

ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ГНСС НА СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

¹А.С. Ясюкевич, ^{1,2}Ю.В. Ясюкевич, ¹А.В. Жуков, ¹А.М. Веснин, ¹Б.М. Малецкий

¹Институт солнечно земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
yasukevich@iszf.irk.ru

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

IMPACT OF IONOSPHERIC DISTURBANCES ON OPERATION OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS AT MID- AND HIGH-LATITUDES

¹A.S. Yasukevich, ^{1,2}Yu.V. Yasyukevich, ¹A.V. Zhukov, ¹A.M. Vesnin, ¹B.M. Maletsky

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
yasukevich@iszf.irk.ru

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Аннотация. Приводятся результаты исследования динамики сбоев параметров радионавигационных сигналов ГНСС, а также сбоев определения полного электронного содержания на средне- и высокоширотной станциях за период 2011–2018 гг. для систем GPS и ГЛОНАСС. Показано, что на обеих станциях стабильность функционирования выше для системы GPS. Проанализирована зависимость вероятности сбоев ПЭС от уровня ионосферной возмущенности, характеризующего на основе значений индекса WTEC.

Ключевые слова: ГНСС, GPS, ГЛОНАСС, сбой.

Abstract. We study the dynamics of GNSS radio signals slips, as well as slips in total electron content estimation at mid- and high-latitude stations for 2011–2018 period for GPS and GLONASS systems. The operation stability is shown to be higher for GPS system at both stations. We analyze the dependence of TEC slips probability on the ionospheric disturbance level, characterized by WTEC index.

Keywords: GNSS, GPS, GLONASS, slips.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), такие как ГЛОНАСС и GPS, широко внедряются в различных отраслях промышленности, транспорта и других областях, поэтому требования к точности и стабильности их функционирования постоянно возрастают. По мере совершенствования спутникового и приемного оборудования, точность и стабильность данных систем в большей степени зависит от состояния среды распространения, т. е. ионосферы. Искажение сигналов при трансионосферном распространении может приводить к ухудшению определения параметров, или даже, в особых случаях, к временному прекращению сопровождения (сбою) сигнала ГНСС [Skone, de Jong, 2000; Демьянов, Ясюкевич, 2014]. Экспериментально установлено, что ионосферные возмущения различного масштаба способны оказывать значительное влияние на точность позиционирования методами ГНСС [Afraimovich et al., 2003; Yasyukevich et al., 2018]. Целью настоящей работы является сравнительный анализ динамики сбоев радиофизических параметров сигналов ГНСС, а также сбоев определения полного электронного содержания (ПЭС) в средне- и высокоширотном регионе за длительные периоды времени.

Для анализа использовались данные фазовых двухчастотных измерений ГНСС на станциях TIXI (71° N, 128° E) и IRKJ (52° N, 104° E) [Dou et al., 2009] за 2011–2018 гг. Был выбран максимально длительный период времени, для которого на указанных станциях были доступны измерения как для системы GPS, так и для ГЛОНАСС. Рассмотрены сбои ГНСС двух типов [Ясюкевич и др., 2016]. К первому типу относятся сбои радионавигационных парамет-

ров сигнала, т. е. случаи отсутствия измерений псевдодалности (P1, P2) и срывов сопровождения фазы (L1, L2) навигационного сигнала. Сбои такого типа потенциально могут оказать влияние на точность навигационного местоопределения [Захаров и др., 2016]. К сбоям второго типа относятся скачки ПЭС, определяемого по данным ГНСС, величина которых превышают скорость регулярной изменчивости ионосферы. Порог скорости изменения ПЭС варьируется в зависимости от широты станции ГНСС [Astafyeva et al., 2014]. В настоящей работе в качестве порогового значения выбрана величина 1 TECU/30 с.

