

УДК 550.380; 551.508; 551.501

## **ЭФФЕКТ МАГНИТНОЙ БУРИ 17.03.2015 Г. В ПОЛНОМ ЭЛЕКТРОННОМ СОДЕРЖАНИИ ИОНОСФЕРЫ НАД ЭЛЬБРУСОМ**

А.В. Тertyшников

Поступила в редакцию 15.04.2015

Представлены результаты диагностики полного электронного содержания ионосферы (ПЭС) над Эльбрусом в марте 2015 г. Выделен эффект магнитной бури 17.03.2015 г., на фоне которого отмечены небольшие изменения ПЭС во время солнечного затмения и перед активизацией сейсмичности на западе и востоке Кавказа.

Рассмотрены изменения оценок позиционирования по характеристикам сигналов КА Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ИОНОСФЕРА, ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ, ПРЕДВЕСТНИКИ, ГЛОНАСС, GPS, ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ, ПРЕДВЕСТНИКИ, СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ, ПРИЕМНИК, ТЕХНОЛОГИЯ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ, РИСКИ, ЭКСПЕРИМЕНТ, МАГНИТНАЯ БУРЯ, СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ

### **ВВЕДЕНИЕ**

В ходе экспедиционных исследований на труднодоступной станции Чегет 15–25.06.2014 г. по сигналам видимой группировки навигационных КА (НКА) Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) выявлено аномальное изменение мгновенных оценок координат (псевдопозиционирования), соответствующее складывающимся сейсмическим условиям Кавказа. Для проверки этого эффекта с 1 марта 2015 г. согласована передача данных со станции ГАИШ МГУ на пике Терскол (код TRSK) [1]. На основе этих данных организован мониторинг ионосферы над Эльбрусом и анализ характеристик псевдопозиционирования геодезического навигационного приемника.

### **ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Приемник сигналов НКА обеспечивает автоматическое непрерывное в реальном масштабе времени определение и выдачу координат антенных устройств в системах координат WGS-84, ПЗ-90. Данные представляются в геодезической проекции с текущими отсчетами времени [2].

Значительную ошибку в оценки позиционирования вносят ионосферная и тропосферная задержки сигналов КА ГНСС. Эти эффекты обычно фильтруются при обработке получаемой навигационным приемником информации. Увеличение высоты положения приемника позволяет игнорировать тропосферную ошибку.

Во внутренних алгоритмах приемовычислительных устройств геодезических навигационных приемников заложена идеология выбора 3-4 НКА, обеспечивающих достаточную конфигурацию для минимизации среднеквадратического отклонения расчетов оценок позиционирования — основной задачи ГНСС.

Для геофизических приложений [3] имеет смысл анализ «сырых» характеристик принимаемых сигналов по всей видимой группировке НКА ГНСС. Увеличение используемой в расчетах группировки НКА позволяет существенно расширить масштаб зондируемой атмосферы до региона и вариации принимаемых сигналов НКА.

Рассчитанные по сигналам видимых на каждый момент наблюдений КА ГНСС вектора псевдодальностей до них формируют многогранную пирамиду.

На основе этих данных и сведений о положении НКА можно рассчитать оценку

псевдопозиционирования вершины пирамиды – антенны навигационного приемника. В последовательности рассчитанных оценок можно диагностировать различные геофизические эффекты.

Одночастотный метод зондирования характеристик псевдокоординат (псевдопозиционирования), предлагаемый для проведения эксперимента отработывался в зоне действия стенда "Сура" [4] и на Байконуре [4], при оценке эпицентра зоны взрыва Чебаркульского метеороида [6] и стал основой технологии зондирования ионосферы, в которую вошли наработки технологий наклонного зондирования ионосферы, наземного и спутникового радиозондирования ионосферы, зондирования на основе сигналов навигационных спутниковых систем, томографии ионосферы, многочастотного зондирования с геостационарных космических аппаратов (ГКА) [7].

Расчет псевдокоординат осуществляется методом наименьших квадратов и методом последовательных приближений. В качестве априорных координат приемника используются координаты, записываемые приемником в заголовке RINEX файла. В ходе тестовых испытаний отмечена быстрая сходимость решений, что подтверждено также в [8].

