# АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОДНОЧАСТОТНЫХ ПРИЕМНИКОВ ГНСС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРЫ

### В. Б. Иванов<sup>1</sup>, А. А. Холмогоров<sup>1</sup>, О. А. Горбачев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация <sup>2</sup>Иркутский филиал Московского гражданского технического университета гражданской авиации, г. Иркутск, Российская Федерация

Работа посвящена исследованию возможностей одночастотных приемников для регистрации нерегулярных событий в ионосфере. Изыскания проводились на примере следующих событий: солнечное затмение 20 марта 2015 года, мощные землетрясения в Чили 27 февраля 2010 года и в Японии 11 марта 2011 года, взрыв Челябинского метеороида 15 февраля 2016 года. Проводилось сравнение полного электронного содержания между спутником и приемником для спокойных суток и суток с возмущением для поиска различных отклонений в его поведении. В результате было установлено, что одночастотные приемники позволяют наблюдать такие эффекты, как: плавное уменьшение, резкий излом на суточном ходе полного электронного содержания, а также волновые структуры на пути приемник-спутник. Полученные результаты сравнивались с данными двухчастотных приемников глобальной навигационной спутниковой системы, как с более точными и широко зарекомендовавшими себя для диагностики ионосферы. Данные двухчастотной диагностики качественно не отличаются от одночастотной диагностики, однако они более точные из-за различных алгоритмов восстановления полного электронного содержания. Основным результатом работы, помимо данных самой диагностики ионосферы, является вывод о применимости одночастотных приемников для диагностики ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера, мониторинг, одночастотные измерения, GPS.

Под руководством профессора Э. Л. Афраймовича (Институт солнечно-земной физики СО РАН) было сформировано новое направление диагностики состояния верхней атмосферы Земли на базе обработки сигналов спутниковых радионавигационных систем. Теоретические основы и разнообразные примеры такой диагностики представлены в монографии [1]. В этой работе выполнены исследования посредством GPS-мониторинга эффектов в земной ионосфере, связанных с солнечными затмениями, землетрясениями, геомагнитными возмущениями, мощными тропическими циклонами.

Диагностика ионосферы с использованием глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) осуществляется при помощи измерения полного электронного содержания (ПЭС) и его динамики на луче спутник-приемник. При регистрации сигналов GPS/ГЛОНАСС на двух частотах L1 и L2 возможно измерение временных ходов фазы принимаемых сигналов с точностью до неизвестной аддитивной постоянной – так называемая

фазовая неоднозначность. При этом точность измерения фазы оценивается в сотые доли радиана или, в соответствии с длинами радиоволн, теоретически составляет миллиметры.

Величина полного электронного содержания вдоль луча от фазового центра антенны спутника до антенны приемника определяется известной формулой

$$I = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \text{const}], \quad (1)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – частоты радиоволн;  $L_1\lambda_1$  и  $L_2\lambda_2$  – фазовые пути на соответствующих частотах. Наличие неизвестной константы const в формуле (1) связано именно с фазовой неоднозначностью. Таким образом, имеется возможность измерять не абсолютное значение ПЭС, а только его изменения во времени относительно начального момента регистрации. При этом измерению подлежат вариации ПЭС относительно начального момента вдоль траектории распространения сигнала, то есть наклонное полное электронное содержание. Именно формула (1) используется во всех измерениях с помощью двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС.

<sup>©</sup> Иванов В. Б., Холмогоров А. А., Горбачев О. А., 2017

DOI: 10.26732/2225-9449-2017-3-130-138

При использовании одночастотных приемников восстановление хода ПЭС возможно за счет вклада ионосферы с противоположными знаками в псевдодальности, вычисленные по фазовым и кодовым измерениям. Тогда вычитание одного из другого дает только удвоенное значение ионосферного запаздывания и шум кодовых измерений. В окончательном виде значение ПЭС, полученное таким способом на одночастотном приемнике (для частоты L1), будет иметь вид

$$I = 3,08(C1 - L_1\lambda_1).$$
 (2)

Для единообразия с формулой (1) вновь использовано произведение  $L_1\lambda_1$ . Под C1 следует понимать псевдодальность, полученную для сигнала кода C/A, поэтому величины в разности в скобках соотношения (2) могут быть взяты непосредственно из RINEX-файлов. ПЭС, рассчитанное по формуле (2), представлено уже в единицах ТЕСU. При наличии в RINEX-файлах псевдодальностей, полученных для кода повышенной точности P1, можно вместо C1 использовать и эти данные.