Для анализа возможного влияния среды распространения на динамику сбоев использовался обобщенный индекс ионосферной возмущенности WTEC [Voeikov et al., 2018]. Индекс WTEC рассчитывается на основе фазовых двухчастотных измерений ГНСС на одном приемнике путем взвешенного усреднения рядов интенсивности вариаций ПЭС в заданном интервале периодов для каждого момента времени по всем наблюдаемым спутникам ГНСС. Авторы показали, что индекс WTEC адекватно выявляет неоднородности ПЭС различного масштаба и может использоваться как эффективный показатель для описания ионосферных возмущений, связанных с различными факторами.

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ СБОВ И СБОВ ПЭС

В табл. 1 приведены отношения количества измерений, для которых были зарегистрированы сбои первого типа, к общему числу измерений. Видно, что на высокоширотной станции TIXI стабильности функционирования GPS и ГЛОНАСС на обеих рабо-

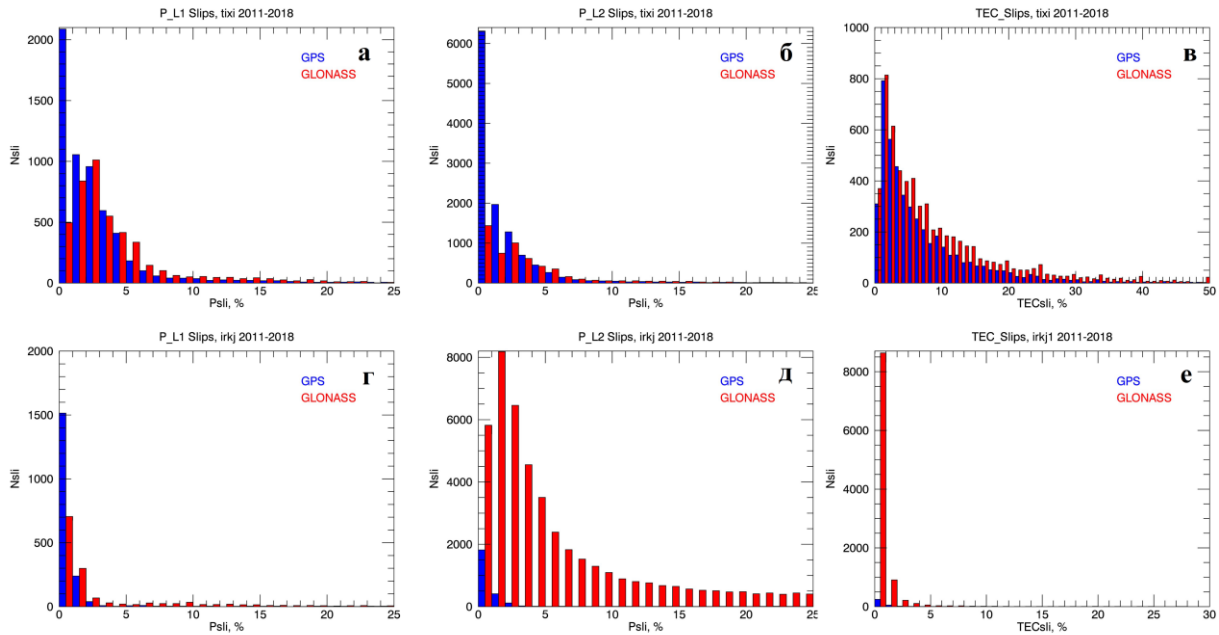


Рис. 1. Распределения значений вероятностей радионавигационных сбоев на частотах ГНСС L1 (а, г) и L2 (б, д), а также сбоев ПЭС (з, е) на станциях ТИХИ и ИРКЖ за 2011–2018 гг.

чих частотах сопоставимы. Число случаев, когда регистрировались сбои радионавигационных параметров сигнала, составляет около 0.4 % от всех измерений. На среднеширотной станции ИРКЖ для системы GPS это значение существенно ниже: на основной частоте L1 практически в десять раз. Для ГЛОНАСС разница менее выражена, на частоте L1 число сбоев снижается примерно в четыре раза. Это говорит о более высокой стабильности функционирования GPS по сравнению с ГЛОНАСС на средних широтах. Отметим также очень высокий процент сбоев на вспомогательной частоте L2 для ГЛОНАСС. Этот результат, вероятнее всего, связан с проблемами конкретного приемника на станции ИРКЖ. Данными ГЛОНАСС с этой станции нужно пользоваться с осторожностью.

