

**СБОИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ GPS, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ МОЩНЫМ
РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СОЛНЦА ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ
6 ДЕКАБРЯ 2006 Г.**

**GPS PERFORMANCE QUALITY PRODUCED BY A SOLAR RADIO BURST
DURING STRONG SOLAR FLARE ON DECEMBER 6, 2006**

Э.Л. Афраймович, Г.Я. Смольков, Н.С. Гаврилюк.

Институт солнечно-земной физики СО РАН

We investigate the GPS performance quality on December 6, 2006, during a solar flare X6.5 over North and South America, produced by a solar radio burst with unprecedented density of radioemission flux. According the data from the Owens Valley Solar Array (OVSA) during the time interval 19:30 – 19:40 UT the level of solar radio noise in L range exceed 10^5 s.f.u. (background noise is 10^2 s.f.u.) The solar radio burst caused radio interference across the sunlit hemisphere of the earth, including wideband noise at the GPS L1 and L2 frequencies. The software complex GLOBDET developed at the ISTP allows us to estimate the relative density $P(t)$ of failures during measurements of the phase difference L1-L2. For the given i receiving GPS station and each observed j satellite, the dependence $P_{ij}(t)$ is determined as a ratio of the number of the phase failures to the total number of observations. We prove that the high relative density $P(t)$ of phase slips is caused by the influence of additive interferences caused by wideband solar radio noise emission.

1. Введение

5 и 6 декабря 2006 года после длительного (порядка 15 месяцев) интервала низкого уровня солнечной активности (характерного для эпохи минимума солнечного цикла) в активной области NOAA 10930, появившейся на восточном лимбе солнечного диска 4 декабря, имела место беспрецедентная по числу и мощности серия вспышек. Только 6 декабря 2006 г. с 01:30 до 23:45 UT было зарегистрировано около 70 различных событий, в т.ч. 38 рентгеновских вспышек: 18 балла **C**, 4 балла **M**, 15 балла **B** и 1 балла **X**. В интервале с 18:29 до 19:00 UT произошла вспышка класса X6.5, необыкновенно заинтриговавшая не только астрономов и радиоастрономов, но и гораздо более широкий круг ученых и инженеров.

В 18:42 UT зарегистрировано начало радиовсплеска II типа – индикатора ударной волны. Около 19:30 UT начался мощный выброс корональной массы, сопровождаемый мощным радиоизлучением в диапазоне 1-10 и более МГц, который был зарегистрирован на космической станции WIND WAVES (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/daily_movies/2006/12/06/c2eit_waves4laptop.html). С 18:44 UT зарегистрирован протяженный радиовсплеск IV типа, сопровождавший вспышку балла более M5. В рентгеновском и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах эта вспышка была далеко не самой мощной, однако последовавшее за вспышкой широкополосное солнечное радиоизлучение превысило по мощности радиовсплески всех известных до сих пор вспышек как минимум на 2-3 порядка. Это привело к фатальным сбоям в работе широкополосных спутниковых радиосистем, в том числе навигационной системы GPS. На отдельных приемных станциях GPS были отмечены сбои функционирования [6], а на специализированных приемниках-мониторах ионосферных мерцаний в L диапазоне зарегистрированы глубокие замирания сигнала, обусловленные интерференцией сигнала и широкополосного радиоизлучения Солнца [6].

Целью настоящей работы является анализ отклика полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере и фазовых сбоев по данным глобальной сети наземных приемников GPS.

2. Общие сведения об эксперименте

В качестве индекса солнечной активности мы использовали данные о потоке УФ излучения Солнца $U(t)$ в диапазоне 0.1–50 нм, измеренные на космической станции SEM/SOHO [http://www.usc.edu/dept/space_science/semdatafolder/] и усредненные по всему солнечному диску. Данные о рентгеновском излучении представлены на сайте <http://www.sel.noaa.gov/ftpmenu/lists/xray.html>.

На Рис.1а показаны зависимости изменения потока УФ излучения, а на Рис. 1б – потока рентгеновского излучения в диапазонах 0.1-0.8 нм (толстая кривая) и 0.05- 0.4 нм (тонкая кривая). Форма и совпадение по времени этих зависимостей являются типичными для солнечной вспышки класса X.

С большим запаздыванием (около 40 мин) вслед за вспышкой X6,5 последовала мощная вспышка в радиодиапазоне. Согласно данным радиоспектрографа Owens Valley Solar Array (OVSA), приведенным в [6], в интервале времени 19:30 –19:40 UT уровень радишума в диапазоне GPS превзошел 10^5 s.f.u., в отдельные моменты до 10^6 s.f.u., при фоновом значении не более 100 s.f.u. (Рис.3в).

Для анализа отклика ПЭС и фазовых сбоев были использованы доступные по сети Интернет 30-с данные глобальной сети приемных станций GPS (всего около 750 станций) в формате RINEX. Координаты станций можно получить по электронному адресу <http://lox.ucsd.edu/cgi-bin/al-ICoords.cgi?>.

3. Отклик полного электронного содержания на солнечную вспышку в УФ диапазоне

Для анализа отклика ионосферы на данную вспышку мы использовали разработанный в [1, 3, 4] метод детектирования ионосферных эффектов солнечных вспышек по данным международной сети двухчастотных многоканальных приемников навигационной системы GPS, который позволяет существенно улучшить чувствительность и пространственно-временное разрешение наблюдений по сравнению с известными радиофизическими методами. Метод основан на эффекте одновременного изменения ПЭС (во время вспышки) во всей освещенной Солнцем ионосфере Земли. Для выявления отклика ионосферы на солнечные вспышки применялся предложенный в [3] принцип когерентного суммирования временных производных приращений ПЭС $dI/dt(t)$, измеренных одновременно для всей совокупности n лучей «приемник-ИСЗ», на всех выбранных для анализа станциях глобальной сети GPS. Вследствие статистической независимости фоновых флуктуаций на разнесенных лучах, отношение средней интегральной амплитуды отклика к амплитуде фоновых флуктуаций увеличивалось за счет когерентной обработки, как \sqrt{n} , где n – количество независимых разнесенных лучей.

На Рис.1в черной кривой представлен интегральный отклик ПЭС $\langle dI/dt(t) \rangle$ на резкое увеличение потока УФ излучения. Эта зависимость получена по данным глобальной сети GPS на освещенной стороне Земли (200-300 E; -80+80 N) в результате суммирования $n=1106$ приращений $dI/dt(t)$. Ясно выраженный отклик совпадает по времени с моментом резкого возрастания потока УФ и рентгеновского излучения (вертикальный пунктир). Как и ожидалось, на ночной стороне Земли (0-120 E; -80+80 N; $n=297$ лучей) ПЭС не реагирует на вспышку (Рис.1в, толстая серая кривая). Полученные оценки согласуются с результатами, полученными ранее [1, 3, 4].

4. Статистика фазовых сбоев GPS во время вспышки 6 декабря 2006 г.

Ряды ПЭС, определенные по разности фаз L1-L2 на двух частотах GPS по известной методике [2, 5], необходимы нам для подтверждения факта сбоя разности фаз L1-L2. Результатом первичной обработки RINEX-файлов является количество сбоев фазы в выбранный единичный интервал времени $dT=5$ мин, а также соответствующее количество наблюдений, необходимое для нормировки данных. Эти данные для каждого ИСЗ GPS затем усреднялись по всем выбранным станциям, что поз-

волило вычислить среднюю плотность наблюдений $M(t)$ и среднюю плотность сбоев $S(t)$ для всех n лучей. В середине наблюдаемого пролета ИСЗ плотность наблюдений $M(t)$ в среднем равна 10 ± 1 (30-с отсчетов); в начале и в конце пролета она может уменьшаться из-за того, что интервалы времени наблюдения данного ИСЗ под углами места больше заданного на различных станциях не совпадают. Далее мы вычисляли среднюю относительную плотность сбоев $P(t) = S(t)/M(t), \%$ и определяли максимальное значение $P_{max}, \%$.

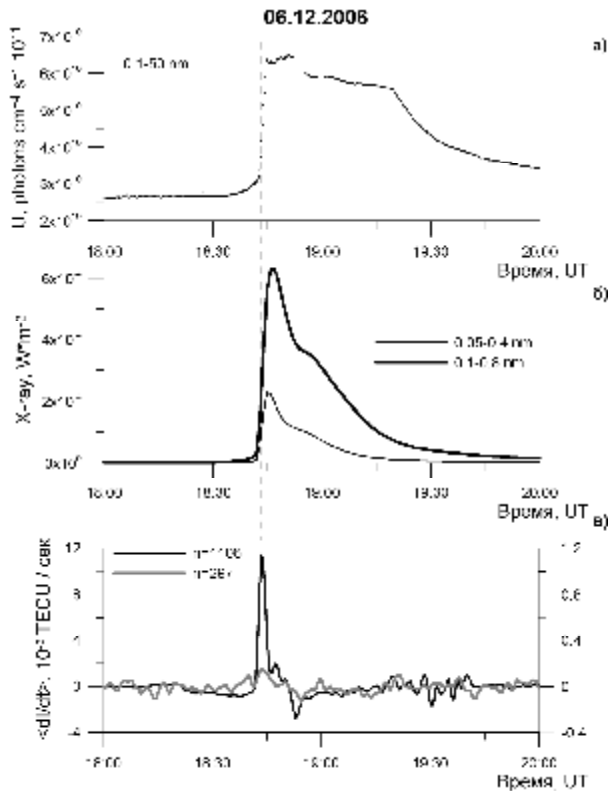


Рис.1. Солнечная вспышка X6.5 6 декабря 2006 г. а) – УФ диапазон; б) – рентгеновский диапазон; в) – производная изменения ПЭС на освещенной и темной сторонах Земли (черная и серая кривые соответственно).

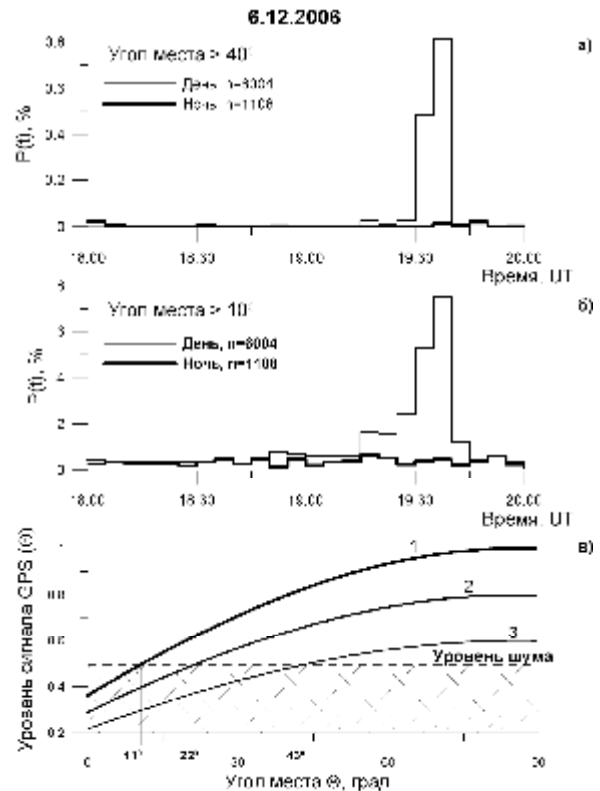


Рис.2. Относительная плотность фазовых сбоев $P(t)$ для углов места $> 10^\circ$ (б) и $> 40^\circ$ (а) на освещенной и темной сторонах Земли (тонкая и толстая кривые соответственно). Соотношение сигнал/шум для различных углов места и мощности передатчика ИСЗ GPS – в).

На рис.2б представлены зависимости $P(t)$ во время вспышки 6 декабря 2006 г. для дневной стороны Земли, полученные для $n=6004$ лучей, для всех наблюдаемых в данном интервале времени ИСЗ при ограничении угла места $> 10^\circ$. Значительное превышение фонового уровня $P(t) \sim 0.2-0.3\%$, характерного для слабовозмущенной ионосферы [2, 4] (планетарный индекс геомагнитной активности $K_p \sim 4$), наблюдается в интервале времени, соответствующем резкому увеличению потока радиоизлучения Солнца в диапазоне частот GPS (Рис.3в). Максимальное значение средней относительной плотности сбоев $P_{max}=7.5\%$ в 20-30 раз превышает фоновое значение $P(t)$. В то же время средняя плотность сбоев на ночной стороне Земли ($n=1108$) не превысила фонового значения.

