Влияние ионосферной и магнитосферной возмущенности на сбои глобальных навигационных спутниковых систем

Ю.В. Ясюкевич¹, И.В. Живетьев^{1,2}, А.С. Ясюкевич¹, С.В. Воейков¹, В.И. Захаров^{1,3},
Н.П. Перевалова¹, Н.Н. Титков⁴

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Иркутск, Россия

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
684034, Камчатский край, п. Паратунка, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119234, Москва, Россия

⁴Камчатский филиал Геофизической службы РАН

683006, Петропавловск-Камчатский, Россия

E-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

Изучена динамика сбоев радиофизических параметров сигналов ГЛОНАСС и GPS, а также сбоев определения полного электронного содержания (ПЭС) на станциях средне- и высокоширотного регионов в различных геофизических условиях за период ноября 2014 г. – июля 2015 г. Показано, что плотность сбоев измерения псевдодальности P_I на высоких широтах для системы ГЛОНАСС ниже, чем для GPS. На средних широтах средняя плотность сбоев ПЭС $N_I \text{ TECU/мин}$ в спокойных геомагнитных условиях практически не зависит от поведения индексов K_p и AE и не превышает 12%. На высоких широтах $N_I \text{ TECU/мин}$ зимой в целом выше, чем летом, и может достигать 50–60%. Изменение $N_I \text{ TECU/мин}$ на высоких широтах коррелирует с поведением геомагнитных индексов, однако зависит от K_p и AE существенно разным образом. В возмущенных условиях $N_I \text{ TECU/мин}$ увеличивается с ростом AE медленнее, чем в спокойных, а увеличение $N_I \text{ TECU/мин}$ с ростом K_p в возмущенных условиях, напротив, происходит в 1,5 раза быстрее, чем в спокойной геомагнитной обстановке. Зависимости величины $N_I \text{ TECU/мин}$ от индекса ионосферной возмущенности W_{tec} на средних и высоких широтах похожи. Возрастание плотности сбоев ПЭС $N_I \text{ TECU/мин}$ с ростом W_{tec} в зимний период происходит в 1,5 раза быстрее, чем в летний. При этом на высоких широтах увеличение $N_I \text{ TECU/мин}$ с ростом W_{tec} происходит примерно в 2–2,5 раза быстрее, чем на средних.

Ключевые слова: ГНСС, ГЛОНАСС, GPS, сбои, ионосфера, полное электронное содержание

Одобрена к печати: 21.11.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-88-98

Введение

В настоящее время требования к стабильности функционирования, а также к точности глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как ГЛОНАСС и GPS, постоянно возрастают. По мере совершенствования технологий создания спутникового и приёмного оборудования точность и стабильность данных систем все в большей степени зависит от состояния среды распространения, т.е. в случае ГНСС – ионосферы. Различные неоднородности ионосферы, как среды распространения, оказывают заметное влияние на групповые, фазовые и амплитудные характеристики дециметровых радиоволн, используемых ГНСС. Искажение сигналов при трансionoсферном распространении, в свою очередь, может приводить к ухудшению определения параметров или даже в особых случаях – к временному прекращению сопровождения (сбою) сигнала навигационных спутниковых систем.

Основными источниками ионосферных неоднородностей являются гелиогеофизические возмущения околоземного космического пространства (ОКП). Исследованию влияния различных факторов космической погоды (геомагнитных бурь, солнечных вспышек и т.п.) на стабильность работы и точность позиционирования ГНСС посвящено достаточ-

но большое количество работ (Skone, de Jong, 2000; Afraimovich et al., 2003; Stankov et al., 2006; Rama Rao et al., 2009; Demyanov et al., 2013; Astafyeva et al., 2014). Рассеяние навигационного сигнала на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации (порядка первой зоны Френеля, 100–300 м для ГНСС) приводит к возникновению сильных мерцаний амплитуды и фазы сигналов в точке приема (Yeh, Liu, 1982; Pi et al., 1997). В работе (Ledvina et al., 2002) показана связь мерцаний амплитуды сигнала на рабочей частоте GPS *L1* со срывами сопровождения данного сигнала. Кроме этого, за счет таких неоднородностей в точке приема возникает интерференция рассеянных волн, что может вызвать дополнительные быстрые флуктуации и замирания амплитуды сигнала на входе приемной антенны (Демьянов, Ясюкевич, 2014). В случае же присутствия неоднородностей электронной концентрации большего масштаба появляется хаотическая рефракция («дрожание луча») и пропорциональная ей рефракционная ошибка измерения радионавигационного параметра.

