

## ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ КОДОВЫХ ЗАДЕРЖЕК В КАНАЛАХ ГЛОНАСС И GPS

Ю.В. Ясюкевич<sup>1,2</sup>, А.А. Мыльникова<sup>1</sup>, В.Е. Куницын<sup>1,3</sup>, А.М. Падохин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

С помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) можно определять полное электронное содержание в ионосфере (ПЭС) [1]. ПЭС может определяться с использованием двухчастотных кодовых и фазовых измерений псевдодальности. Фазовые измерения слабо зашумлены, однако они являются относительными вследствие неоднозначности определения начальной фазы. Кодовые измерения являются абсолютными, однако, отличаются высоким уровнем шума - вплоть до сотен процентов на низких углах места [2]. Фазовые измерения ПЭС используются для большого числа исследовательских задач [3]. В то же время, как правило, для прикладных задач требуется знание абсолютных величин ПЭС.

При определении абсолютного ПЭС с использованием одновременно групповых и фазовых измерений [4], возникает систематическая ошибка, обусловленная различием времени распространения сигнала разных частот в радиочастотных трактах приемо-передающего оборудования. В литературе такая ошибка получила название дифференциальных кодовых задержек (ДКЗ, DCB – Differential code bias). Вследствие ДКЗ ПЭС может принимать, в том числе и отрицательные нефизические значения [5, 6].

Простейшим методом устранения ДКЗ приемника могла бы стать его однократная калибровка. Однако ДКЗ в целом является изменяющейся со временем величиной. В настоящей работе мы анализируем, насколько существенно происходит изменение этой величины со временем. Также предлагается альтернативный алгоритм для определения ДКЗ отдельной станции.

Нами был проведен анализ динамики ДКЗ в частотных каналах спутников и приемников (и связанной с ДКЗ ошибкой ПЭС) за период с 2000 по 2014 год. Для оценки были использованы данные лаборатории CODE (<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>), получаемые при анализе данных распределенной по миру сети станций.

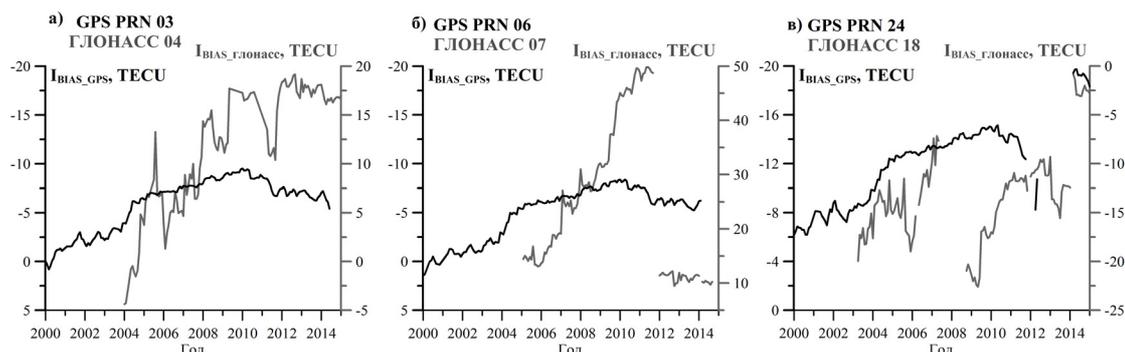
Пример динамики ошибки ПЭС, связанной с ДКЗ, для трех пар спутников ГЛОНАСС (серые кривые) и GPS (черные кривые) приведен на рис. 1. Шкала слева – для GPS, справа – для ГЛОНАСС. Для большей наглядности шкала для спутников GPS инвертирована.

Из рис. 1 можно видеть, что имеет место систематическое изменение ДКЗ ~1 TECU/год. Для ГЛОНАСС изменения ДКЗ более значительны ~3 TECU/год. Кроме того, в отдельных случаях наблюдаются значительные изменения ДКЗ. Резкое изменение для спутников ГЛОНАСС 07 и 18 связано с заменой спутника.

Надо отметить, что разделение ДКЗ на ДКЗ спутников и ДКЗ станций является достаточно условным. Без непосредственных калибровочных измерений установить это точно не представляется возможным. С целью разделения используют «условие нулевого среднего» (zero-mean condition) [7], предполагающее, что суммарные ДКЗ по всей орбитальной группировке ГЛОНАСС (и GPS) равны нулю. В целом такое условие вполне допустимо, т.к. при корректировке ПЭС необходимо использовать сумму ДКЗ спутника и приемника. Безусловно, что при запуске новых спутников вследствие этого условия все ДКЗ будут переоценены. Изменение составляет величину реальных ДКЗ спутника деленную на общее число спутников в группировке. В общей динамике запуск новых спутников может приводить к резкому смещению ДКЗ всех спутников на величину до 1.5 TECU.

Стоит отметить, что для ГЛОНАСС наблюдаются значительные вариации ДКЗ превышающие общее систематическое изменение с амплитудой ~5 TECU. Для спутников GPS вариации с характерными периодами ~года в разы меньше.

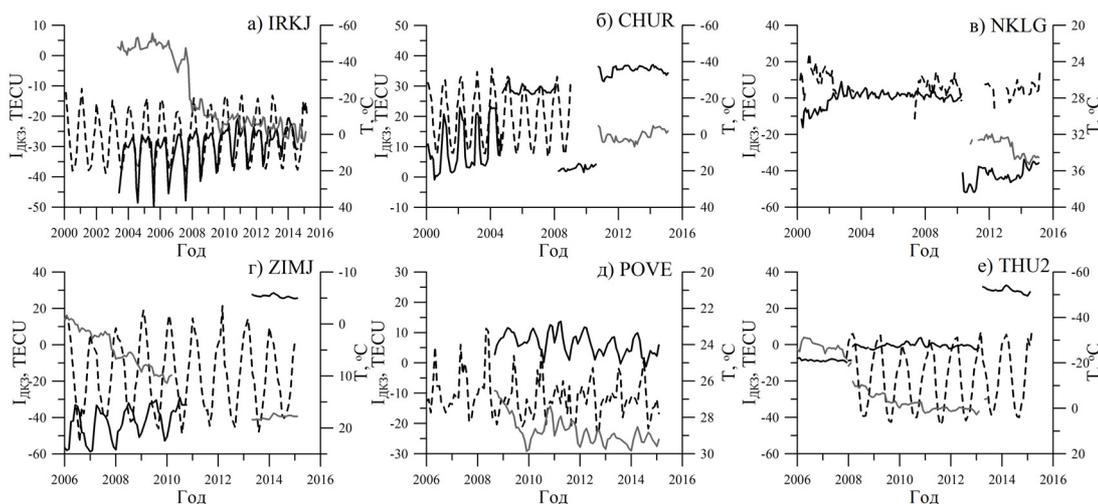
Нами был проведен также анализ динамики ДКЗ в частотных каналах приемников (и связанной с ДКЗ ошибкой ПЭС) за период с 2000 по 2014 год. Использовались данные лаборатории CODE, для 270 станций входящих в состав сети IGS [8]. Для 6 из них на рис. 1 представлена динамика ДКЗ для каналов GPS (черные кривые) и ГЛОНАСС (серые кривые). Наименование станции указано на панели. Пунктирной кривой на всех панелях приведена температура в районе станции (<http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/>).



**Рисунок 1.** Динамика дифференциальных кодовых задержек спутников GPS (черные кривые) и ГЛОНАСС (серые кривые). Номера спутников указаны на панелях.

Станции расположены в высоких, средних и экваториальных широтах. В целом можно сказать, что ДКЗ в каналах ГЛОНАСС могут достигать  $\sim 50$  TECU ( $\sim 17.5$  нс), в каналах GPS – 60 TECU (21 нс). Полученные результаты в целом согласуются с результатами в работе [9], где получены оценки ДКЗ в 20 нс для каналов приемников.

На рис. 2 представлены станции, для которых наблюдаются значительные сезонные вариации ДКЗ. Такие вариации наблюдались только для 6 станций из общего набора из 270 станций. Можно видеть, что для станции IRKJ (Рис. 2а), CHUR (Рис. 2б), ZIMJ (Рис. 2г) амплитуда сезонных вариаций ДКЗ для каналов GPS составляет  $\sim 20$  TECU ( $\sim 7$  нс), для станции POVE (Рис. 2д) –  $\sim 10$  TECU ( $\sim 3.5$  нс).



**Рисунок 2.** Динамика ДКЗ для приемников в каналах ГЛОНАСС (серые сплошные кривые) и GPS (черные сплошные кривые). Пунктиром отмечена температура в регионе станции ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Такие значительные вариации могут быть связаны с изменениями параметров окружающей среды приемника, такими как температура или влажность. Маловероятно, чтобы это были непосредственно проблемы оборудования, так как такие вариации присущи различному типу оборудования, и не связаны с конкретным типом приемных устройств.

Можно видеть (см. рис. 2а, б, г, д), что сезонные вариации температуры хорошо согласуются с сезонными вариациями ДКЗ в каналах GPS. Для станций IRKJ и CHUR максимум сезонных вариаций ДКЗ соответствует минимуму сезонных вариаций температуры. Для ZIMJ и POVE - вариации синфазны.

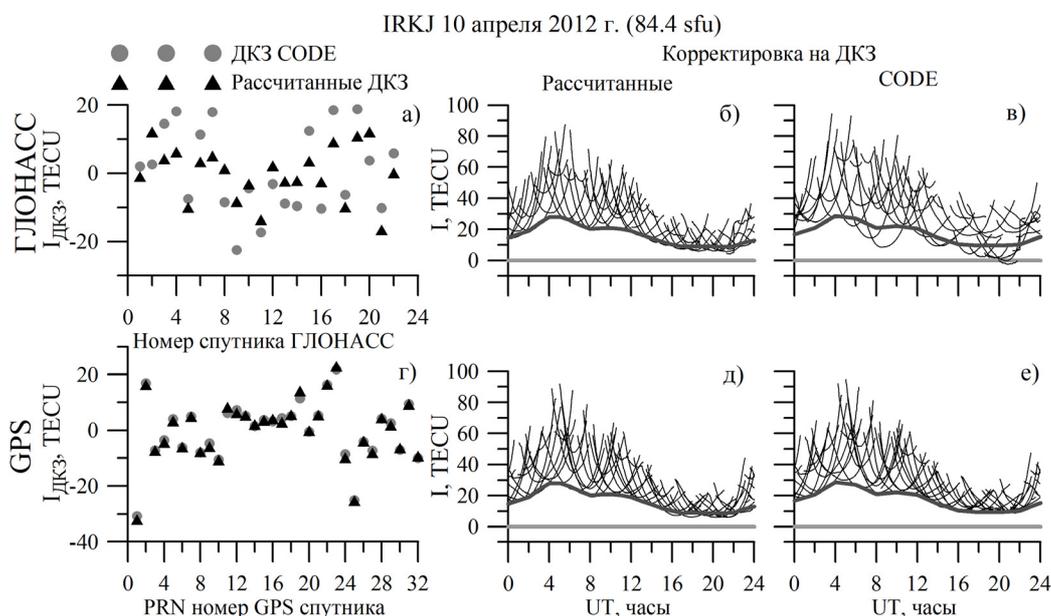
В целом можно сказать, что из-за систематического изменения ДКЗ, невозможно на длительный срок откалибровать приемник, для определения абсолютного ПЭС. Требуется регулярная оценка погрешности определения абсолютного ПЭС, связанной с ДКЗ.

Для определения абсолютного ПЭС и ДКЗ по данным отдельной станции GPS/ГЛОНАСС был разработан алгоритм, основанный на простой модели разложения абсолютного вертикального ПЭС в точке над станцией в ряд Тэйлора, до второго порядка, по пространству и времени [10].

На рис. 3, представлено сравнение ДКЗ в аппаратуре спутников (а, г), полученных описанным выше алгоритмом (обозначены черными треугольниками) и этих значений, публикуемых CODE (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>) (серые кружочки). Результаты получены за 11 апреля 2012 года

по GPS и GLONASS данным для отдельной среднеширотной станции IRKJ ( $\phi = 52.2^\circ \text{ N}$ ,  $l=104.3^\circ \text{ E}$ ), входящей в сеть IGS (International GNSS Service (<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/>)) [8]). Также на рис. 3 представлены результаты корректировки исходного наклонного ПЭС для каждого спутника с учетом ДКЗ, полученных приведенным выше алгоритмом (б, д) и данных CODE (в, е). Жирной линией показана динамика абсолютного вертикального ПЭС, полученная с помощью описанного алгоритма, для станции IRKJ (средний столбец) и данные абсолютного вертикального ПЭС CODE (правый столбец). Исходные значения ПЭС до корректировки принимали высокие нефизические значения. Это обусловлено высоким значением ДКЗ. После корректировки по данным CODE появляются отрицательные нефизические значения ПЭС в данных ГЛОНАСС, что указывает на переоценку значения ДКЗ CODE. Полученные по разработанному алгоритму [10] значения ПЭС являются физически более правдоподобными.

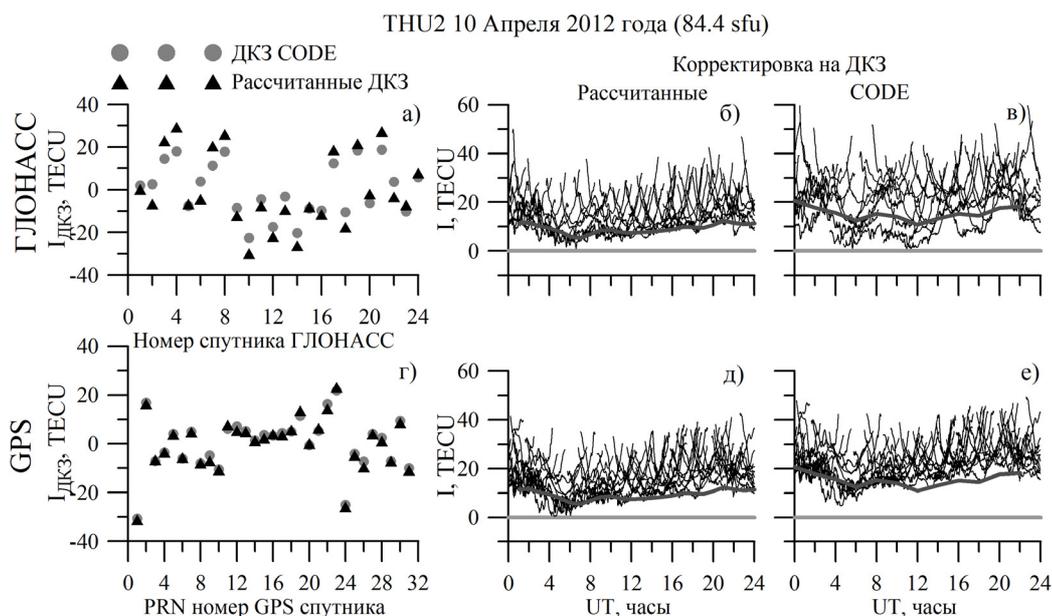
На рис. 4, представлено сравнение ДКЗ в аппаратуре спутников (а, г) с данными CODE и результаты корректировки исходного наклонного ПЭС для каждого спутника с учетом ДКЗ, полученных разработанным алгоритмом (б, д) и данных CODE (в, е), для отдельной высокоширотной станции THU2 ( $\phi = 76.5^\circ \text{ N}$ ,  $l=-70^\circ \text{ W}$ ). После корректировки на данные ДКЗ CODE в рядах наклонного ПЭС спутников ГЛОНАСС остаются нулевые нефизические значения. Кроме того, имеется сильный разброс минимумов рядов ПЭС, полученных по отдельным спутникам. При правильной коррекции минимум должен приходиться в области значения вертикального ПЭС. Незначительные же отличия могут быть связаны с градиентами электронной концентрации.



**Рисунок 3.** а), г) – ДКЗ полученные описанным выше алгоритмом (черные треугольники) и публикуемая CODE (серые кружки) для всех спутников ГЛОНАСС (а) и GPS (г) наблюдаемых на среднеширотной станции IRKJ. б), в), д), е) – Вариации ПЭС для всех спутников скорректированные на ДКЗ, полученные на основе приведенного выше алгоритма (б, д), скорректированные на ДКЗ по данным лаборатории CODE (в, е). Жирная линия – вертикальное ПЭС, полученное с помощью описанного алгоритма (б, д) и данные абсолютного вертикального ПЭС CODE (в, е).

Проведенный анализ показал, что имеет место значительное систематическое изменение ДКЗ в каналах спутников и приемников. В нескольких случаях были зарегистрированы сильные сезонные вариации с амплитудой до  $\sim 20$  TECU. Сезонные вариации ДКЗ в каналах GPS хорошо соотносятся с сезонными вариациями температуры. В целом можно сказать, что из-за систематического изменения ДКЗ, невозможно на длительный срок откалибровать приемник, для определения абсолютного ПЭС. Требуется многократная калибровка приемников измерительной сети в процессе мониторинга. Это возможно выполнить на основании обязательной регулярной оценки по представленному алгоритму, результаты работы которого в целом согласуются с оценками, проведенными по другим алгоритмам, и позволяют получать правдоподобные с физической точки зрения результаты. Использование представленного алгоритма возможно для станций, расположенных в различных регионах земного шара, а также для различного уровня солнечной активности.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (МК-2670.2014.5), и частично при поддержке гранта РФФИ (14-35-50751\_мол\_нр).



**Рисунок 4.** То же что на рис. 3, для высокоширотной станции THU2 (-70 W, 76.5 N).

### Список литературы

1. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
2. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. - 336 с.
3. Afraymovich E, Astafyeva E, Demyanov V, Edemskiy I, Gavriluyuk N, et al.: A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena // *J. Space Weather Space Clim.* 2013. V. 3. A27.
4. Татаринов П.В., Ясюкевич Ю.В., Косоголов Е.А. Определение абсолютного значения полного электронного содержания по данным ГЛОНАСС // *Труды конференции XII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Международная Байкальская молодежная школа по фундаментальной физике.* 19-24 сентября 2011 г., Иркутск, Россия, 2011. С. 255-257.
5. Ясюкевич Ю.В., Перевалова Н.П., Демьянов В.В., Едемский И.К., Маркидонова А.А. Исследование околоземного космического пространства с использованием глобальных навигационных спутниковых систем // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева.* 2013. № 6. С. 94-100.
6. A.A. Mylnikova, Yu.V. Yasyukevich, V.E. Kunitsyn, A.M. Padokhin. Variability of GPS/GLONASS differential code biases // *Results in Physics.* 2015. V. 5. P. 9–10.
7. Z. Li, Y. Yuan, H. Li, J. Ou, X. Hou. Two-step method for the determination of the differential code biases of COMPASS satellites // *J Geodesy.* 2012. V. 86, N 11. P. 1059–76.
8. J.M. Dow, R.E. Neilan, C. Rizos. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // *Journal of Geodesy.* 2009. V. 83. N 3-4. P.191-198. DOI: 10.1007.
9. S. Schaer. Overview of GNSS biases // International GNSS Service. Workshop on GNSS Biases. 2012. [http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12\\_1.3.1.pdf](http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12_1.3.1.pdf).
10. Yu.V. Yasyukevich, A.A. Mylnikova, A.S. Polyakova. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data // *Results in Physics.* 2015. V. 5. P. 32–33.