Еще более серьезные свидетельства ухудшения качества функционирования GPS получены при оценке средней относительной плотности сбоев для отдельных ИСЗ GPS. На Рис.3а и 3б зависимости $P(t)$ даны для всех наблюдаемых ИСЗ с номерами PRN в интервале времени 19:00-20:00 UT. Как можно убедиться, максимальные значения P_{max} могут достигать 40% (PRN24 и PRN28), в то время как для других ИСЗ (PRN04 и PRN17)

значения $P_{\max} = 9.0\%$ и $P_{\max} = 5.9\%$ лишь ненамного превышают величину $P_{\max} = 7.5\%$, полученную для всех ИСЗ. Это различие качественно свидетельствует о том, что эффективная мощность передатчиков отдельных ИСЗ GPS отличалась более, чем в 2-5 раз. К сожалению, временное разрешение представления зависимости $P(t)$, $dT=5$ мин, оказалось недостаточным, чтобы отобразить тонкую временную структуры потока радиоизлучения (Рис.3в), полученного с разрешением не хуже 1 с. Тем не менее, можно отметить совпадение формы всплеска фазовых сбоев с огибающей потока радиоизлучения.

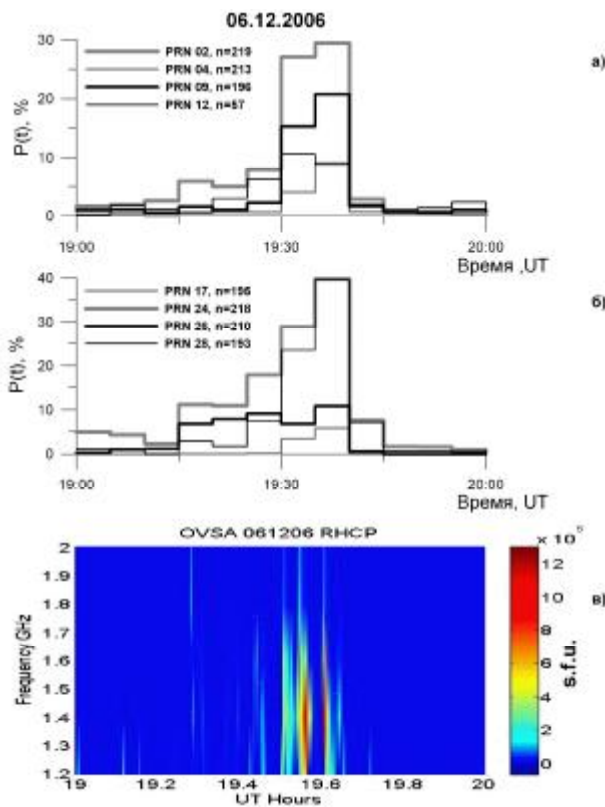


Рис.3. Относительная плотность фазовых сбоев для различных спутников GPS во время вспышки 6 декабря 2006 г. – а), б). Спектр радиоизлучения в диапазоне 1.2-2.0 ГГц, зарегистрированный на солнечном спектрографе OVSA – в).

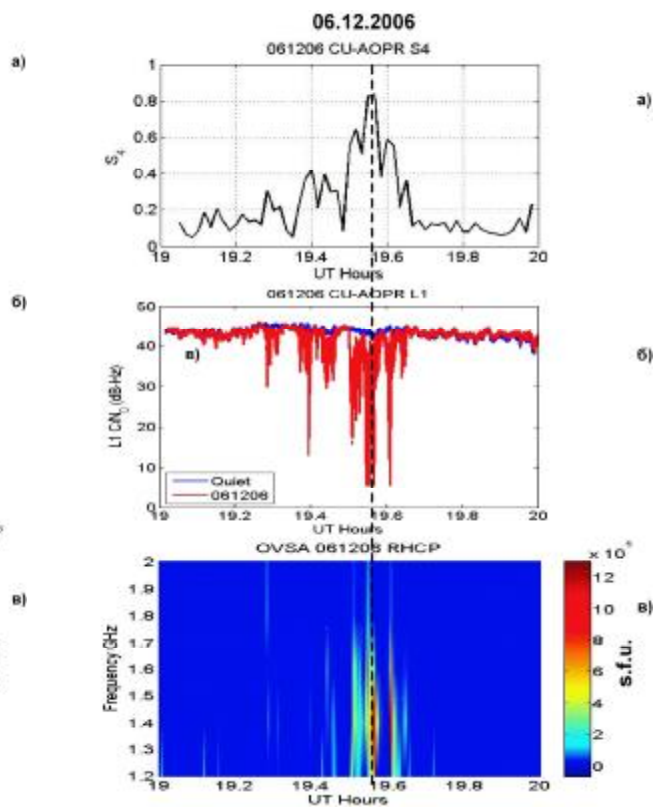


Рис.4. Отношение сигнал/шум на основной частоте GPS L1 и индекс мерцаний S4 по данным специализированного приемника GPS, предназначенного для мониторинга мерцаний сигналов GPS (из статьи Cerruti et al., 2006 [6]).

Аналогичное соотношение для средней плотности фазовых сбоев GPS на дневной и ночной стороне получено и при ограничении угла места $> 40^\circ$. Однако для высоких углов места луча на ИСЗ вероятность сбоев оказалась на порядок ниже, чем для низких углов (Рис.2а). Все статистические результаты нашего исследования представлены в Таблице.

Таблица. Максимальные значения плотности фазовых сбоев для различных ИСЗ.

№	Дневная сторона	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ночная сторона	10
PRN		02	04	09	12	17	24	26	28	Все PRN		Все PRN
N_{los}	200-300 E; -80 +80 N	219	213	196	57	195	218	210	193	6004	0-200 E; -80 +80 N	1108
$P_{\max}, \%$		29,5	9,0	20,0	10,6	5,9	39,8	10,8	39,4	7,5		0,9

На Рис.2в дана качественная иллюстрация механизма фазовых сбоев в системе GPS во время вспышки. Символами 1, 2, 3 обозначены зависимости уровня сигнала GPS от угла места луча на ИСЗ с передатчиками различной эффективной мощности. Монотонное уменьшение уровня сигнала связано с увеличением расстояния между ИСЗ и приемником. В обычных условиях в результате корреляционной обработки широкополосного сигнала в приемнике уровень аддитивного шума на ~40 дБ ниже уровня сигнала, так что на графике его невозможно различить. Во время мощного всплеска радиоизлучения Солнца уровень шума (отмечен на Рис.2в горизонтальным пунктиром) при низких углах места оказался сравним с уровнем сигнала (Рис.4б), что привело к срыву сопровождения фазы (фазовому сбою) сигнала GPS. Естественно, что для ИСЗ с наиболее высокой эффективной мощностью сигнала (кривая 1) это условие выполнилось при достаточно низких углах места (11°), для менее мощного сигнала 2 при 22°. Для наиболее слабого сигнала 3 сбои начались для высоких углов места 43°, в результате навигация по этому ИСЗ во время вспышки оказалась практически невозможной.

Наши результаты и выводы хорошо согласуются с калиброванными данными измерений амплитуды с помощью нескольких приемников GPS, предназначенных для определения характеристик мерцаний сигналов GPS [6], обусловленных рассеянием на ионосферных неоднородностях [8]. Заимствованные из [6] данные, полученные для одной из станций, расположенной в освещенной зоне, представлены на Рис.4. Высокое временное разрешение измерений (частота 50 Гц) позволило установить, что моменты резкого уменьшения отношения сигнал/шум $L1 C/N$ на основной частоте GPS L1 (вплоть до фатальной величины - 30 дБ), Рис.4б, с высокой степенью точностью синхронны с импульсами мощного радиоизлучения (Рис.4в, вертикальный пунктир). Для сравнения на Рис.4б дана зависимость C/N для этого же ИСЗ, но за предыдущий день. В этом случае отношение C/N за весь интервал наблюдения практически не отличается от уровня 40 дБ·Гц, соответствующего стандарту GPS.