Первым этапом был выполнен анализ влияния на ПЭС полного солнечного затмения, произошедшего 20 марта 2015 года, наиболее четко наблюдавшегося в северо-западной части Европы и над северной Атлантикой [2, 3]. Для анализа рассматриваемого солнечного затмения наиболее подходящей является станция IGSMORP с координатами 55.2° северной широты, 1.7° западной долготы (Великобритания). Для этой станции имело место наибольшее покрытие Солнца лунным диском – около 90 %. Начало затмения в районе станции MORP соответствует примерно 8 часам 40 минутам UTC. Общая длительность затмения около двух часов.

По формуле (1) были произведены расчеты временных изменений наклонных ПЭС для спутников GPS G6, G9, G10 – спутников с наибольшим процентом перекрытия солнечным диском. Начальное время периода анализа соответствует 6 часам 47 минутам UTC. Длительность периода наблюдения составляет 3 часа 50 минут. В последующий период имели место сбои сопровождения фазы несущей, что не позволило выполнить более длительный сеанс анализа. В соответствии с форматом RINEX-файлов шаг по времени в расчетах составляет 30 секунд так, что представлены данные для 460 временных точек. Естественно было ожидать аномального поведения временного хода ПЭС по сравнению с вариациями ПЭС в другие сутки. По этой причине аналогичные расчеты были произведены для предыдущего и последующего дней 19 и 21 марта 2015 года. Поскольку период обращения спутников GPS составляет 11 часов 58 минут, геометрия и конфигурация созвездий наблюдаемых спутников в двух соседних сутках практически одинаковые.

На рис. 1 представлены графики изменений наклонных ПЭС относительно начального момента для указанных спутников. Вариации ПЭС даны в единицах TECU, составляющих 10<sup>16</sup> м<sup>-2</sup>. Здесь штриховыми линиями показан ход для дня солнечного затмения, сплошными линиями – для предыдущих суток 19 марта 2015 года и штрихпунктирными – для последующих суток 21 марта 2015 года. Можно видеть, что степень влияния затмения на ПЭС для различных спутников различна. Это объясняется тем, что ионосферные точки для различных направлений могут быть разнесены на сотни километров и попадать в различные степени закрытия солнечного диска. Наибольший эффект отмечается для спутника G10. Здесь глубина максимального отклонения ПЭС, связанного с затмением, относительно контрольных суток составляет около 15 ТЕСИ. Из графика вариаций ПЭС можно также видеть, что реакция на солнечное затмение начинается непосредственно с началом закрытия солнечного диска для соответствующей ионосферной точки. Момент начала закрытия над станцией MORP на графиках рис. 1 показан вертикальной прямой.

По представленной выше методике для сигналов спутника G10 одновременно с двухчастотными фазовыми измерениями были проведены измерения по разности псевдодальности и фазового пути на частоте L1, выполненные по формуле (2). На рис. 2 графики изменений ПЭС в расширенном до длительности 4 часов 40 минут сеансе по одночастотным и двухчастотным данным – сплошная и штриховая линии соответственно.

Несмотря на то, что в одночастотных данных наблюдается, как и ожидалось, значительная зашумленность, видно, что оба графика качественно совпадают.

Вторым этапом было исследование ионосферных эффектов мощных землетрясений [4]. Анализ различных аспектов рассматриваемых далее событий в Чили 2010 года и в Японии 2011 года проведен в том числе в работах [5–7]. Здесь констатируются факты обнаружения реакции ПЭС на землетрясение, представляются количественные характеристики движений перемещающихся ионосферных возмущений квазиволнового характера, а также изломов на временном ходе ПЭС. Даются некоторые физические интерпретации природы таких возмущений.