Известно, что высокоширотная ионосфера является одной из основных зон локализации интенсивных мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации. Основные причины этого – электрические поля и высыпающиеся в эту область заряженные солнечные частицы. Это является причиной для проведения серьезных исследований влияния ионосферы на распространение сигналов ГНСС в высокоширотном регионе (Aarons, Lin, 1999; Basu et al., 1985; Mushini et al., 2012). Например, отмечен высокий уровень фазовых мерцаний на высоких геомагнитных широтах в периоды магнитных бурь (Béniguel et al., 2004) и при максимальной солнечной активности (Meggs et al., 2008). В работе (Astafyeva et al., 2014) показано, что в периоды геомагнитных бурь область наибольшего количества сбоев определения полного электронного содержания (ПЭС) располагается вблизи аврального овала.

В работе (Zakharov et al., 2016) изучена динамика сбоев параметров навигационных сигналов системы GPS в период 2010–2014 гг. для станций, расположенных в Арктическом регионе, проанализированы вероятности «инструментальной» потери фазы и псевдодальности, а также кратковременных вариаций большой скорости изменений ПЭС в различных геомагнитных условиях. Показано, что вероятности сбоев при определении ПЭС значительно (в 100–200 раз) превышают инструментальные и растут во время геомагнитных бурь и суббурь.

В настоящей работе изучена динамика сбоев радиофизических параметров сигналов ГНСС (ГЛОНАСС и GPS), а также сбоев определения ПЭС на отдельных станциях в средне- и высокоширотном регионах при различных геофизических условиях за период ноября 2014 г. – июля 2015 г. На основе регрессионной методики получена модель вероятности появления сбоев (а, по сути, модель ухудшения качества позиционирования ГНСС) в зависимости от состояния ОКП. Основной акцент сделан на сравнении характерных особенностей возникновения сбоев на высоких и средних широтах.

Данные и методы обработки

В работе были рассмотрены сбои ГНСС двух типов. К первому типу относятся сбои радионавигационных параметров сигнала, т.е. случаи сбоев измерений псевдодалности (кодовые сбои) и сопровождения фазы (фазовые сбои) навигационного сигнала. Фазовый сбой сигнала регистрируется в случае невозможности измерений набега фазы ($L1$, $L2$) на одной из рабочих частот ГНСС. Сбой кодовых измерений – при отсутствии измерений псевдодалности ($P1$, $P2$) по соответствующему коду на рабочей частоте. Сбои такого типа потенциально могут оказать влияние на точность навигационного местоопределения (Zakharov et al., 2016). В частности, параметр $P1$ является для большинства пользователей основным при координатных определениях.

К сбоям второго типа относятся резкие изменения ПЭС, определяемого по данным ГНСС, которые не имеют физического смысла. Принимая во внимание тот факт, что скорость регулярной изменчивости ионосферы составляет 0,1–1 TECU/мин, в данной работе под сбоем ПЭС мы понимали скачки ПЭС, превышающие 1 TECU/мин. В работе (Asatfayeva et al., 2014) этот порог выбирался 1 и 2 TECU/мин для высоких и средних широт соответственно.

Исходными данными являются файлы данных ГНСС в формате RINEX (Gurtner, Estey, 2005). С целью анализа распределения сбоев во времени для каждого приемника ГНСС вычислялось число сбоев по одному параметру T (радиофизические параметры или ПЭС) M_T , а также полное число измерений S за час на всех наблюдаемых спутниках каждой навигационной системы. Далее, для данной группировки спутников определялась средняя плотность (или вероятность) сбоев по каждому параметру N_T :

$$N_T = 100\% \frac{M_T}{S}.$$

Для анализа влияния геомагнитной активности на вероятность появления сбоев проводился расчет линейных регрессий полученных распределений N_T в зимний и летний периоды от планетарного индекса геомагнитной активности K_p (<http://www.ngdc.noaa.gov>), индекса AE (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>), характеризующего интенсивность авроральной токовой системы, а также от индекса W_{tec} , характеризующего ионосферную возмущенность (Perevalova et al., 2016). Вариации ионосферы, оказывающие влияние на стабильность ГНСС, могут возникать не только по причине гелио- и геомагнитных возмущений, но и вследствие действия источников, расположенных в нижней нейтральной атмосфере Земли (Kazimirovsky, 2002). В этой связи интересным является исследование зависимости плотности сбоев от некоторого обобщенного параметра ионосферной возмущенности. В качестве такого параметра использовался индекс W_{tec} , который рассчитывается путем усреднения интенсивности вариаций ПЭС в заданном диапазоне периодов по измерениям на одной двухчастотной приемной станции GPS/ГЛОНАСС (Voeykov et al., 2016). Нами рассматривались вариации ПЭС с периодами до 60 мин. Для удаления случайных шумов в дополнение к методике расчета W_{tec} , описанной в работе

(Voeikov et al., 2016), проводилось сглаживание полученных рядов методом скользящего среднего с окном 60 мин.

Расчет сбоев проводился для навигационных систем ГЛОНАСС и GPS на основе данных фазовых двухчастотных приемников ГНСС, расположенных в различных долготных секторах высокоширотного региона (BAKE 263,9° в.д., 64,3° с.ш.; NYA1 11,9° в.д., 78,9° с.ш.; TIXI 128,9° в.д., 71,6° с.ш.) а также для трех среднеширотных станций (AVCH 158,7° в.д., 53,2° с.ш.; LIST 104,9° в.д., 51,8° с.ш.; VIS0 18,4° в.д., 57,6° с.ш.). Станция LIST входит в сеть ГНСС приемников ИСЗФ СО РАН, AVCH – в Камчатскую сеть KamNet, остальные станции входят в международную сеть IGS. Отдельно рассматривались сбои, зафиксированные в зимний и летний периоды. В качестве летних условий был выбран период с центром в июньское солнцестояние ± 30 дней, в качестве зимних – декабрьское солнцестояние ± 30 дней. Производилось также разбиение данных по уровню геомагнитной активности: отдельно рассматривались сбои, зарегистрированные в спокойных ($K_p \leq 3$, $AE \leq 600$ нТл) и возмущенных геомагнитных условиях ($K_p > 3$, $AE > 600$ нТл).

Результаты анализа

На *рис. 1* показаны гистограммы распределения плотности сбоев N_T радионавигационного параметра P_I (левая колонка) и ПЭС (правая колонка) для ГНСС ГЛОНАСС и GPS. Значение по оси ординат n показывает количество случаев, когда в общей статистике фиксировалось соответствующее значение N_T . Представлены распределения для средне- (LIST) и высокоширотного (TIXI) регионов. Видно, что для P_I на средних широтах число случаев, когда плотность сбоев превышает 1%, для системы ГЛОНАСС выше, чем для GPS (*рис. 1а*). Для ГЛОНАСС наблюдаются случаи, когда плотность сбоев P_I может достигать 10%. Для GPS плотность сбоев P_I в большинстве случаев не превышает 1%. На высоких широтах отмечается обратная картина. В то время как для ГЛОНАСС плотность сбоев P_I практически всегда $\leq 1\%$, для GPS этот параметр может достигать 5% (*рис. 1в*). Это достаточно неожиданный результат, поскольку длина кодовой последовательности у ГЛОНАСС вдвое меньше, чем у GPS, и последняя потенциально точнее и устойчивее. Более высокая стабильность ГЛОНАСС по сравнению с GPS на высоких широтах может быть обусловлена различием в геометрии созвездий этих систем (спутники ГЛОНАСС имеют более высокое наклонение орбит и иную организацию спутников на орбитальных плоскостях), а также, вероятно, отличным от GPS частотным планом и методами обработки сигнала в приемной аппаратуре. Для сбоев ПЭС как на средних, так и на высоких широтах распределения, полученные для ГЛОНАСС и GPS, практически совпадают (*рис. 1б, г*). В этой связи ниже мы анализируем сбои ПЭС только по данным ГЛОНАСС.

На *рис. 2* показаны распределения плотности сбоев ПЭС $N_{I \text{ TECU/мин}}$ в зависимости от величины индекса AE на средних (LIST) и высоких широтах (TIXI) в зимний и летний периоды. Отдельно показаны распределения в спокойных (*а, в, д, ж*) и возмущенных

(б, з, е, з) геомагнитных условиях. На каждой панели пунктиром нанесены регрессионные зависимости и приведены их коэффициенты.

Рис. 1. Гистограммы распределения (n) плотности сбоя $P1$ (левая колонка) и плотности сбоя ПЭС (правая колонка) для ГЛОНАСС и GPS в средне- (а, б) и высокоширотном (в, г) регионах

Видно, что на высоких широтах значения $N_{I \text{ TECU/мин}}$ хорошо коррелируют с поведением индекса AE . Зимой значения $N_{I \text{ TECU/мин}}$ в целом выше, чем летом (рис. 2д, е и рис. 2ж, з). Рост плотности сбоя при увеличении авроральной возмущенности происходит быстрее в зимний период. Для среднеширотной станции LIST плотность сбоя ПЭС практически не зависит от величины индекса AE (рис. 2а–г). Только в зимний период при высокой геомагнитной активности наблюдается небольшой рост плотности сбоя ПЭС при увеличении AE (рис. 2б).

В табл. 1 приведены коэффициенты линейной регрессии a , b ($N_T = a \cdot AE + b$) и коэффициенты корреляции (r) между плотностью сбоев ПЭС и индексом AE ($\sigma/\sqrt{n}$ – стандартная ошибка) для шести приёмников ГЛОНАСС, расположенных в высоко- и среднеширотных регионах, в спокойных ($AE \leq 600$) и возмущённых ($AE > 600$) геомагнитных условиях. Можно видеть, что на высоких широтах величина r больше, чем на средних. Для высокоширотных станций в спокойных условиях величина r выше, чем в периоды возмущений. В среднеширотном регионе наблюдается обратная картина: значения r в возмущённых условиях больше, чем в спокойных. Это может объясняться тем, что в периоды геомагнитных возмущений область аврорального овала смещается к более низким широтам, и процессы, происходящие в авроральной токовой системе, начинают оказывать влияние на состояние ионосферы средних широт. Отметим также, что в спокойных геомагнитных условиях плотность сбоев ПЭС на высоких широтах в целом увеличивается быстрее с ростом AE , чем в возмущённой обстановке.

Таблица 1. Параметры линейной регрессии и коэффициенты корреляции числа сбоев ПЭС $N_{I \text{ TECU/мин}}$ от AE

Средние широты												
	AVCH				LIST				VISO			
	Лето		Зима		Лето		Зима		Лето		Зима	
	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600
a	0,0009	0,0013	-0,0005	0,0004	0,0011	-0,0005	-0,0010	0,0044	0,0008	0,0085	0,0039	0,0139
b	0,9984	0,6618	1,6970	1,9852	1,5075	2,8724	2,0913	-0,6113	0,3569	-4,4484	1,1304	-6,4008
r	0,0898	0,1146	-0,0245	0,0216	0,0827	-0,0396	-0,0532	0,1490	0,1194	0,3798	0,1999	0,5300
σ/√n	0,0003	0,0012	0,0005	0,0032	0,0004	0,0013	0,0005	0,0046	0,0002	0,0023	0,0005	0,0035
Высокие широты												
	BAKE				NYAI				TIXI			
	Лето		Зима		Лето		Зима		Лето		Зима	
	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600
a	0,0237	0,0167	0,0527	-0,0029	0,0176	0,0036	0,0352	0,0250	0,0150	0,0210	0,0436	0,0269
b	0,7611	3,0009	6,4944	41,9049	2,1952	7,9540	10,4186	16,8782	-0,3185	-3,7805	1,2802	14,1928
r	0,5957	0,3525	0,5394	-0,0344	0,4870	0,0873	0,4079	0,2340	0,5046	0,4446	0,6313	0,4106
σ/√n	0,0009	0,0048	0,0022	0,0133	0,0008	0,0044	0,0021	0,0164	0,0007	0,0046	0,0014	0,0095

На рис. 3 изображены распределения плотности сбоев ПЭС $N_{I \text{ TECU/мин}}$ в зависимости от величины индекса K_p на средних (LIST) и высоких широтах (TIXI) в зимний и летний периоды. Как и на рис. 2, распределения для спокойных (а, в, д, ж) и возмущённых (б, г, е, з) геомагнитных условий показаны отдельно. На каждой панели пунктиром нанесены регрессионные зависимости и приведены их коэффициенты.

Для среднеширотной станции LIST при низкой геомагнитной активности как в зимних, так и в летних условиях плотность сбоев ПЭС практически не зависит от величины K_p . При $K_p > 3$ величина $N_{I \text{ TECU/мин}}$ несколько возрастает с увеличением возмущённости. Однако в целом плотность сбоев ПЭС в различных геомагнитных условиях практически одинакова и не превышает в максимуме 12% и зимой, и летом. Для высокоширотной станции TIXI регистрируется возрастание плотности сбоев ПЭС с увеличением K_p при любых

геомагнитных условиях. Причем в возмущённых условиях увеличение $N_{I \text{ TECU/мин}}$ с ростом K_p происходит в 1,5 раза быстрее, чем в спокойных как в летний (рис. 3ж, з), так и в зимний периоды (рис. 3д, е), а величина $N_{I \text{ TECU/мин}}$ в отдельных случаях может достигать 50–60%.

Рис. 2. Распределения плотности сбоев ПЭС $N_{I \text{ TECU/мин}}$ в зависимости от величины индекса AE на средних (LIST) и высоких широтах (TIXI) в зимний и летний периоды для спокойных (а, в, д, ж) и возмущённых (б, г, е, з) геомагнитных условий

Рис. 3. Распределения плотности сбоев ПЭС $N_{I \text{ TECU/мин}}$ в зависимости от величины индекса K_p на средних (LIST) и высоких широтах (TIXI) в зимний и летний периоды для спокойных (а, в, д, ж) и возмущённых (б, г, е, з) геомагнитных условий

Распределения плотности сбоя ПЭС $N_{I \text{ TECU/мин}}$ в зависимости от величины индекса ионосферной возмущенности W_{tec} на средних (LIST) и высоких широтах (TIXI) в зимний (левая колонка) и летний (правая колонка) периоды приведены на *рис. 4*. На каждой панели пунктиром нанесены регрессионные зависимости и приведены их коэффициенты.

Отметим, что зависимость $N_{I \text{ TECU/мин}}$ от W_{tec} , в отличие от зависимостей $N_{I \text{ TECU/мин}}$ от геомагнитных индексов K_p и AE , на высоких и средних широтах демонстрируют схожую динамику. При этом скорость роста плотности сбоя ПЭС $N_{I \text{ TECU/мин}}$ при увеличении ионосферной возмущенности на высоких широтах примерно в 2–2,5 раза выше, чем на средних. Для обеих представленных станций в зимний период возрастание плотности сбоя ПЭС $N_{I \text{ TECU/мин}}$ с ростом возмущенности W_{tec} происходит в 1,5 раза быстрее, чем в летний.

Рис. 4. Распределения плотности сбоя ПЭС $N_{I \text{ TECU/мин}}$ в зависимости от величины индекса W_{tec} на средних (LIST) и высоких широтах (TIXI) в зимний и летний периоды

Заключение

С применением регрессионной методики изучена динамика сбоя измерения радиофизических параметров сигналов ГНСС ГЛОНАСС и GPS, а также сбоя ПЭС в средне- и высокоширотном регионах в различных геофизических условиях в период с ноября 2014 г.

по июль 2015 г. Показано, что плотность сбоев измерения псевдодальности P_I на высоких широтах для системы ГЛОНАСС ниже, чем для GPS. На средних широтах, напротив, стабильность измерения псевдодальности на основной частоте для GPS выше, чем для ГЛОНАСС.

Анализ распределений плотности сбоев ПЭС $N_{I \text{ TECU/мин}}$ в зависимости от геомагнитных индексов K_p и AE показал, что на средних широтах плотность сбоев ПЭС в спокойных геомагнитных условиях практически не зависит от K_p и AE и не превышает 12%. На высоких широтах плотность сбоев ПЭС $N_{I \text{ TECU/мин}}$ зимой в целом выше, чем летом, и может достигать 50–60%, а изменение $N_{I \text{ TECU/мин}}$ коррелирует с динамикой геомагнитных индексов. При этом плотность сбоев ПЭС в возмущенных геомагнитных условиях увеличивается с ростом AE медленнее, чем в спокойных. Увеличение плотности сбоев ПЭС с ростом K_p при высокой геомагнитной активности на высоких широтах, напротив, происходит в 1,5 раза быстрее, чем в спокойной геомагнитной обстановке.

Изменения плотности сбоев ПЭС в зависимости от обобщенного индекса ионосферной возмущенности W_{tec} на высоких и средних широтах демонстрируют схожую динамику. Возрастание плотности сбоев ПЭС с ростом W_{tec} в зимний период происходит в 1,5 раза быстрее, чем в летний. При этом на высоких широтах возрастание $N_{I \text{ TECU/мин}}$ происходит примерно в 2–2,5 раза быстрее, чем на средних.