Таблица 1

Отношения числа сбоев к общему числу измерений

	Приемник	ГЛОНАСС		GPS	
		P_L1	P_L2	P_L1	P_L2
TIXI	JPS	0.40 %	0.42 %	0.34 %	0.45 %
	EGGDT				
IRKJ	JPS	0.11 %	10.97 %	0.04 %	0.08 %
	LEGACY				

На рис. 1 показаны распределения значений вероятностей радионавигационных сбоев на частотах ГНСС L1 и L2, а также сбоев ПЭС на станциях ТИХИ и ИРКЖ за 2011–2018 гг. для систем GPS и ГЛОНАСС. Распределения показывают, что число случаев с более высокой вероятностью сбоев выше на станции ТИХИ, причем на частоте L1 более стабильной оказывается система GPS (рис. 1, а), а на частоте L2 — ГЛОНАСС (рис. 1, б). На станции ИРКЖ для системы GPS вероятность сбоев на частоте L1 практически всегда не превышает 1 %, для ГЛОНАСС регистрируются случаи, когда вероятность сбоев

может составлять 5–10 % (рис. 1, г). На частоте L2 наблюдается резкий рост вероятности сбоев для ГЛОНАСС (рис. 1, д). Это находит свое отражение и в распределении сбоев ПЭС, рассчитанного по данным ГЛОНАСС на этой станции (рис. 1, е). Как было отмечено выше, такое увеличение вероятности сбоев связано, вероятно, с аппаратными проблемами конкретного приемника. В распределении сбоев ПЭС на высокоширотной станции ТИХИ для GPS и ГЛОНАСС наблюдается схожая картина, однако для GPS число сбоев несколько ниже (рис. 1, в).

На рис. 2 приведены значения вероятностей сбоев ПЭС в зависимости от величины индекса WTEC на станции ТИХИ для систем GPS (а–в) и ГЛОНАСС (г–е). Показаны распределения за весь исследуемый период, а также отдельно для периодов зимнего солнцестояния (22 декабря ± 30 дней) и равноденствий (22 марта, 22 сентября ± 30 дней). Отметим, что для несортированных данных корреляция вероятности сбоев ПЭС с индексом WTEC невысокая: коэффициент корреляции составляет 0.43 для ГЛОНАСС и 0.41 для GPS. Разделение данных на сезоны приводит к росту уровня корреляции: до 0.6 для ГЛОНАСС и 0.5 для GPS. В летние месяцы, напротив, корреляция значений вероятности сбоев ПЭС с индексом WTEC не превышает 0.3. Отметим также, что для вероятности сбоев ПЭС, рассчитанного по данным ГЛОНАСС, наблюдается более быстрый рост с увеличением ионосферной возмущенности, чем для GPS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование динамики сбоев определения параметров радионавигационных сигналов ГНСС, а также сбоев ПЭС на средне- и высокоширотных станциях за длительный период времени. Показано, что для обеих станций вероятность радиофизических сбоев и сбоев определения ПЭС ниже для сис-