В частности, в публикации [8] производился поиск эффектов, идентифицируемых в виде появления спустя некоторое время после основного толчка квазипериодических возмущений регулярного временного хода ПЭС. Помимо них присутствуют возмущения, качественно отличные от формирования квазипериодических пакетов. На



Рис. 1. Относительные временные вариации наклонного ПЭС для дня затмения 20 марта – штриховые линии, предыдущего дня 19 марта – сплошные линии и для последующего дня 21 марта – штрихпунктирные линии для трех спутников GPS



Рис. 2. Временной ход относительных изменений наклонного ПЭС при солнечном затмении. Штриховая линия – двухчастотные измерения, сплошная линия – одночастотные измерения

рис. 3 показаны подобные возмущения, зарегистрированные в Японии для пар станция-спутник: USUD – PRN26 (верхний график), USUD – PRN15 (нижний график). Представлены данные для дня землетрясения 11 марта и двух контрольных дней 9 и 10 марта. Характерной особенностью временного хода ПЭС является то, что спустя некоторое время после основного толчка регистрируется резкий излом с последующими нерегулярными флуктуациями.

Аналогичные изломы на временном ходе ПЭС отчетливо наблюдаются и на временных ва-

ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ возможностей одночастотных приемников ГНСС для диагностики ионосферы



Рис. 3. Возмущения ионосферы, вызванные землетрясением в Японии 11 марта 2011 года на пути луча станция (USUD) – спутник (PRN26 – верхний график, PRN15 – нижний график). День землетрясения 11 марта – пунктирная линия и два контрольных дня 9 (сплошная тонкая линия) и 10 марта (сплошная жирная линия). Вертикальной линией изображено время первичного толчка землетрясения

риациях, представленных в работе [7], в то время как в цитируемой статье [8] они в значительной степени скрыты, возможно, в результате удаления регулярного тренды.

Аналогичная реакция на землетрясение обнаружилась и во время события в Чили, например, для пар станция-спутник: SANT – PRN13, SANT – PRN. Сравнения с временными ходами ПЭС в контрольные дни убедительно свидетельствуют о том, что регистрируется именно реакция на землетрясение.

На рис. 4 приведены графики временного хода ПЭС, определяемого в двухчастотном режиме (сплошная линия) и в одночастотном режиме с использованием С/А-кода (пунктирная линия), соответствующего графикам рис. 3. Несмотря на то, что кодовые измерения существенно более зашумлены, можно видеть, что и они вполне уверенно воспроизводят основные относительнодолгопериодические вариации, детектируемые в двухчастотном режиме. В частности, и по кодовым измерениям можно уверенно определять момент начальной реакции ПЭС на толчок землетрясения.

Фиксация времени реакции ПЭС на основной толчок позволяет выполнить оценку скорости распространения возмущений в атмосфере – ионосфере от очага землетрясения до ионосферной точки (300 км). Необходимые для расчетов координаты спутников в требуемые моменты времени были получены с помощью программы WHERESAT из пакета GPSToolkit [9, 10].

Результаты расчетов времени и скорости распространения возмущений представлены в табл. 1. Время после толчка рассчитано с точ-

Таблица 1

133

Землетрясение	Станция	Номер спутника	Время после толчка, с	Расстояние между ионосферными точками и эпицентром землетрясения, м	Скорость, м/с
Япония 11 марта 2011 г.	USUD	15	727	480637	661
		26	517	310113	600
Чили 27 февраля 2010 г.	SANT	13	643	568809	885
		23	673	450735	670

Результаты расчетов времени и скорости



Рис. 4. Сравнение временных вариаций ПЭС, определяемых по двухчастотным фазовым измерениям (сплошная линия) и одночастотным кодовым измерениям, определяемым по С/А коду (пунктирная линия) для землетрясения в Японии 11 марта 2011 года на пути луча станция (USUD) – спутник (PRN26 – верхний график, PRN15 – нижний график)

ностью в 30 секунд, что связано с соответствующей дискретностью данных в формате RINEX-файлов.

Как видим, типичные скорости распространения детектируемых «быстрых» возмущений лежат в диапазоне около 600-900 м/с. Необходимо подчеркнуть, что приведенные оценки относятся к скорости распространения первичного возмущения в нейтральной атмосфере от поверхности Земли до ионосферных высот, в то время как в цитируемых выше статьях основное внимание акцентируется на распространении возмущений собственно в ионосферной плазме. Можно ожидать, что агентом передачи первичного возмущения в нейтральной атмосфере является ударная волна акустической природы. В этом плане можно указать на то, что по данным, представленным, например, в работе [11], скорость звука меняется от примерно 300 м/с в приземной атмосфере до 900 м/с на ионосферных высотах. Указанные в табл. 1 скорости в диапазоне от 600 до 900 м/с вполне соответствуют скоростям звука в верхней атмосфере.

Рассмотренные выше геогелиофизические события, такие как солнечное затмение или мощные землетрясения, являются мощными эффектами, вызывающими соответственно значительную реакцию в ионосфере и сильные возмущения ПЭС. Представляет интерес оценить возможности одночастотной диагностики в условиях менее мощных первичных факторов, потенциально влияющих на ПЭС, например, отклик ионосферы на падение Челябинского метеороида.

Челябинский метеороид, по оценкам НАСА, является самым крупным из известных космических тел, достигших Земли после 1908 года - падения Тунгусского метеорита. Метеороид массой до 11 тысяч тонн, по разным оценкам, вошел в атмосферу Земли со скоростью около 18 км/с. Основной взрыв произошел на высоте от 21 до 25 км 15.02.2016 в 3:20:30 UTC в точке с координатами 54.84° северной широты и 61.46° восточной долготы. Космическое тело двигалось по основному азимуту 290 градусов. Угол входа в атмосферу составил 20° к горизонту. Траектория была вычислена различными учеными, например астрономами из Колумбии [12], с помощью многочисленных камер видеонаблюдения и видеорегистраторов.

Для мониторинга нерегулярных явлений в ионосфере в настоящее время используется целый ряд различных технологий. Падение Челябинского метеороида удалось сопроводить при помощи радара ЕКВ российского сегмента когерентных радаров декаметрового диапазона сети SuperDarn [13], системы ионозондов [14], спутниковых навигационных систем [15] и пр. Следует отметить, что использование всех вышеупомянутых средств осложняется весьма низкой плотностью сети инструментов на территории Российской Федерации.

Детектирование эффекта производилось посредством сравнения временных ходов наклонных ПЭС в день события и в два контрольных дня – за одни сутки до события и в последующие сутки. Расчеты проводились для двухчастотного режима по формуле (1) с исключением константы, связанной с фазовой неоднозначностью, так что начальное значение ПЭС принималось равным нулю. На рис. 6 представлено три графика для пар станция-спутник, соответственно, сверху вниз: ARTU – PRN26, NOVM – PRN30, ZECK – PRN26. Вертикальной прямой на всех графиках отмечено время взрыва Челябинского метеороида, сплошной линией на графиках показано поведение наклонного ПЭС за сутки до падения, штрихпунктирной линией – день падения, пунктирной линией – день после, для станции NOVM отсутствовали данные для дня после, поэтому на графике они не представлены.

На приведенных рисунках видно, что ионосферный эффект Челябинского метеороида достаточно уверенно регистрируется в виде появления на временном ходе наклонного ПЭС нерегулярных (квазипериодических) вариаций, начинающихся с некоторого момента времени, продолжающихся значительное время и не наблюдаемых в соседних сутках.

Одной из поставленных задач было изучение возможности регистрации эффекта по данным, полученным на одной частоте L1 – вариаций псевдодальности по коду C1 и фазы несущей на



Рис. 5. Сравнение временного хода наклонного ПЭС для пар станция-спутник (сверху вниз): ARTU – PRN26, NOVM – PRN30, ZECK – PRN26. Вертикальной линией на всех графиках отмечено время взрыва Челябинского метеороида, сплошной линией на графиках показано поведение наклонного ПЭС за сутки до падения, штрихпунктирной линией – день падения, пунктирной линией – день после

135



Рис. 6. Сравнение поведение наклонного ПЭС, вычисленного по двухчастотным (сплошная линия) и одночастотным (штрихпунктирная линия) измерениям для пары ARTU – PRN26

основной частоте. Поскольку кодовые измерения существенно зашумлены по сравнению с чисто фазовыми (как в двухчастотном режиме), данные одночастотных измерений были подвергнуты предварительной обработке, заключающейся в усреднении, с использованием плавающего среднего с временным интервалом в 7 минут. В результате и для одночастотных измерений были получены временные вариации ПЭС, на котором выявлены аналогичные двухчастотному режиму особенности, связанные с падением метеороида. Типичная ситуация показана на рис. 6. Здесь для пары ARTU – PRN26 представлен временной ход ПЭС в обоих режимах. Сплошной линией показан ход наклонного ПЭС, вычисленного по двухчастотным измерениям, и штрихпунктирной - соответственно по одночастотным измерениям.

