

УДК 523.62, 530.27, 550.388.2

Нарушение функционирования спутниковых информационных систем широкополосным радиоизлучением Солнца во время вспышек

Э.Л. Афраймович, Г.Я. Смольков, А.Б. Ишин

Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Российская Федерация, Иркутск
smolkov@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 29 января 2010 г.

Аннотация. Кратко изложены результаты изучения нарушения нормального функционирования глобальной системы позиционирования (Global Positioning System – GPS) и глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС), обусловленные широкополосным радиоизлучением Солнца во время мощных вспышек, происшедших 28.10.2003 г., 06 и 13.12.2006 г.

BROADBAND RADIO EMISSION OF SOLAR FLARES FAILURE THE FUNCTIONING OF SATELLITE INFORMATIVE SYSTEMS, *by E.L. Afraimovich, G.Ya. Smolkov, and A.B. Ishin.* The results of the study of normal functioning of The Global Positioning System (GPS) and The Global Navigation Satellite System (GLONASS) failures, caused by a solar broadband radio emission in time of power flares, occurred on October 28, 2003 and on December 6 and 13, 2006, is briefly stated.

Ключевые слова: солнечные вспышки, всплески широкополосного радиоизлучения, сбой GPS и ГЛОНАСС

Всплески радиоизлучения Солнца были обнаружены в годы Второй мировой войны по их воздействию на английские РЛС как сильной шумовой радиопомехи (Краус, 1973). До недавнего времени они рассматривались как носители информации о процессах, происходящих в солнечной атмосфере и гелиосфере; изучались как события, позволяющие осуществлять диагностику физических условий, механизмов генерации радиоизлучения и ударных волн, ускорения потоков частиц, исходной стадии выбросов корональных масс. Известно об искажающей роли радиовсплесков при смещении эффективного центра тяжести радиоизлучения Солнца относительно его видимого диска в устаревшем методе радионавигации. Неожиданное нарушение нормального функционирования GPS во время вспышки класса X6.5 6.12.2006 г. необыкновенно заинтриговало не только астрономов и радиоастрономов, но гораздо более широкий круг ученых и инженеров. В рентгеновском (X) и крайнем ультрафиолетовом (EUV) диапазонах эта вспышка была далеко не самой мощной, однако последовавшее за вспышкой широкополосное солнечное радиоизлучение превысило по интенсивности радиовсплески всех известных до сих пор вспышек как минимум на два порядка. Это привело к сбоям в работе широкополосных спутниковых радиосистем, в том числе навигационной системы GPS (выпуск новостей NOAA 4 апреля 2007 г.: GPS значительно подвержена воздействию мощных солнечных радиовсплесков). Ниже, избегая детального описания и анализа вспышечных событий,

кратко показаны пространственно-временные масштабы и механизм сбоев GPS и ГЛОНАСС, обусловленные вспышками, происшедшими 28.10.2003 г., 06 и 13.12.2006 г.

После длительного интервала низкого уровня солнечной активности 5 и 6.12.2006 г. в активной области (АО) NOAA 10930, появившейся на восточном лимбе солнечного диска 4 декабря, имела место беспрецедентная по числу и мощности серия вспышек. 6.12.2006 г. с 18.29 до 19.00 UT произошла вспышка балла X6.5 (<http://www.sel.noaa.gov/ftpmenu/lists/xray.html>). Спустя около 40 мин вслед за вспышкой X6.5 последовал мощный радиовсплеск. Согласно данным радиоспектрографа Owens Valley Solar Array в интервале 19.30–19.40 UT уровень радишума в частотном диапазоне GPS (1.2–1.6 ГГц) превзошел 10^5 s. f. u.; в отдельные моменты уровень достигал 10^6 s. f. u. при фоновом значении не более 100 s. f. u. 13.12.2006 г. с 02.14 до 02.57 UT произошла вспышка балла X3.4/4B, сопровождавшаяся радиовсплеском IV типа с 02.25, всплеском II типа с 02.26 UT, интенсивным радиоизлучением на длине волны 10 см с 02.22 до 03.46 UT (длительность 84 мин, максимум 44000 s. f. u.) (<http://www.sel.noaa.gov/ftpmenu/lists/xray.html>). Уровень радишума на частоте 1415 МГц превосходил 10^5 s. f. u. (радиоспектрограф RSTN/Learmonth; <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsolarradio.html>). Следует отметить, что никогда до события 6.12.2006 г. столь высокая плотность потока солнечного радиоизлучения не отмечалась даже во время более мощных солнечных вспышек, например, сильнейшей вспышки балла X17.2/4B, зарегистрированной с 09.51 UT 28.10.2003 г. в АО 10486 (<http://www.sel.noaa.gov/ftpmenu/lists/xray.html>). Эта вспышка в радиодиапазоне отличалась от вспышек декабря 2006 г. практически одновременным началом с более сильными вспышками в EUV- и X-диапазонах, после небольшого спада она продолжалась еще в течение длительного времени (порядка получаса). С 11.00 до 11.15 UT уровень радишума в диапазоне GPS превзошел 6×10^3 s. f. u. (радиоспектрограф TRST; <http://radiosun.ts.astro.it/eng/load.php?la=2&pg=1>). Это на два порядка выше фоновых значений, но в 100 раз ниже, чем во время вспышки 6.12.2006 г.