Для обработки данных с указанных приемников был разработан программно-аппаратный комплекс, позволивший автоматизировать обработку данных в формате RINEX и представление результатов в соответствии с требованиями ионосферной службы Росгидромета [9] Валидация [9] проводилась при сравнении с данными модели ионосферы IRI – 2011.

Дискретности поступления данных составила 1/30 Гц. Данных расчетов оценок ско – каждую минуту.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В марте 2015 г. в изменении ПЭС над Эльбрусом особенно ярко проявилась магнитная буря в ночь с 17 на 18 марта, классифицируемая в системе оперативного оповещения Росгидромета в 21:20 мск 17.03.2015 г. как очень сильное магнитное возмущение класса G4 [10, 11], индекс Kp=8. Ее результатом стали полярные сияния, наблюдаемые даже в московской области, и форбуш-эффект.

В суточном ходе относительного ПЭС, рассчитанного дифференциальным методом [7] без учета инструментальных и аппаратных погрешностей, магнитная буря проявилась в существенном обеднении плотности ионосферы (рис. 1).

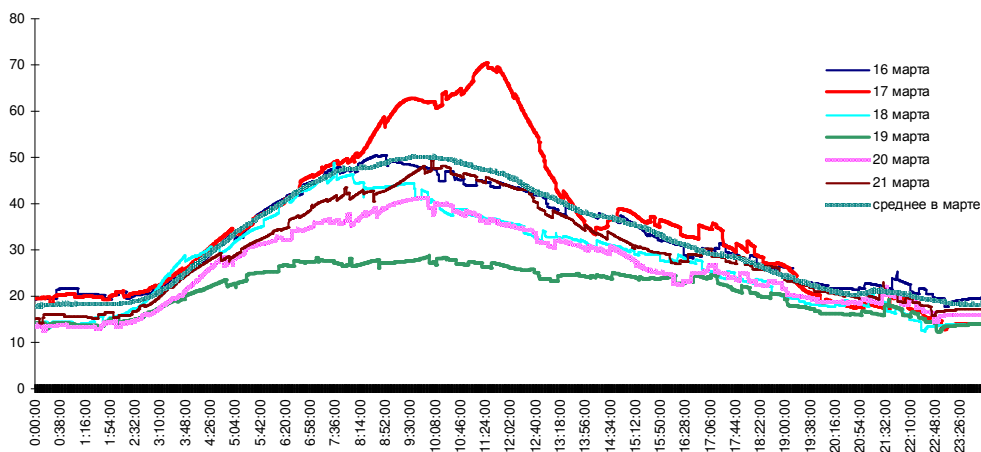


Рис. 1. Изменение ПЭС над Эльбрусом 16-21.03.2015 г.

За сутки до магнитной бури суточный ход ПЭС соответствует среднему за март. При этом, по данным NOAA была зафиксирована солнечная вспышка в рентгеновском (M-класса) и оптическом (2 класса) диапазонах. Это отразилось в аномальном увеличении ПЭС с 8 часов 17.03.2015 г. перед началом магнитной бури, достигшее максимума к полудню. В эти же сутки были зафиксированы солнечная вспышка в рентгеновском (M-класса) и оптическом (слабая) диапазонах

18 марта значения ПЭС оказались ниже средних.

19 марта ПЭС достигает аномально низких значений.

Эффект солнечного затмения 20 марта с полудня до 15 часов проявляется очень слабо. На эти же сутки пришлось новолуние.

21 марта изменение ПЭС соответствует среднемесячным оценкам.

Изменение среднесуточных оценок среднеквадратического отклонения (ско) оценок ПЭС в марте 2015 г. над Эльбрусом представлено на рис. 2.