Работы по исследованию сбоев ПЭС и сбоев радионавигационных параметров в высокоширотном регионе выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № 14-37-00027 (В.И. Захаров, Ю.В. Ясюкевич), работы по анализу сбоев в среднеширотном регионе получены в рамках выполнения проектов РФФИ № 16-35-50021_мол_нр (И.В. Живетьев, Н.П. Перевалова), и № 16-35-60018 (А.С. Ясюкевич).

В работе использовались экспериментальные данные ЦКП «Ангара» (ИСЗФ СО РАН), данные мировой сети приемников IGS (Dow et al., 2009), а также данные, полученные в рамках плана НИР ФИЦ ЕГС РАН No AAAA-A16-116070550057-7.

Литература

1. Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 349 с.
2. Aarons J., Lin B.J. Development of high latitude phase fluctuations during the January 10, April 10–11, and May 15, 1997 magnetic storms // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 1999. Vol. 61. P. 309–327. DOI: 10.1016/S1364-6826(98)00131-X.
3. Afraimovich E.L., Demyanov V.V., Kondakova T.N. Degradation of GPS performance in geomagnetically disturbed conditions // GPS Solutions. 2003. Vol. 7. No. 2. P. 109–119. DOI: 10.1007/s10291-003-0053-7.
4. Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., Zhivetiev I. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems // Space Weather. 2014. Vol. 12. No. 7. P. 508–525. DOI: 10.1002/2014SW001072.
5. Basu S., Basu S., MacKenzie E., Whitney H.E. Morphology of phase and intensity scintillations in the auroral oval and polar cap // Radio Sci. 1985. Vol. 20. No. 3. P. 347–356. DOI: 10.1029/RS020i003p00347.
6. Béniguel Y., Forte B., Radicella S.M., Strangeways H.J., Ghorm V.E., Zernov N.N. Scintillations effects on satellite to Earth links for telecommunication and navigation purposes // Annals of Geophys. 2004. Vol. 47. No. 2/3. P. 1179–1199. DOI: 10.4401/ag-3293.
7. Demyanov V.V., Yasyukevich Yu. V., Jin S. Effects of Solar Radio Emission and Ionospheric Irregularities on GPS/GLONASS Performance // Geodetic Sciences – Observations, Modeling and Applications. InTech, 2013. P. 177–222.
8. Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. Geodesy. 2009. Vol. 83. P. 191–198. DOI: 10.1007/s0019000803003.

9. Gurtner W., Estey L. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11 // 2005. URL: <ftp://igschb.jpl.nasa.gov/igschb/data/format/rinex211.txt>.
10. Kazimirovsky E.S. Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review // *Ann. of Geophys.* 2002. Vol. 45. No. 1. P. 1–29. DOI: 10.4401/ag-3482.
11. Ledvina B.M., Makela J.J., Kintner P.M. First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitude // *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29. No. 14. DOI: 10.1029/2002GL014770.
12. Meggs R.W., Mitchell C.M., Honary F. GPS scintillation over the European arctic during the November 2004 storms // *GPS Solut.* 2008. Vol. 12. P. 281–287. DOI: 10.1007/s10291-008-0090-3.
13. Mushini S.C., Jayachandran P.T., Langley R.B., Pokhotelov D. Improved amplitude- and phase-scintillation indices derived from wavelet detrended high-latitude GPS data // *GPS Solut.* 2012. Vol. 16. P. 363–373. DOI: 10.1007/s10291-011-0238-4.
14. Perevalova N.P., Edemsky I.K., Timofeeva O.V., Katashevtseva D.D., Polyakova A.S. Dynamics of the level of total electron content disturbance at high and middle latitudes according to GPS // *Solar-Terrestrial Physics.* 2016. Vol. 2. Issue 1. P. 50–60. DOI: 10.12737/19878.
15. Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network // *Geophys. Res. Lett.* 1997. Vol. 24. No. 18. P. 2283–2286. DOI: 10.1029/97GL02273.
16. Rama Rao P.V.S., Gopi Krishna S., Vara Prasad J., Prasad S.N.V.S., Prasad D.S.V.V.D., Niranjan K. Geomagnetic storm effects on GPS based navigation // *Ann. Geophys.* 2009. Vol. 27. P. 2101–2110. DOI: 10.5194/an-geo-27-2101-2009.
17. Skone S., de Jong M. The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance // *Earth, Planets and Space.* 2000. Vol. 52. P. 1067–1071. DOI: 10.1186/BF03352332.
18. Stankov S.M., Jakowski N., Tsybulya K., Wilken V. Monitoring the generation and propagation of ionospheric disturbances and effects on Global Navigation Satellite System positioning // *Radio Sci.* 2006. Vol. 41. RS6S09. DOI: 10.1029/2005RS003327.
19. Voeykov S.V., Berngardt O.I., Shestakov N.V. Use of the index of TEC vertical variation disturbance in studying ionospheric effects of the Chelyabinsk meteorite // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2016. Vol. 56. Issue 2. P. 219–228. DOI: 10.1134/S0016793216020122.
20. Yeh K.C., Liu C.H. Radio wave scintillations in the ionosphere // *Proc. IEEE.* 1982. Vol. 70. No. 4. P. 24–64. DOI: 10.1109/PROC.1982.12313.
21. Zakharov V.I., Yasyukevich Yu.V., Titova M.A. Effect of magnetic storms and substorms on GPS slips at high latitudes // *Cosmic Research.* 2016. Vol. 54. Issue 1. P. 20–30. DOI: 10.1134/S0010952516010147.

Ionosphere and magnetosphere disturbance impact on operation slips of global navigation satellite systems

Yu.V. Yasyukevich¹, I.V. Zhivetiev^{1,2}, A.S. Yasyukevich¹, S.V. Voeykov¹, V.I. Zakharov^{1,3},
N.P. Perevalova¹, N.N. Titkov⁴

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia*

²*Institute of Cosmophysical Research and Radiowave Propagation FEB RAS
Kamchatsky Krai 684034, Paratunka, Russia*

³*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119234, Russia*

⁴*Kamchatka Branch, Geophysical Service RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia
E-mail: yasyukevich@iszf.irk.ru*

We studied the dynamics of the GPS and GLONASS radio navigation parameter slips, as well as the slips in measuring the total electron content (TEC). Analysis was performed for high- and mid-latitude stations under different geophysical conditions. We used the data over 2014 November – 2015 July. We found that P_I slip density at high latitudes for GLONASS is lower, than that for GPS. Under quiet geomagnetic condition, the TEC slip density $N_I \text{ TECU/min}$ at mid-latitudes does not almost correspond to K_p or AE , and is not higher than 12%. At high latitudes, in winter, $N_I \text{ TECU/min}$ is higher than that in summer, and reaches up to 50–60%. The TEC slip dynamic correlates with geomagnetic indices, but depends on K_p and AE differently. The TEC slip density under disturbed conditions increases with the AE growth slower, than that under quiet ones. On the contrary, the $N_I \text{ TECU/min}$ increase with K_p for disturbed conditions is 1.5 faster. The $N_I \text{ TECU/min}$ dependences on W_{tec} are similar for high- and mid-latitudes. The winter growth in $N_I \text{ TECU/min}$ with

the W_{tec} increase is 1.5 times higher than that in summer. At high latitudes, the $N_{TECU/min}$ growth is 2–2.5 times higher than that at mid-latitudes.

