

УДК 550.388.2

## ОСОБЕННОСТИ СБОЕВ СИГНАЛА GPS В СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ

<sup>1,2</sup>Ю.В. Ясюкевич, <sup>2</sup>А.А. Докучаев, <sup>1</sup>Е.А. Косогоров

### TYPICAL FEATURES OF GPS PHASE SLIPS UNDER QUIET CONDITIONS

Yu.V. Yasyukevich, A.A. Dokuchaev, E.A. Kosogorov

В работе анализируются данные сбоев сопровождения фазы несущей вспомогательной частоты L2 системы GPS. Особое внимание уделяется угловым (относительно магнитного поля) характеристикам сбоев. Анализ показал, что в спокойных условиях увеличение числа сбоев наблюдается для лучей приемник–спутник GPS, составляющих с локальным вектором магнитного поля на высоте ионосферы углы  $\gamma \sim 90^\circ$ . В регионе Японии имеет место увеличение числа сбоев в области углов  $\sim 15^\circ$ , в регионе Южной Америки –  $\sim 7^\circ$ . Общая за сутки плотность сбоев на частоте L1 и L2 для углов  $\gamma \sim 90^\circ$  в 2008 г. составляет  $\sim 1\text{--}1.4\%$  и  $\sim 2.5\text{--}3\%$  для региона Японии;  $\sim 3.5\text{--}4.7\%$  и  $\sim 6\text{--}9\%$  для Европы;  $\sim 1.8\text{--}2.5\%$  и  $\sim 4.5\text{--}6\%$  для Северной Америки;  $\sim 2\text{--}2.5\%$  и  $\sim 5\text{--}7\%$  для Южной Америки.

In the paper we analyzed data of GPS L2 phase slips during 2008. Special attention is devoted to the angular (with respect to the magnetic field) characteristics of the slips. It was found that under quiet conditions increasing of slip density corresponds to line-of-sights which are normal to the local magnetic field vector at the ionosphere altitudes ( $\gamma \sim 90^\circ$ ). In the Japan region there are slip density increasing at the angles between line-of-sight GPS receiver – GPS satellite and magnetic field vector  $\gamma \sim 15^\circ$ , and at  $\gamma \sim 7^\circ$  in the South America. Mean slip densities for L1 and L2 GPS at  $\gamma \sim 85\text{--}90^\circ$  are  $\sim 1\text{--}1.4\%$  and  $\sim 2.5\text{--}3\%$  for Japan,  $\sim 3.5\text{--}4.7\%$  and  $\sim 6\text{--}9\%$  for Europe,  $\sim 1.8\text{--}2.5\%$  and  $\sim 4.5\text{--}6\%$  for North America,  $\sim 2\text{--}2.5\%$  and  $\sim 5\text{--}7\%$  for South American.

#### Введение

В настоящее время глобальные навигационные системы все больше входят в различные области деятельности человека. Глобальная навигационная система GPS (Global positioning system), созданная и поддерживаемая США, получила наиболее широкое применение в настоящее время. Для высокоточной навигации в системе GPS осуществляется передача сигнала на двух частотах – L1=1575.42 МГц, L2=1227.60 МГц. Кроме того, новейшие спутники также осуществляют передачу на частоте L5=1176.45 МГц. Помимо GPS в настоящее время действует отечественная глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС, работающая на частотах близких частотам GPS. Ведется также разработка европейской системы «Galileo».

Для высокоточной навигации крайне важна устойчивость работы систем. Сильные мерцания амплитуды и фазы сигнала могут иметь место вследствие рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях размером порядка первой зоны Френеля (150–300 м для частот GPS) [Yeh, Liu, 1982] и приводить в отдельных случаях к потере сопровождения фазы сигнала. Было обнаружено, что сбои сигнала GPS имеют место не только на авроральных широтах, где предполагается наличие интенсивных неоднородностей. В связи с этим в последние годы появилось большое количество работ, посвященных сбоям сопровождения фазы сигнала GPS на средних широтах [Afraimovich et al., 2003; Ledvina et al., 2004; Meggs et al., 2006].