Для количественной оценки степени воздействия солнечного радиоизлучения на функционирование приемников GPS нами использовались различные критерии (Афраимович и др., 2007, 2008). Фиксировались сбой разности фаз L1–L2 двухчастотного режима системы сопровождения на двух частотах GPS f_1 и f_2 . Для этой цели регистрировались ряды разности фаз $\Delta L(t) = L_1 - L_2$ длительностью около 4–5 часов. Результатом первичной обработки RINEX-файлов является количество сбоев разности фаз в выбранный единичный интервал времени $dT = 5$ мин, а также соответствующее количество наблюдений, необходимое для нормировки данных. Эти данные для каждого навигационного спутника (НС) GPS затем усреднялись по всем выбранным наземным станциям, что позволило вычислить среднюю плотность наблюдений $R(t)$ и среднюю плотность сбоев $S(t)$ для всех n -рядов. В середине наблюдаемого пролета НС плотность наблюдений $R(t)$ 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 НС под углами места больше заданного на различных станциях не совпадают. Далее вычислялась средняя относительная плотность сбоев $P(t) = S(t)/R(t)$, % и определялось максимальное значение P_{max} , %. Если очередная эпоха (30-с отчет) в RINEX-файле была пропущена, число сбоев приравнивалось к числу ожидаемых наблюдений, так что относительная плотность сбоев становилась равной 100 %.

Сбой L1–L2 означает невозможность высокоточного позиционирования в двухчастотном режиме; при этом остается возможность определения координат с худшей точностью в одночастотном режиме (L1). Однако позиционирование вообще невозможно, если не регистрируется сигнал ни на одной из частот GPS. Для оценки вероятности таких сбоев для всех рядов, содержащих сбой L1–L2, мы определяли для каждого НС относительное число пропущенных отсчетов $N(t)$ -измерений за данный 30-с интервал времени по отношению к общему числу $M(t)$ -отсчетов, которые соответствуют заданному интервалу: $W(t) = N(t)/M(t)$, %, а также соответствующее максимальное значение W_{max} %. Временное разрешение зависимости $W(t)$ равно 30 с, что позволило провести детальное сравнение с временной зависимостью потока солнечного радиоизлучения (например, на рис. 1 и рис. 2). При этом выявлено различие эффективной мощности передатчиков отдельных НС более, чем в 2–5 раз, отмечено совпадение формы всплеска фазовых сбоев с огибающей потока радиоизлучения, его зависимость от угла места луча на НС. Оценки P_{max} , полученные при большом усреднении (~ 400 станций), означают, что 6.12.2006 г. в течение почти 10 мин большая часть при-