В момент вспышки отмечалось увеличение индекса мерцаний S4 [8] до очень высокого значения порядка 1.0 (Рис.4а). Однако эти данные вовсе не относятся к самому эффекту мерцаний сигналов GPS, значение S4 для которых обычно не превышает 0.1-0.2 [7]. В полосу приемника попал широкополосный шум солнечного радиоизлучения большой мощности, который значительно превысил уровень сигнала.

5. Заключение

В докладе сообщается о существенном ухудшении качества функционирования GPS над территорией Северной и Южной Америки во время солнечной вспышки 6 декабря 2006 г., сопровождающейся беспрецедентно высоким уровнем потока солнечного радиоизлучения. Согласно данным радиогелиографа Owens Valley Solar Array (OVSA) в интервале времени 19:30 –19:40 UT уровень шума в диапазоне GPS превзошел 10^5 s.f.u. при фоновом значении не более 100 s.f.u.

Программный комплекс ГЛЮБДЕТ, разработанный в ИСЗФ, позволил оценить интегральный отклик полного электронного содержания на вспышку в УФ диапазоне (типичный для вспышек данного класса) и среднее по всей подсолнечной территории значение плотности фазовых сбоев в системе GPS. Мы показали, что неожиданно высокий уровень плотности сбоев (для отдельных ИСЗ до 40 %) вызван аддитивной интерференцией сигнала GPS и широкополосным радиоизлучением Солнца.

Полученная в нашей работе статистика фазовых сбоев для всей освещенной стороны Земли дает более надежное подтверждение эффекта подавления работы приемников GPS во время вспышки 6 декабря 2006 г., чем данные [6], полученные на нескольких станциях GPS.

Благодарности

Работа поддержана Сибирским отделением РАН; Программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 30 «Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля»; Министерством образования и науки РФ (НШ 00-15-96710/НШ-477.2003.2//РИ-112/001/0-45); РФФИ (05-07-90209).

Авторы выражают глубокую благодарность доктору Д. Гэри за предоставление копии радиоспектрограммы, полученной 6 декабря 2006 г. во время вспышки X 6.5 в обсерватории Owens Valley Solar Array Технологического университета штата Нью-Джерси.

Список литературы

1. Афраймович Э.Л., Алтынцев А.Т., Косогоров Е.А., Ларина Н.С., Леонович Л.А. Детектирование ионосферного отклика солнечных вспышек по данным глобальной сети GPS // Геомагнетизм и аэрон. 2001. Т. 41. N 2. С. 208-214.
2. Афраймович Э.Л., Лесюта О.С., Ушаков И.И. Геомагнитные возмущения и функционирование навигационной системы GPS // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42. N 2. С. 220-227.
3. Afraimovich E.L. GPS global detection of the ionospheric response to solar flares // Radio Sci. 2000. V. 35. P. 1417-1424.
4. Afraimovich E.L., Altyntsev A.T., Kosogorov E.A., Larina N.S. and Leonovich L.A. Ionospheric effects of the solar flares of September 23, 1998 and July 29, 1999 as deduced from global GPS network data // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2001. V. 63. N 17. P. 1841-1849.
5. Afraimovich, E.L., Lesyuta O.S., Ushakov I.I. and Voeykov S.V. Geomagnetic storms and the occurrence of phase slips in the reception of GPS signals // Annals of Geophys. 2002. V. 45. N 1. P. 55-71.
6. A.P. Cerruti, P.M. Kintner, D.E. Gary, L.J. Lanzerotti, E.R. de Paula, H.B. Vo, Observed Solar Radio Burst Effects on GPS/WAAS Carrier-to-Noise Ration // Space Weather. V.4, S10006, doi:10.1029/2006SW000254, 2006, <http://gps.ece.cornell.edu/>.
7. Kintner P.M., H. Kil, and E. de Paula. Fading time scales associated with GPS signals and potential consequences // Radio Science. 2001. V. 36. №4. P. 731-743.
8. Yeh K. C, and Liu C. H. Radio wave scintillations in the ionosphere // Proceedings of the IEEE. 1982. V. 70, No. 4. P. 324-360.