В работе [Afraimovich et al., 2011] были проанализированы сбои сопровождения фазы при прохождении крупномасштабного ионосферного пузыря (super bubbles) над территорией Японии 12 февраля 2000 г. Было выявлено, что существуют особенности срывов сопровождения фазы в зависимости от угла с магнитным полем. В работе [Afraimovich et al., 2011] был сделан вывод о том, что такие особенности обусловлены распространением радиоволн при наличии крупномасштабных ионосферных возмущений. В то же время не было проведено анализа

других событий.

Целью настоящей работы является исследование особенностей (относительно вектора магнитного поля) срывов сопровождения фазы сигнала системы GPS в спокойных геофизических условиях в различных регионах: Япония ( $20\text{--}50^\circ$  N;  $120\text{--}150^\circ$  S), Северная Америка ( $25\text{--}75^\circ$  N;  $-135\text{--}-40^\circ$  S), Южная Америка ( $-60\text{--}-15^\circ$  N;  $-90\text{--}-40^\circ$  S), Европа ( $30\text{--}75^\circ$  N;  $-15\text{--}75^\circ$  S). Для анализа нами был выбран 2008 г., приходящийся на минимум цикла солнечной активности. Для сравнения мы также рассмотрели отдельные дни 2000 г.

#### Методика расчета

Данные GPS представлены на сайте <http://garner.ucsd.edu/> в стандартном формате RINEX [Gurtner, 1994]. С использованием технологии, разработанной в ИСЗФ СО РАН [Афраймович, Перевалова, 2006], определялись угол места и азимут луча спутник–приемник, а также формировалось значение VALIDITY, характеризующее срывы измерений радионавигационных параметров. На следующем этапе для всего дня и всех пар приемник–спутник GPS для каждого отдельного измерения осуществлялся расчет координат ионосферной точки (точки пересечения луча приемник–спутник GPS и сферы на высоте 300 км). В ионосферной точке с использованием справочной модели магнитного поля IGRF-11 (<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>) производился расчет локального вектора магнитного поля и рассчитывался угол  $\gamma$  между лучом приемник–спутник GPS и вектором магнитного поля. Далее проводился анализ срывов измерения радионавигационных параметров в зависимости от угла  $\gamma$  для лучей, подыоносферные точки которых находились в соответствующих регионах. Плотность сбоев  $P$  рассчитывалась как

$$P = N / S,$$

где  $S$  – число измерений,  $N$  – число сбоев для соответствующего угла  $\gamma$ .

**Результаты эксперимента**

На рис. 1 представлена типичная угловая диаграмма фазовых сбоев на частоте L2 GPS в различных регионах земного шара 13 июля 2008 г. ( $K_p < 3.3$ ). Наименование региона дано на панели. Черной жирной кривой приведено полное число измерений, серой – число фазовых сбоев, черной тонкой – плотность сбоев. Следует отметить, что значительно различается статистика измерений: для Японии и Северной Америки использовалось более 1000 станций, для Южной Америки и Европы – несколько десятков станций.

Число измерений в различных угловых секторах существенно зависит от геометрии магнитного поля. При этом как количество сбоев  $N$ , так и плотность сбоев  $P$  возрастает при больших углах  $\gamma$  между лучом приемник–спутник GPS и направлением локального вектора магнитного поля Земли. Для Японии (рис. 1, б) и Южной Америки (рис. 1, в) можно отметить увеличение плотности сбоев также при малых значениях  $\gamma$ . В то же время для Европейского и Североамериканского регионов в области малых углов плотность сбоев невысокая. Анализ показывает, что подобная картина сохраняется в течение года, сезонных особенностей выявлено не было.

На рис. 2 приведено распределение сбоев на частоте L2 в различных регионах летом 2000 г. (черные

кривые) и 2008 г. (серые кривые). Из рисунка можно видеть, что общая форма кривых не зависит от года, за исключением региона Южной Америки. В то же время абсолютная величина плотности сбоев отличается. В Южноамериканском регионе в 2008 г. имеет место увеличение плотности сбоев при  $\gamma \sim 0^\circ$  и  $\sim 90^\circ$ , в 2000 г. при  $\gamma \sim 0^\circ$  увеличения количества сбоев не наблюдается, но имеется резкий максимум плотности сбоев при  $\gamma \sim 90^\circ$ .