Фиксация на временном ходе ПЭС начала отклика ионосферы на событие позволяет оценить среднюю скорость распространения возмущения в верхней атмосфере от точки взрыва до ионосферных высот. Для этого по каждой из рассматриваемых пар станция-спутник рассчитывались соответствующие расстояния до ионосферных точек.

Числовые данные представлены в табл. 2. В ней указаны соответствующие пары станцияспутник, для каждой из которых указано время начала наблюдения эффекта после взрыва в атмос-

### Список литературы

- 1. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : ГУ НЦ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
- 2. Горбачев О. А., Иванов В. Б., Холмогоров А. А. Регистрация ионосферного эффекта солнечного затмения 20 марта 2015 г. по данным GPS-мониторинга в одночастотном режиме // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 4. С. 35–39, DOI: 10.12737/12068.
- Kholmogorov A. A., Ivanov V. B. GPS-Monitoring of the Ionospheric Reaction on Solar Eclipse using Single-Frequency Mode on the Example of Event 20 March 2015 / Proceedings of V International conference ATMOSPHERE, IONOSPHERE, SAFETY, 2016. Kaliningrad, 2016, pp. 161–165.
- 4. Горбачев О. А., Иванов В. Б., Холмогоров А. А. GPS-регистрация ионосферных эффектов землетрясений в двухчастотном и одночастотном режимах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5. С. 251–261.
- 5. Astafyeva E. First ionospheric images of the seismic fault slip on the example of the Tohoku-oki earthquake / E. Astafyeva, P. Lognonne, L. Rolland // Geophysical Research Letters, 2011, vol. 38. L22104, DOI: 10.1029/2011GL049623.

фере, расстояние от места взрыва до соответствующей ионосферной точки и скорость реакции.

Таблица	2
---------	---

Скорость реакции ионосферы на взрыв Челябинского метеороида

Станция	Спутник	Время после взрыва в атмосфере, с	Расстояние от взрыва в атмосфере, км	Скорость реакции, м/с
ARTU	PRN26	927	485	523
NOVM	PRN30	567	430	758
ZECK	PRN26	2367	1749	739

Значения скорости из табл. 2 вполне соответствуют звуковым, что позволяет сделать вывод о том, что первичным агентом передачи возмущения, вероятно, является волна акустической природы.

Проведенные исследования показали, что использование одночастотных приемников сигналов ГНСС позволяет производить диагностику ионосферы, хотя, возможно, и с меньшей точностью, чем при использовании двухчастотных приемников. Полученные результаты показали возможность детектирования таких эффектов, как солнечное затмение, мощные землетрясения и взрывы больших метеороидов.