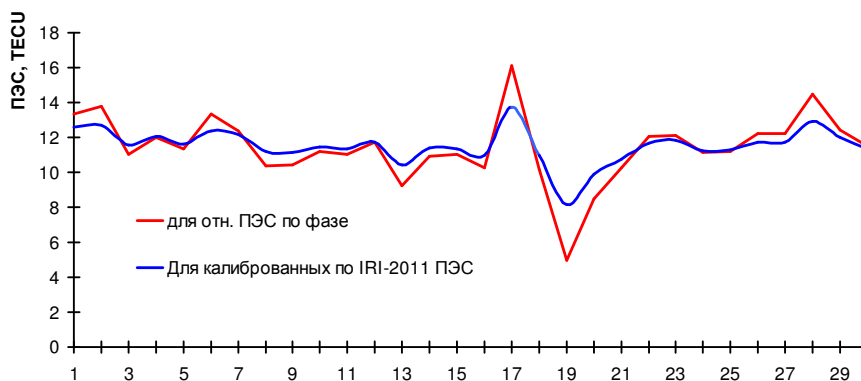


Рис. 2. Изменение среднесуточных оценок ско ПЭС в марте 2015 г. над Эльбрусом.

Синяя линия соответствует расчетам по оценкам ПЭС, откалиброванным по модели IRI-2011, то есть с учетом аппаратных и инструментальных погрешностей.

Достаточно очевидно проявление магнитной бури в вариациях ско. Кроме этого заслуживают внимания небольшие всплески 6 (после четвертой четверти Луны 5 марта) и 28 марта (после первой четверти Луны 27 марта).

При анализе отклонений псевдопозиционирования использовались оценки минутных ско. Полученная оценка ско присваивалась левой границе окна.

Для полученного ряда ско рассчитывалось среднее текущее значение по 5 предыдущим значениям, чтобы выявить отклонения анализируемой характеристики ско от ее пятисуточной средней (рис. 3).

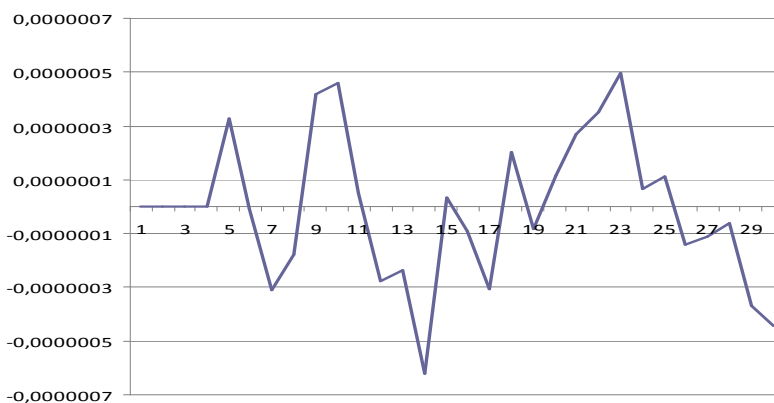


Рис. 3. Изменение отклонений минутных ско оценок псевдошироты приемника на пике Терскол от пятисуточных средних в марте 2015 г.

Аномальный всплеск 5 марта, скорее всего, был обусловлен техническими сбоями при передаче массива данных. А всплески 9-10 и 23 марта интересны с точки зрения анализа сейсмических условий Кавказа. По данным Геофизической Службы РАН [12] на Кавказе в марте были зафиксированы слабые землетрясения 6 марта (в Каспийском море и на Западном Кавказе, 8.03 в Черном море, 9 и 12-13 марта в Каспийском море и на Восточном Кавказе, 17, 21, 24-26, 29-31 марта).

Если ограничиться минимальной магнитудой (по объемным сейсмическим волнам)  $m_b=4$ , то из каталога землетрясений Кавказа выделяются следующие события:

Дата/время	широта	долгота	глубина	магнитуда/К	Район
015-03-06 06:00:51.6	40.72	51.8	70	4.4/10	Каспийское море
2015-03-12 00:42:31.7	38.42	49.26	50	4.7/8	Каспийское море
2015-03-24 16:00:55.0	41.09	43.87	5	4.2/7	Грузия - Армения - Турция погран.область
2015-03-30 21:23:46.1	32.72	48.08	10	4.3/6	Западный Иран
2015-03-30 10:22:07.3	40.99	48.71	10	4.2/6	Восточный Кавказ
2015-03-30 09:54:03.8	41.04	48.77	10	4.3/10	Восточный Кавказ

Это тоже слабые землетрясения. Из них по географическому положению станции ГАИШ МГУ на пике Терскол можно выделить только событие 24 марта. Перед ним анализируемая характеристика проходила небольшой локальный экстремум. Возможно это совпадение, в том числе из-за влияния магнитной бури.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диагностики полного электронного содержания ионосферы над Эльбрусом в марте 2015 г. выявлен эффект магнитной бури 17.03.2015 г., на фоне которого отмечены небольшие изменения ПЭС во время солнечного затмения.

Рассмотрены изменения оценок псевдопозиционирования станции Терскол по характеристикам сигналов КА Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в связи с сейсмическими условиями Кавказа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-05-00029, № 14-05-10024, № 15-05-10029.

Благодарности. Автор благодарит Юрия Владимировича Писанко, Юрия Кирилловича Калинина, В.К. Милюкова и А.П. Миронова за внимание к работе и полезные дискуссии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Milyukov V., Kopaev A., Zharov V., Mironov A., Myasnikov A., Kaufman M., Duev D. Monitoring crustal deformations in the Northern Caucasus using a high precision long base laser strainmeter and the GPS/GLONASS network // Journal of Geodynamics. 2010, 49, pp. 216-223. DOI:10.1016/j.jog.2009.10.003
2. Тертышников А.В., Большаков В.О. Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (GALILEO) // Информация и космос. 2010. Т. 1. С. 100-105.
3. Тертышников А.В. Основы мониторинга чрезвычайных ситуаций. Учебное пособие. – Москва-Обнинск, 2013. 278 с.
4. Тертышников А.В., Суровцева И.В., Фролов В.Л., Смирнов В.М. Оценивание восстановленных по сигналам НКА ГЛОНАСС/GPS профилей электронной концентрации в ионосфере / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - Москва: ИКИ РАН, 2010. Т. 3. С. 115-119.
5. Тертышников А.В. 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. Тертышников А.В., Алпатов В.В., Глухов Я.В., Давиденко Д.В. Региональные возмущения ионосферы и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. //Гелиогеофизические исследования, <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=162>. Выпуск 5, 2013, С. 65–73.
7. Тертышников А.В., Пулинец С.А. Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и

- комплекс для его реализации/ Патент, заявка № 2011128236 от 07.07.2011 на получение патента РФ на изобретение. Бюллетень Изобретения. 2013 № 4. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 01.02.2013.
8. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Т. 1, 2. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005.
  9. Глухов Я.В. Программа расчета относительных значений полного электронного содержания по характеристикам ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo. – Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619293, ФИПС, 01.10.2013.
  10. Магнитные индексы. Учебное пособие/ Тертышников А.В., Сыроешкин А.В., Лапшин В.Б. и др. – Москва-Обнинск, 2013. 178 с.
  11. Тертышников А.В. Возможные коррективы критериев опасных гелиогеофизических явлений //Гелиогеофизические исследования, <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=190>
  12. <http://www.ceme.gsr.ru/>

## EFFECT OF THE MAGNETIC STORM OF 17.03.2015 IN THE TOTAL IONOSPHERE ELECTRON CONTENT OVER ELBRUS

A.V. Tertyshnikov

Results of the diagnostics of the total electron content (TEC) over Elbrus in March, 2015 are presented. The effect of the magnetic storm of 17.03.2015 is selected and noted are little changes of TEC during the solar eclipse and before seismic activity in the West and East Caucasus on the background of the event. Changes of estimates of positioning obtained from the characteristics of signals of the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are considered.

**KEYWORDS:** IONOSPHERE, EARTHQUAKE, FORERUNNERS, GLONASS, GPS, POSITIONING, ELECTRON CONTENT, RECEIVER, TECHNOLOGY, SEISMIC DANGER, RISKS, EXPERIMENT, MAGNETIC STORM, SOLAR ECLIPSE