Стоит отметить, что в Южной Америке в 2000 г. было малое число станций. В то же время подобная картина увеличения числа сбоев в области магнитного зенита наблюдается достаточно часто для этого региона. Значительное увеличение плотности сбоев при малых углах в этом регионе, а также в области углов  $\gamma \sim 15^\circ$  в регионе Японии в 2000 г. может быть связано с проникновением ионосферных экваториальных пузырей на средние широты [Afraimovich et al., 2011]. Для 2000 г. (рис. 2, з) этот эффект может проявляться достаточно сильно. Стоит отметить незначительное увеличение плотности сбоев в области магнитного зенита для отдельных дней 2000 г. в Североамериканском регионе. Средние значения сбоев сигнала GPS на частоте L1 и L2 для 2008 г. приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Максимальное среднее число сбоев  $P$  (%) на частотах L1 и L2 GPS при  $\gamma \sim 80-90^\circ$  в 2008 г.

	Япония	Европа	С. Америка	Ю. Америка
L1	1.1–1.4 %	3.5–4.7 %	1.8–2.5 %	2–2.5 %
L2	2.5–3 %	6–9 %	4.5–6 %	5–7 %

Таблица 2

Увеличение плотности сбоев при малых значениях  $\gamma$  в 2008 г.

регион параметр	Япония		Европа		Ю. Америка	
	$\gamma, ^\circ$	$P, \%$	$\gamma, ^\circ$	$P, \%$	$\gamma, ^\circ$	$P, \%$
L1	15	0.5–0.8	32–35	1.5–3	7	4.5–7
L2		1–1.5		2–4		8–11

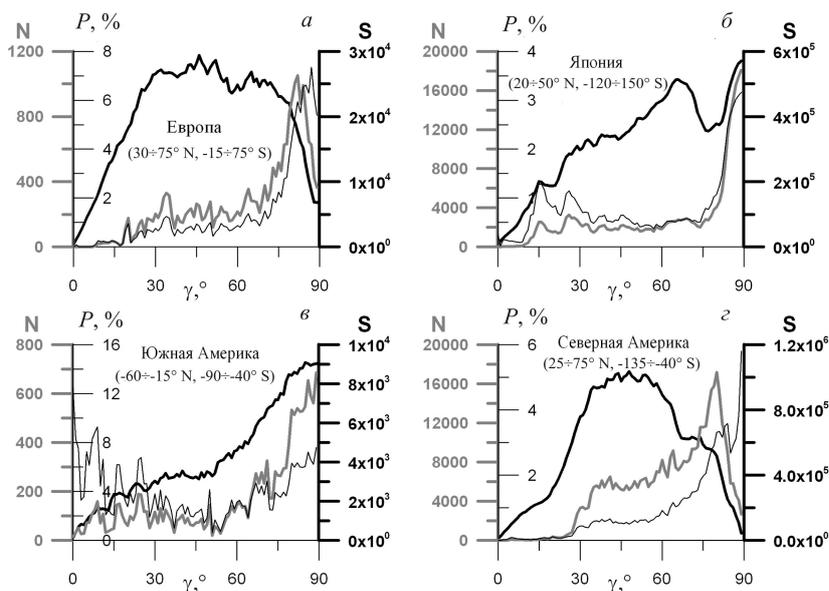


Рис. 1. Угловая диаграмма фазовых сбоев на частоте L2 GPS в различных регионах земного шара 13 июля 2008 г. ( $K_p < 3.3$ ). Наименование региона и широтно-долготный интервал указаны на панелях. Черной жирной кривой приведено полное число измерений  $S$ , серой – число фазовых сбоев  $N$ , черной тонкой – плотность сбоев  $P$ .