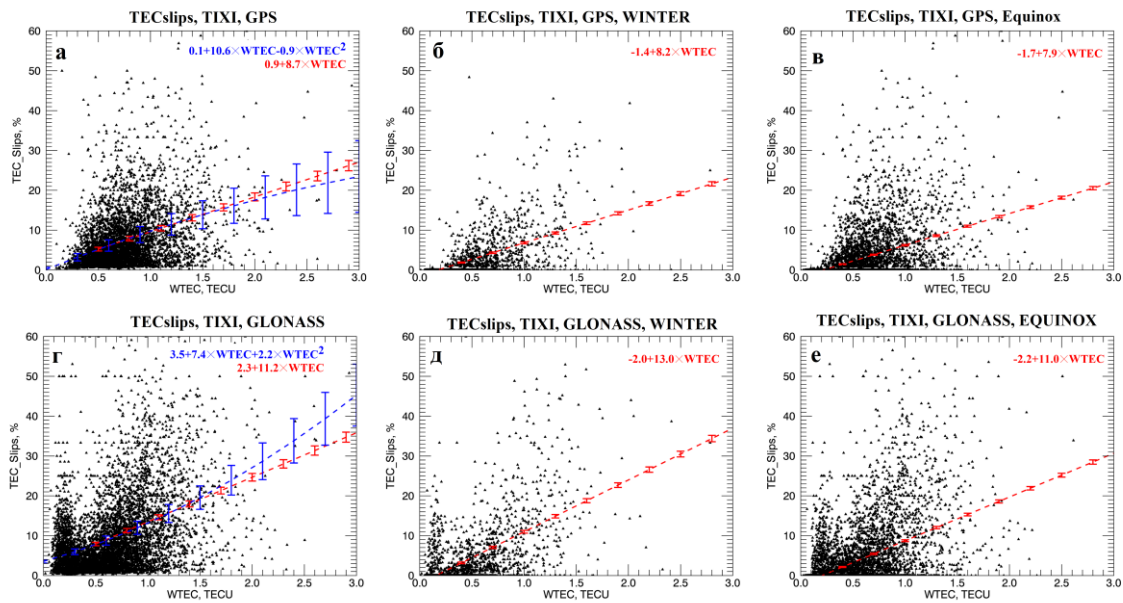


Рис. 2. Распределения вероятностей сбоев ПЭС в зависимости от индекса WTEC на станции TIXI для GPS (а–в) и ГЛОНАСС (г–е) за период 2011–2018 гг., а также для периодов зимы (б, д) и равноденствий (в, е). Вертикальными линиями показаны значения 1σ — неопределенности линейной и квадратичной моделей

темы GPS. Установлено, что наилучшая корреляция значений вероятности сбоев ПЭС на станции TIXI и индекса ионосферной возмущенности WTEC наблюдается в зимние месяцы и в периоды равноденствий, в летний период уровень корреляции между этими параметрами значительно снижается. Выявлено существенное число сбоев на частоте ГЛОНАСС L2 на станции IRKJ, что указывает на аппаратные проблемы приемника.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-3265.2019.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 349 с.

Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В., Ясюкевич А.С., Воейков С.В., Захаров В.И., Перевалова Н.П., Титков Н.Н., Заталкин Д.А. Влияние ионосферной и магнитосферной возмущенности на сбои глобальных навигационных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 1. С. 88–98.

Afraimovich E.L., Demyanov V.V., Kondakova T.N. Degradation of GPS performance in geomagnetically disturbed conditions // GPS Solutions. 2003. V. 7, N 2. P. 109–119.

Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., Zhivetiev I. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems // Space Weather. 2014. V. 12, N 7, P. 508–525.

Dou J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. Geod. 2009. V. 83. P. 191–198. DOI: [10.1007/s00190-008-0300-3](https://doi.org/10.1007/s00190-008-0300-3).

Skone S., de Jong M. The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance // Earth, Planets and Space. 2000. V. 52. P. 1067–1071.

Voeykov S.V., Yasyukevich A.S., Edemskiy I.K., et al. WTEC: a new index to estimate the intensity of ionospheric disturbances // Results in Physics. 2018. V. 11. P. 1056–1057. DOI: [10.1016/j.rinp.2018.11.023](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.11.023).

Yasyukevich Y., Astafyeva E., Padokhin A., et al. The 6 September 2017 X-class solar flares and their impacts on the ionosphere, GNSS, and HF radio wave propagation // Space Weather. 2018. V. 16. DOI: [10.1029/2018SW0019328](https://doi.org/10.1029/2018SW0019328).

Zakharov V.I., Yasyukevich Yu.V., Titova M.A. Effect of magnetic storms and substorms on GPS slips at high latitudes // Cosmic Res. 2016. V. 54, iss. 1. P. 20–30.