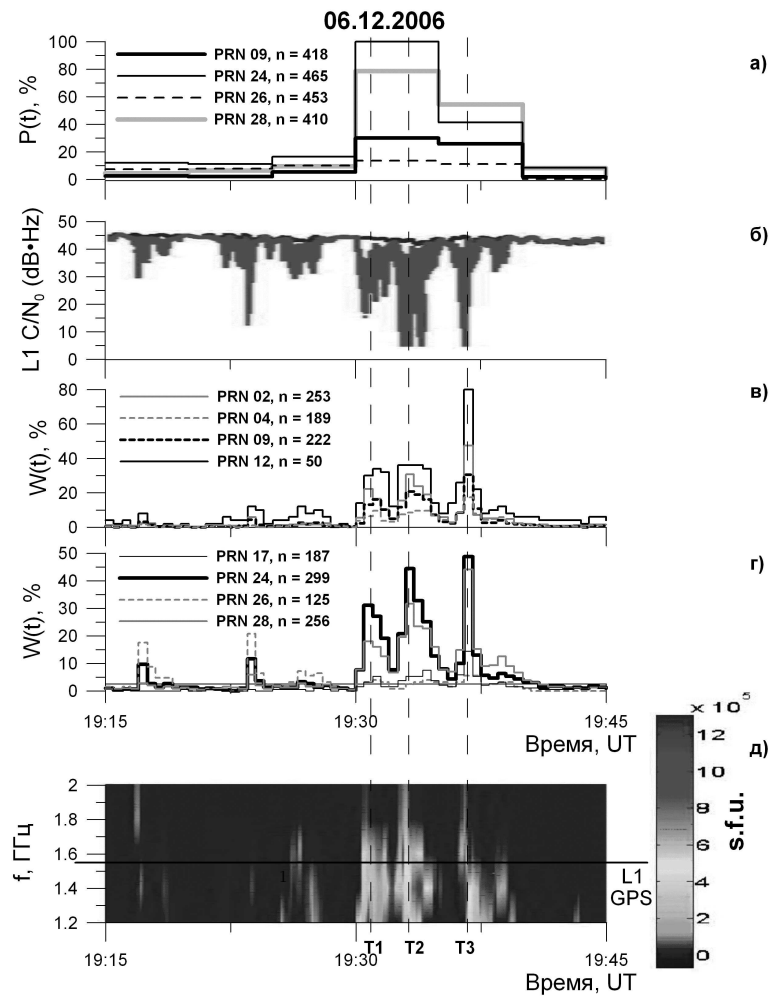


Рис. 1. Фазовые сбои и пропуски отсчетов для различных НС GPS во время вспышки 6.12.2006 г.: д) спектр радиоизлучения в диапазоне 1.2–2.0 ГГц, зарегистрированный на солнечном спектрографе OVSA; б) отношение сигнал/шум на основной частоте GPS L1 по данным специализированного приемника GPS, предназначенного для регистрации мерцаний сигналов GPS (Черрути и др., 2006)

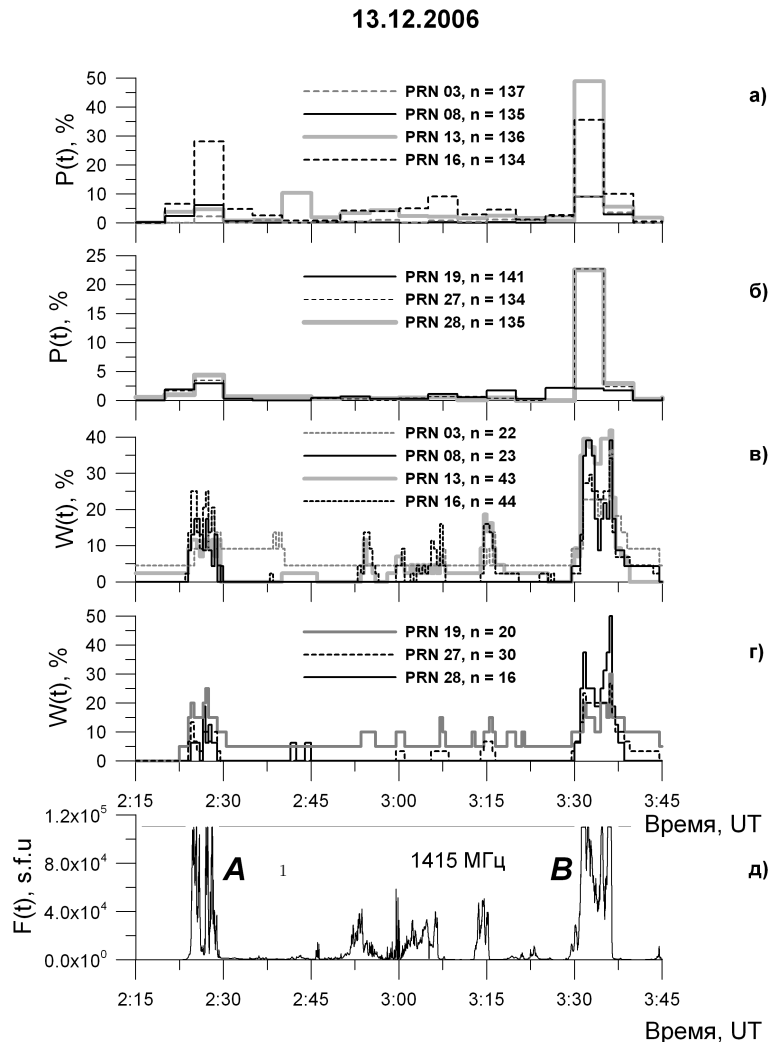


Рис. 2. Фазовые сбои для различных НС GPS во время вспышки 28.10.2003 г. – а), б), в); для всех спутников на освещенной и темной сторонах Земли (имели место сбои и на ночной стороне вследствие явления Кроше) – г); поток солнечного радиоизлучения на частоте 1420 МГц, зарегистрированный на спектрографе TRST (А и Б – интервалы излучения всплеска с правой круговой поляризацией) – д)

емных станций в освещенной зоне не могла обеспечить высокоточные навигационные определения, для которых необходимы непрерывные данные запаздывания сигналов GPS одновременно на обеих рабочих частотах f_1 и f_2 . Позиционирование вообще невозможно, если сигнал не регистрируется ни на одной из частот GPS. Аналогичное совпадение фазовых сбоев, а также пропусков отсчетов сигнала различных НС с поведением потока радиоизлучения, имело место во время вспышек 13.12.2006 г. и 28.10.2003 г. Вероятность сбоев убывает и возрастает синхронно с изменениями потока правополяризованного радиоизлучения вспышек.

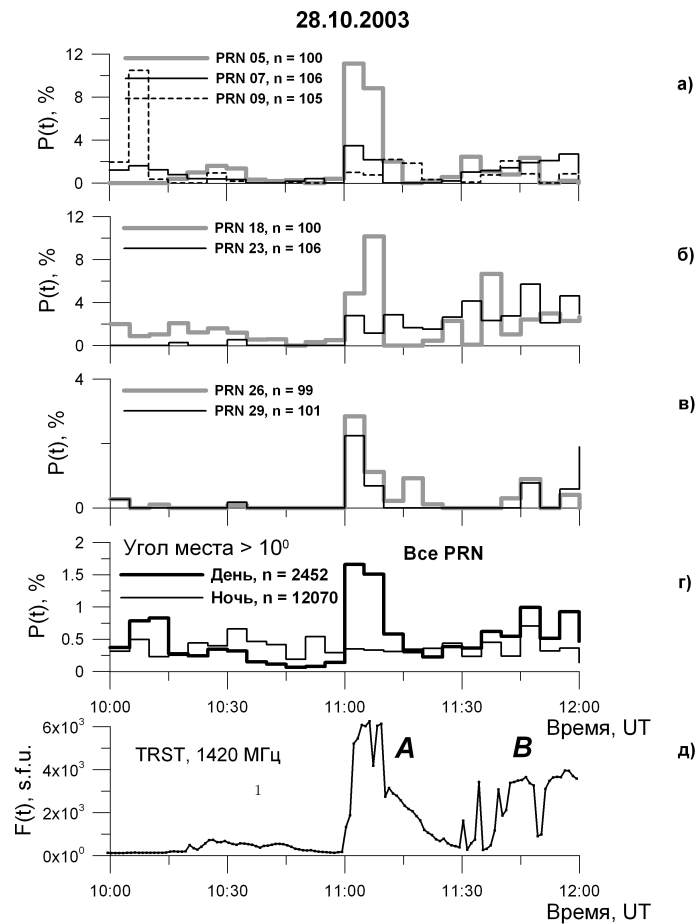


Рис. 3. Относительная плотность $Q(t)$ сбоев измерений параметров навигационных сигналов L1, C1, L2, P1, P2 НС GPS (серые кривые) и НС ГЛОНАСС (черные кривые), зарегистрированных комбинированными приемниками GPS-ГЛОНАСС 6 и 13 декабря 2006 г. Максимальная плотность сбоев Q_{\max} при приеме сигналов ГЛОНАСС в 2–3 раза ниже, чем для GPS. Символами А (6.12) и А и В (13.12) отмечены интервалы времени, когда плотность потока правополяризованного радиоизлучения превысила 106 s. f. u. (6.12) и 105 s. f. u. (13.12)

Основные принципы работы ГЛОНАСС и GPS идентичны с точки зрения оценки мощности сигнала и помехоустойчивости их приемников. Обработка данных приемников смешанного типа заключалась в подсчете суммарного числа сбоев измерения параметров обеих систем в каждую текущую эпоху наблюдений по всем GPS-станциям, на которых выполнялись измерения в комбинированном режиме 44 станций GPS+ГЛОНАСС. Сбоями считались события с отсутствием (либо

равенством нулю) текущего значения данного параметра в эпохе, либо в полном отсутствии одной или нескольких текущих эпох измерений в RINEX-файле. В последнем случае считалось, что имеет место одновременный сбой измерения всех параметров по всем НС GPS (или ГЛОНАСС), которые должны были наблюдаться в этот момент времени. Затем аналогично вычислялась средняя относительная плотность сбоев $Q(t)$ и определялось ее максимальное значение Q_{max} . К сожалению, при малой статистике только 4 станции 6.12.2008 г. и 7 станций 13.12.2008 г., оснащенные комбинированными приемниками, оказались в освещенной зоне. Установлено, что менее всего сбоям подвержены измерения параметров на основной частоте GPS-ГЛОНАСС (рис. 3). Менее всего сбоям подвержены измерения параметров L1, C1 на основной частоте GPS-ГЛОНАСС с повышенной мощностью передатчиков. 6.12 сбоя L1, C1 вообще не зафиксированы, а 13.12 отмечены только совпадающие кратковременные сбои GPS-ГЛОНАСС в 03:34 УТ. Важно, что максимальная плотность сбоев Q_{max} при регистрации всех параметров сигналов ГЛОНАСС (кроме L1, C1) в 2–4 раза ниже, чем для GPS. Возможно, такое преимущество обусловлено большей мощностью передатчиков НС и большей помехоустойчивостью алгоритмов обработки сигналов ГЛОНАСС. Широкополосное радиоизлучение Солнца во время вспышки 6.12.2006 на 2–3 порядка превысило фоновый уровень помех, учтенный при конструировании GPS. Более подробный анализ сбоев, роли полного электронного содержания электронов в ионосфере, мерцаний сигналов на ионосферных неоднородностях, зависимости измерений от угла места и сопоставление с подходами и результатами других авторов приведены в статье (Афраимович и др., 2008).

Таким образом, получено статистически значимое свидетельство временной парализации GPS (что в свою очередь приводит к потерям при использовании многих современных технологий на всей освещенной стороне Земли) во время мощного широкополосного солнечного радиоизлучения 6 и 13.12.2006 г. и 28.10.2003 г. Высокоточный режим позиционирования был нарушен на подсолнечной стороне для 10–20 % приемных станций GPS. При этом для 20–80 % из числа этих станций отмечен срыв сопровождения сигналов GPS на обеих частотах, при котором позиционирование вообще невозможно. Аналогичные нарушения функционирования, но в меньшей степени, зафиксированы для ГЛОНАСС. Установлено заметное отличие уровня сбоев для различных НС и типов приемников. Определен порог интенсивности потока солнечного радиоизлучения 103 s. f. u., при котором фиксируются единичные сбои и пропуски отчетов при измерениях параметров сигналов GPS. Значение этого порога на порядок ниже, чем было установлено ранее. Мы предлагаем использовать для оценки уровня радиопомех солнечного происхождения в диапазоне частот GPS-ГЛОНАСС-GALILEO непрерывные калиброванные данные измерений интегрального потока солнечного радиоизлучения, выполняемые международной сетью солнечных радиоспектрографов. С другой стороны, поскольку спектр солнечного радиоизлучения заведомо перекрывает диапазон частот современных широкополосных спутниковых радиотехнических систем навигации, связи и локации, мощные солнечные радиовсплески можно рассматривать как глобальный тест помехоустойчивости этих систем. Полученные результаты дают серьезный повод для пересмотра роли факторов космической погоды в работе современных спутниковых систем и более тщательного учета этих факторов при разработке и эксплуатации. Радиовсплески такого излучения теперь следует относить к “геоэффективным” проявлениям солнечной активности или факторам космической погоды.

Работы поддержаны Сибирским отделением РАН; Программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 30 “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце – Земля”; Минобрнауки РФ (уникальные установки: № 01–27 – ССРТ).

Литература

- Афраимович и др. (Afraimovich E.L., Zherebtsov G.A. and Smol'kov G.Ya.) // Doklady Earth Sciences. ISSN 1028-334X. Pleiades Publishing, Ltd. 2007. V. 417. №. 8. P. 1231.
- Афраимович Э.Л., Гаврилюк Н.С., Демьянов В.В., Смольков Г.Я., Ишин А.Б. // Космические исследования. 2008. Т. 46. №. 6. С. 1–13.
- Афраимович и др. (Afraimovich E.L., Demyanov V.V., Gary D.E., Ishin A.B. and

- Smolkov G.Ya.) // 12th Ionospheric Effects Symposium. Alexandria. VA. 2008. (in press).
<http://solar.njit.edu/preprints/afraimovich1361.pdf>.
- Краус Д.Д. // Радиоастрономия. М.: Советское радио. 1973. С. 312.
- Черрути и др. (Cerruti A.P., Kintner P.M., Gary D.E., et al.) // Space Weather. 2006. V. 4. S10006.
doi:10.1029/2006SW000254.