#### В. Б. Иванов, А. А. Холмогоров, О. А. Горбачев

Анализ возможностей одночастотных приемников ГНСС для диагностики ионосферы

- 6. Ясюкевич Ю. В., Захаров В. И., Куницин В. Е., Воейков С. В. Отклик ионосферы на землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. по данным различных GPS-методик // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 1. С. 113–122.
- Kakinami Y. Tsunamigenic ionospheric hole / Y. Kakinami, M. Kamogawa, Y. Tanioka, S. Watanabe, A.R. Gusman, J.-Y. Liu, Y. Watanabe, T. Mogi // Geophysical Research Letters, 2012, vol. 39. L00G27, DOI: 10.1029/2011GL050159.
- Перевалова Н. П. Исследование ионосферных возмущений, вызванных землетрясением в Японии 11 марта 2011 г., по данным сети GEONET / Н. П. Перевалова, С. В. Воейков, Ю. В. Ясюкевич, А. Б. Ишин, Е. С. Воейкова, В. А. Саньков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 3. С. 172–180.
- 9. Tolman B. The GPS Toolkit / B. Tolman, R. B. Harris // Linux Journal. September, 2004, p. 72.
- Harris R. B. GPSTk\_An Open Source GPS Toolkit / R. B.Harris, R. G. Mach // GPS Solutions, March 2007, vol. 11, no. 2, pp. 145–150.
- Berngardt O. I. Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06:00–06:20UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake / O. I. Berngardt, G. V. Kotovich, S. Ya. Mikhailov, A. V. Podlesnyi // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2015, no. 132, pp. 106–115.
- 12. Zuluaga J. I. A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid / J. I. Zuluaga, I. Ferrin // https://arxiv.org/abs/1302.5377. 2013
- Бернгардт О. И. Ионосферные эффекты в первые два часа после падения метеорита «Челябинск» / О. И. Бернгардт, В. И. Куркин, Г. А. Жеребцов, О. А. Кусонский, С. А. Григорьева // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 24. С. 3–14.
- 14. Гивишвили Г. В. Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеоритом / Г. В. Гивишвили, Л. Н. Лещенко, В. В. Алпатов, С. А. Григорьева, С. В. Журавлев, В. Д. Кузнецов, О. А. Кусонский, В. Б. Лапшин, М. В. Рыбаков // Астрономический вестник. 2013. Т. 47, № 4. С. 304–311.
- 15. Тертышников А. В. Региональные возмущения ионосферы и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. / А. В. Тертышников, В. В. Алпатов, Я. В. Глухов, Д. В. Давиденко // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 5. С. 65–73.

История статьи Поступила в редакцию 1 августа 2017 г. Принята к публикации 4 сентября 2017 г.

## ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING SINGLE-FREQUENCY GNSS RECEIVERS FOR MONITORING OF THE IONOSPHERE

### <sup>1</sup>V. B. Ivanov, <sup>1</sup>A. A. Kholmogorov, <sup>2</sup>O. A. Gorbachev

<sup>1</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation <sup>2</sup>Irkutsk Branch of the Moscow Civil Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, Russian Federation

This paper is devoted to the investigation of the capabilities of single-frequency receivers for recording irregular events in the ionosphere. Research was conducted on the example of the following events: solar eclipse on 20 March 2015, powerful earthquakes in Chile on 27 February 2010 and in Japan on 11 March 2011, as well as the explosion of the Chelyabinsk meteoroid on 15 February 2016. Compared the total electron content between the satellite and the receiver for undisturbed days with the perturbation days for search of various deviations in the behavior of it. As a result, it was found that single-frequency receivers allow observing such effects as: smooth decrease, sharp break at the daily total electron content, as well as wave structures on the receiver-satellite path. The obtained results were compared with the data of two-frequency diagnostics do not qualitatively differ from single-frequency diagnostics, however they are more accurate due to various algorithms of total electron content restoration. The main result of the work, in addition to the data of the ionosphere diagnostics, is the conclusion about the applicability of single-frequency receivers for ionosphere diagnostics.

Keywords: ionosphere, monitoring, single-frequency measurements, GPS.

## References

- 1. Afraimovich E. L., Perevalova N. P. *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli* [GPS-monitoring of the upper atmosphere of the Earth]. Irkutsk, 2006, 480 p. (In Russian)
- 2. Kholmogorov A. A., Ivanov V. B., Kholmogorov A. A. Registratsiya ionosfernogo effekta solnechnogo zatmeniya 20 marta 2015 g. po dannym GPS-monitoringa v odnochastotnom rezhime [Registration of the ionospheric effect of

Науко

the solar eclipse on March 20, 2015 based on GPS monitoring in single-frequency mode]. Solnechno-zemnayafizika, 2015, vol. 1, no. 4, pp. 35-39, DOI: 10.12737/12068. (In Russian)

