находится в околосвуковом диапазоне. Можно предположить, это инфразвук. Следует отметить, что падение метеороида было зарегистрировано на 11 инфразвуковых станций СТВТО, что косвенно подтверждает наше предположение.

В связи с тем, что скорость распространения волновых возмущений атмосферы, инициированных взрывом, не являлась постоянной величиной, а зависела от таких факторов как температура воздуха, скорость и направление ветра, можно примерно определить эпицентр взрыва с помощью геометрического метода.

За обобщённый эпицентр взрыва можно принять точку, находящуюся на пересечении медиан получившегося сферического треугольника (синяя точка). Координаты эпицентра находятся в 80 км северо-восточнее координат высвобождения основной энергии взрыва, полученных по имеющимся оценкам

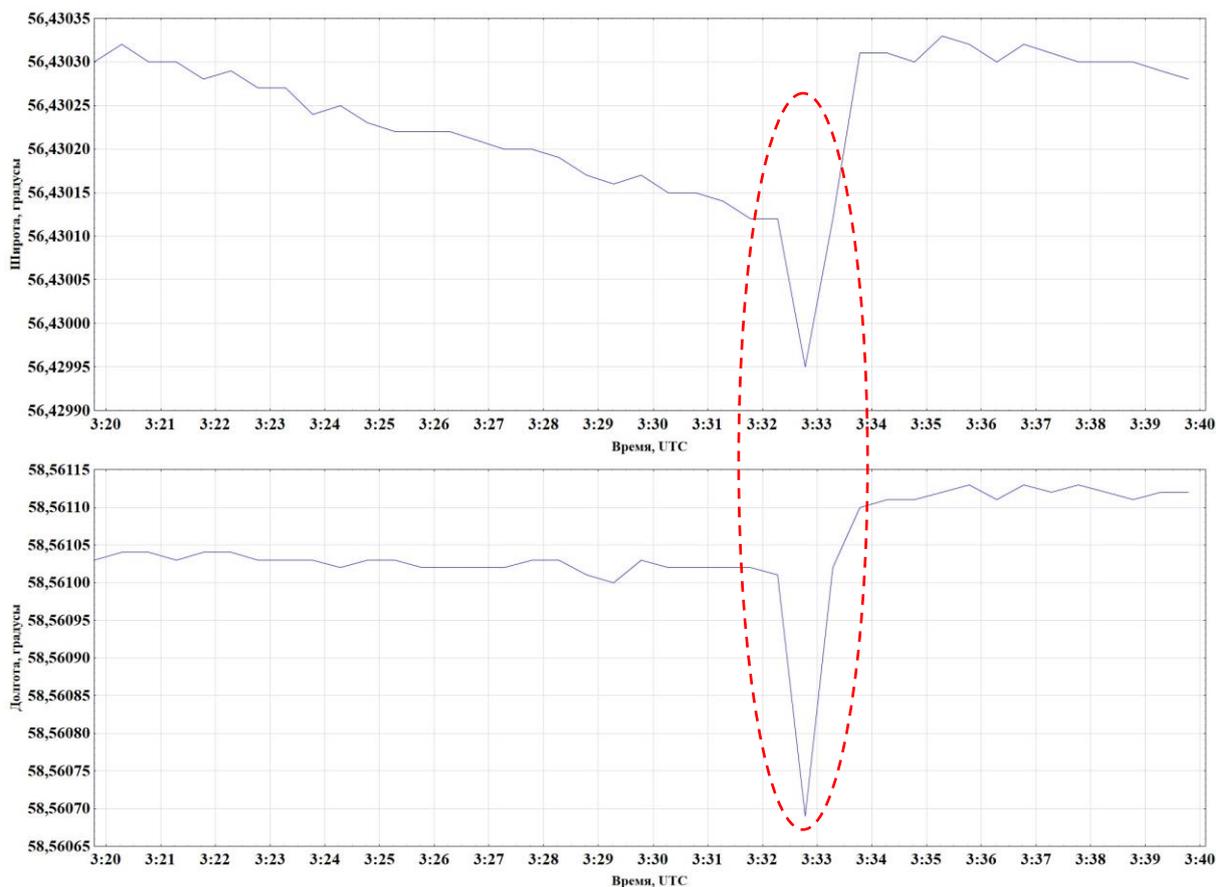


Рис. 5. Изменение рассчитанной приёмником широты (верхний фрагмент) и долготы в поселке Арту 15.02.2013 г.