Keywords: GNSS, GLONASS, GPS, slips, ionosphere, total electron content

Accepted: 21.11.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-88-98

References

1. Dem'yanov V.V., Yasyukevich Yu.V., *Mekhanizmy vozdeistviya neregulyarnykh geofizicheskikh faktorov na funktsionirovaniye sputnikovyykh radionavigatsionnykh system* (Mechanisms of impact of irregular geophysical factors on operation of radio positioning satellite systems), Irkutsk: Izd-vo IGU, 2014, 349 p.
2. Aarons J., Lin B.J., Development of high latitude phase fluctuations during the January 10, April 10–11, and May 15, 1997 magnetic storms, *J. Atm. Solar-Terr. Phys.*, 1999, Vol. 61, pp. 309–327. DOI: 10.1016/S1364-6826(98)00131-X.
3. Afraimovich E.L., Demyanov V.V., Kondakova T.N., Degradation of GPS performance in geomagnetically disturbed conditions, *GPS Solutions*, 2003, Vol. 7, No. 2, pp. 109–119. DOI: 10.1007/s10291-003-0053-7.
4. Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., Zhivetiev I., Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems, *Space Weather*, 2014, Vol. 12, No. 7, pp. 508–525. DOI: 10.1002/2014SW001072.
5. Basu S., Basu S., MacKenzie E., Whitney H.E., Morphology of phase and intensity scintillations in the auroral oval and polar cap, *Radio Sci.*, 1985, Vol. 20, No. 3, pp. 347–356. DOI: 10.1029/RS020i003p00347.
6. Béniguel Y., Forte B., Radicella S.M., Strangeways H.J., Gherm V.E., Zernov N.N., Scintillations effects on satellite to Earth links for telecommunication and navigation purposes, *Annals of Geophys.*, 2004, Vol. 47, No. 2/3, pp. 1179–1199. DOI: 10.4401/ag-3293.
7. Demyanov V.V., Yasyukevich Yu.V., Jin S., Effects of Solar Radio Emission and Ionospheric Irregularities on GPS/GLONASS Performance, In: *Geodetic Sciences – Observations, Modeling and Applications*, InTech, 2013, pp. 177–222.
8. Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C., The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *J. Geodesy*, 2009, Vol. 83, pp. 191–198. DOI: 10.1007/s0019000803003.
9. Gurtner W., Estey L., RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11. 2005, available at: <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex211.txt>.
10. Kazimirovsky E.S., Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review, *Ann. of Geophys.*, 2002, Vol. 45, No. 1, pp. 1–29. DOI: 10.4401/ag-3482.
11. Ledvina B.M., Makela J.J., Kintner P.M., First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitude, *Geophys. Res. Lett.*, 2002, Vol. 29, No. 14. DOI: 10.1029/2002GL014770.
12. Meggs R.W., Mitchell C.M., Honary F., GPS scintillation over the European arctic during the November 2004 storms, *GPS Solut.*, 2008, Vol. 12, pp. 281–287. DOI: 10.1007/s10291-008-0090-3.
13. Mushini S.C., Jayachandran P.T., Langley R.B., Pokhotelov D., Improved amplitude- and phase-scintillation indices derived from wavelet detrended high-latitude GPS data, *GPS Solut.*, 2012, Vol. 16, pp. 363–373. DOI: 10.1007/s10291-011-0238-4.
14. Perevalova N.P., Edemsky I.K., Timofeeva O.V., Katashevstseva D.D., Polyakova A.S., Dynamics of the level of total electron content disturbance at high and middle latitudes according to GPS, *Solar-Terrestrial Physics*, 2016, Vol. 2, Issue 1, pp. 50–60. DOI: 10.12737/19878.
15. Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M., Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network, *Geophys. Res. Lett.*, 1997, Vol. 24, No. 18, pp. 2283–2286. DOI: 10.1029/97GL02273.
16. Rama Rao P.V.S., Gopi Krishna S., Vara Prasad J., Prasad S.N.V.S., Prasad D.S.V.V.D., Niranjan K., Geomagnetic storm effects on GPS based navigation, *Ann. Geophys.*, 2009, Vol. 27, pp. 2101–2110. DOI: 10.5194/an-geo-27-2101-2009.
17. Skone S., de Jong M., The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance, *Earth, Planets and Space*, 2000, Vol. 52, pp. 1067–1071. DOI: 10.1186/BF03352332.
18. Stankov S.M., Jakowski N., Tsybulya K., Wilken V., Monitoring the generation and propagation of ionospheric disturbances and effects on Global Navigation Satellite System positioning, *Radio Sci.*, 2006, Vol. 41, RS6S09. DOI: 10.1029/2005RS003327.
19. Voeykov S.V., Berngardt O.I., Shestakov N.V., Use of the index of TEC vertical variation disturbance in studying ionospheric effects of the Chelyabinsk meteorite, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2016, Vol. 56, No 2, pp. 219–228. DOI: 10.1134/S0016793216020122.
20. Yeh K.C., Liu C.H., Radio wave scintillations in the ionosphere, *Proc. IEEE*, 1982, Vol. 70, No. 4, pp. 24–64. DOI: 10.1109/PROC.1982.12313.
21. Zakharov V.I., Yasyukevich Yu.V., Titova M.A., Effect of magnetic storms and substorms on GPS slips at high latitudes, *Cosmic Research*, 2016, Vol. 54, Issue 1, pp. 20–30. DOI: 10.1134/S0010952516010147.