- 3. Kholmogorov A. A., Ivanov V. B. GPS-Monitoring of the Ionospheric Reaction on Solar Eclipse using Single-Frequency Mode on the Example of Event 20 March 2015. Proceedings of V International conference ATMOSPHERE, IONOSPHERE, SAFETY. 2016, pp. 161–165.
- 4. Gorbachev O. A., Ivanov V. B., Kholmogorov A. A. *GPS-registratsiya ionosfernykh effektov zemletryasenii v dvukh-chastotnom i odnochastotnom rezhimakh* [GPS-registration of ionospheric effects of earthquakes in two-frequency and single-frequency modes]. Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2016, vol. 13, no. 5, pp. 251–261 (In Russian)
- 5. Astafyeva E., Lognonne P., Rolland L. First ionospheric images of the seismic fault slip on the example of the Tohokuoki earthquake. Geophysical Research Letters, 2011, vol. 38, L22104, DOI: 10.1029/2011GL049623
- Yasyukevich Yu. V., Zakharov V. I., Kunitsin V. E., Voeikov S. V. Otklik ionosfery na zemletryasenie v Yaponii 11 marta 2011 g. po dannym razlichnykh GPS-metodik [The response of the ionosphere to the earthquake in Japan on March 11, 2011, according to various GPS techniques]. Geomagnetizm i aeronomiya, 2015, vol. 55, no.1, pp. 113–122. (In Russian)
- Kakinami Y., Kamogawa M., Tanioka Y., Watanabe S., Gusman A.R., Liu J.-Y., Watanabe Y., Mogi T. Tsunamigenic ionospheric hole. Geophysical Research Letters, 2012, vol. 39, L00G27, DOI: 10.1029/2011GL050159
- Perevalova N. P., Voeikov S. V., Yasyukevich Yu. V., Ishin A. B., Voeikova E. S., San'kov V. A. *Issledovanie ion-osfernykh vozmushchenii, vyzvannykh zemletryaseniem v Yaponii 11 marta 2011 g., po dannym seti GEONET* [The study of ionospheric disturbances caused by the earthquake in Japan on March 11, 2011, according to the GEONET network]. Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2012, vol. 9, no. 3, pp. 172–180. (In Russian)
- 9. Tolman B., Harris R. B. The GPS Toolkit. Linux Journal. September, 2004, p. 72.
- 10. Harris R. B., Mach R. G. GPSTk\_An Open Source GPS Toolkit. GPS Solutions, March 2007, vol. 11, no. 2, pp. 145–150.
- Berngardt O. I., Kotovich G. V., Mikhailov S. Ya., Podlesnyi A. V. Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06:00–06:20UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2015, no. 132, pp. 106–115.
- 12. Zuluaga J. I., Ferrin I. A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid. Available at: https://arxiv.org/abs/1302.5377
- 13. Berngardt O. I., Kurkin V. I., Zherebtsov G. A., Kusonskii O. A., Grigor'eva S. A. *Ionosfernyeeffekty v pervye dva chasa posle padeniya meteorita «Chelyabinsk»* [Ionospheric effects in the first two hours after the fall of the meteorite «Chelyabinsk»]. Solnechno-zemnayafizika. 2013, no. 24, pp. 3–14. (In Russian)
- Givishvili G. V., Leshchenko L. N., Alpatov V. V., Grigor'eva S. A., Zhuravlev S. V., Kuznetsov V. D., Kusonskii O. A., Lapshin V. B., Rybakov M. V. *Ionosfernye effekty stimulirovannye Chelyabinskim meteoritom* [Ionospheric effects stimulated by the Chelyabinsk meteorite]. Astronomicheskii vestnik, 2013, vol. 47, no. 4, pp. 304–311. (In Russian)
- 15. Tertyshnikov A. V., Alpatov V. V., Glukhov Ya. V., Davidenko D. V. Regional'nye vozmushcheniya ionosfery i oshibki pozitsionirovaniya nazemnogo navigatsionnogo priemnika pri vzryve Chelyabinskogo (Chebarkul'skogo) meteoroida 15.02.2013 g. [Regional perturbations of the ionosphere and errors in positioning of the ground navigation receiver during the explosion of the Chelyabinsk (Chebarkul) meteoroid February 15, 2013]. Geliogeofizicheskie issledovaniya. 2013, no. 5, pp. 65–73. (In Russian)

### *Article history Received 1 August 2017 Accepted 4 September 2017*

138