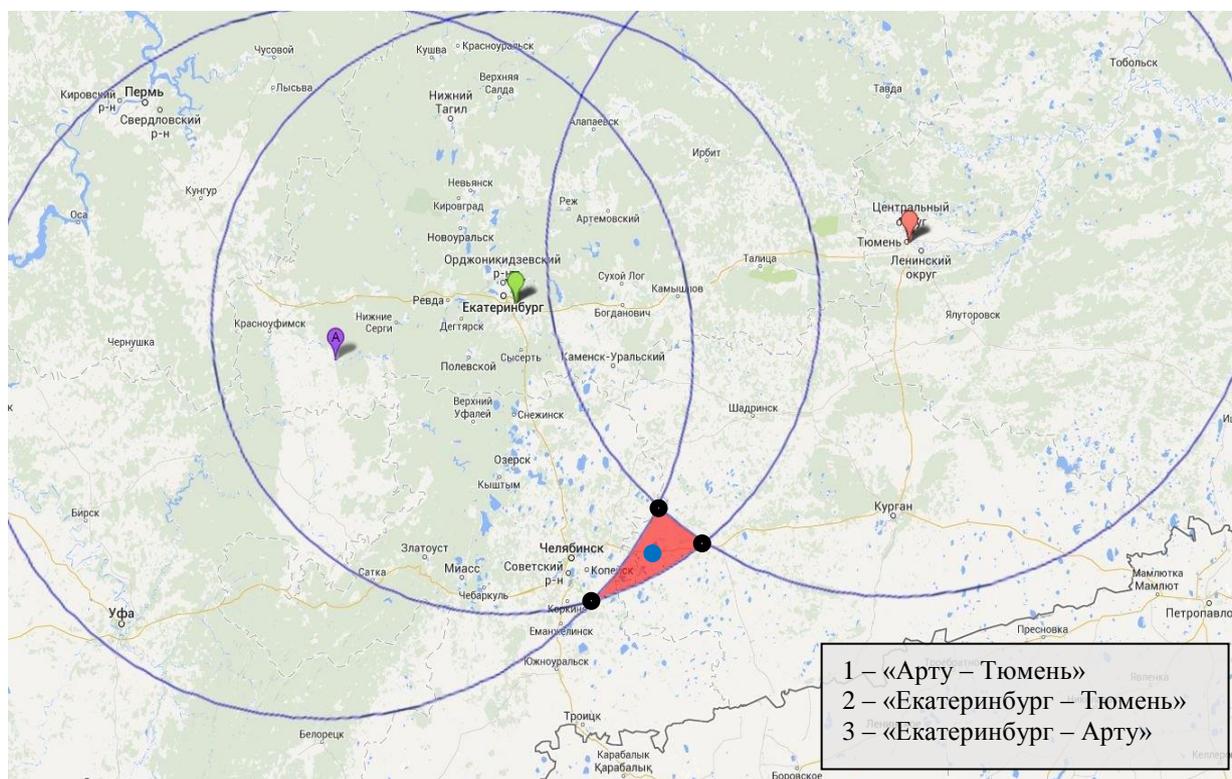


Рис. 6. Границы области взрыва метеороида.

В результате обработки данных наблюдений за ионосферной задержкой сигналов НКА над регионом взрыва метеороида выявлены:

- возмущения ионосферной задержки сигналов навигационных КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS, которые по продолжительности и интенсивности близки к градам региональной ионосферной бури на фоне 15-суточных колебаний;
- ошибки позиционирования приёмников, расположенных в пунктах: Арту, Тюмень, Екатеринбург;
- положение эпицентра взрыва Чебаркульского метеороида, расположенное северо-восточнее координат, полученных по имеющимся оценкам;
- инфразвуковой характер распространения возмущений атмосферы от взрыва метеороида подтверждается оценкой скорости его распространения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-05-29.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алпатов В.В., Буров В.А., Вагин Ю.П. и др. Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15 февраля 2013 года (<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=180>)
2. Тertyshnikov A.V. Возможные коррективы критериев опасных гелиогеофизических явлений (<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=178>)
3. Тertyshnikov A.V. Организация прогнозирования природных чрезвычайных ситуаций. Учебное пособие. – Обнинск: ВИНТИ, 2012. 270 с.
4. Тertyshnikov A.V. Основы мониторинга чрезвычайных ситуаций. Учебное пособие. – Москва-Обнинск, 2012. 278 с.
5. Тertyshnikov A.V. Результаты эксперимента по диагностике состояния ионосферы над Байконуром по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS (<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=48>)
6. Тertyshnikov A.V. Сейсмоозонные эффекты и проблема прогнозирования землетрясений. – СПб.: ВИКА, 2000. 304 с.
7. Тertyshnikov A.V., Пулинец С.А. Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации/ Патент, 2011128236/07(041832) от 07.07.2011.
8. Тertyshnikov A.V., Большаков В.О. Технология мониторинга ионосферы с помощью приёмника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (Galileo) // Информация и космос, 2010, № 1. С.100-105.