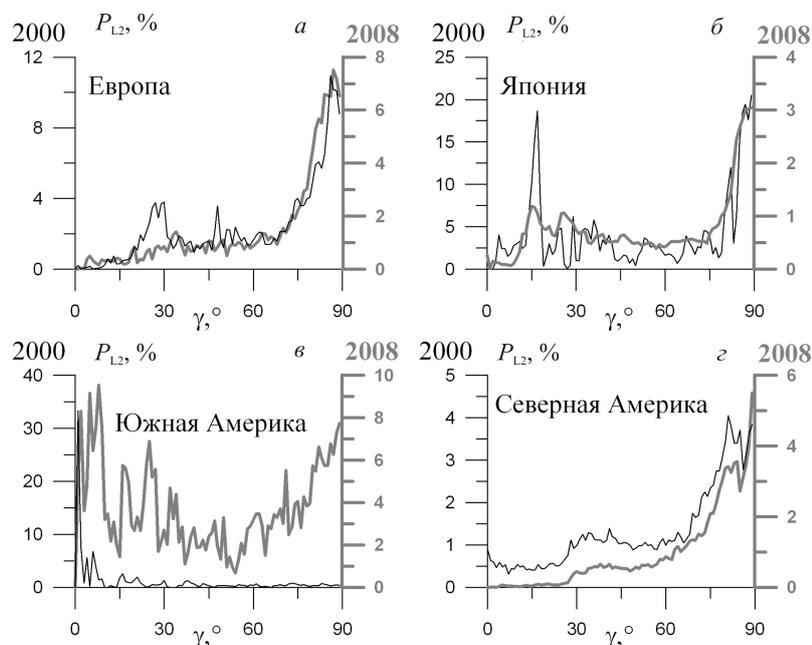


Рис. 2. Распределение сбоев на частоте L2 летом 2000 г. (черные кривые) и 2008 г. (серые кривые) для регионов Европы (а), Японии (б), Южной Америки (в), Северной Америки (г).

### Заключение

В работе было получено, что в достаточно спокойных геофизических условиях существуют значительные особенности сбоев сопровождения фазы сигнала GPS для различных углов относительно магнитного поля. Для лучей приемник–спутник GPS, которые перпендикулярны магнитной силовой линии на ионосферных высотах, имеет место увеличение плотности сбоев. Плотность сбоев достигает нескольких процентов и в несколько раз превышает фоновый уровень. Были выявлены региональные особенности, которые связаны, по всей видимости, с общим распределением мелкомасштабных ионосферных неоднородностей, ответственных за рассеяние сигнала GPS.

Представляется интересным провести аналогичный анализ для системы ГЛОНАСС. Это является предметом дальнейших изысканий.

Авторы выражают благодарность И.К. Едемскому, С.В. Воейкову за помощь в обработке данных и понимание, а также А.Б. Ишину за предварительные обсуждения по теме работы. Работа поддержана грантом РФФИ № 10-05-00113, грантом Президента РФ МК-2194.2011.05, а также Министерством образования и науки Российской Федерации (ГК 14.740.11.0078).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск, 2006. 480 с.
- Afraimovich E.L., Demyanov V.V., Kondakova T.N. Degradation of performance of the navigation GPS system in geomagnetically disturbed conditions // GPS Solut. 2003. V. 7, N 2. P. 109–119.
- Afraimovich E.L., Ishin A.B., Tinin M.V., Yasyukevich Yu.V., Jin S.G. First evidence of anisotropy of GPS phase slips caused by the mid-latitude field-aligned ionospheric irregularities // Adv. Space Res. 2011. V. 47. P. 1674–1680. doi:10.1016/j.asr.2011.01.015.
- Gurtner W. The Receiver Independent Exchange Format Version 2. URL: <<http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex2.txt>>.
- Ledvina B.M., Kintner P.M., Makela J.J. Temporal properties of intense GPS LI amplitude scintillations at midlatitudes // Radio Sci. 2004. V. 39. P. RS1S18. doi:10.1029/2002RS002832.
- Meggs R.W., Cathryn N.M., Smith A.M. An investigation into the relationship between ionospheric scintillation and loss of lock in GNSS receivers // Proc. of the Meeting RTO-MP-IST-056 Characterising the Ionosphere. Alaska, Fairbanks, US, June 12–16. 2006. Paper 5.
- Yeh K.C., Liu C.H. Radio wave scintillations in the ionosphere // Proc. IEEE. 1982. V. 70, N. 4. P. 324–360.

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск  
<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск