

**ВТОРАЯ ПРОИЗВОДНАЯ ФАЗЫ ПО ВРЕМЕНИ  
КАК ИНДИКАТОР ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ИОНОСФЕРЫ**

<sup>1</sup>Т.В. Кашкина, <sup>1</sup>В.В. Демьянов, <sup>2</sup>Ю.В. Ясюкевич

**THE SECOND TIME DERIVATIVE OF PHASE AS AN INDICATOR  
OF THE IONOSPHERE FINE STRUCTURE**

<sup>1</sup>T.V. Kashkina, <sup>1</sup>V.V. Dem'yanov, <sup>2</sup>Yu.V. Yasyukevich

Выполнен сравнительный анализ измерений фазы несущей сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS. Выявлен эффект нестационарных изменений второй производной фазы несущей по времени для сигналов GPS и ГЛОНАСС. Выдвинуто предложение о возможности использования второй производной фазы несущей трансionoсферных сигналов как высокочувствительного параметра для детектирования слабых мелкомасштабных возмущений ионосферы.

A comparative analysis of GPS and GLONASS signal phase measurements was provided here. Non-stationary signal phase acceleration variations were observed for both GPS and GLONASS signals. We suppose, that the signal phase acceleration variations can be used as an index which is sense to weak ionospheric disturbances.

Построение высокоэффективной системы оповещения о землетрясениях, цунами и техногенных явлениях по ионосферному отклику требует повышения чувствительности методов ионосферного радиозондирования. В настоящее время используются двух- или многочастотные измерения фазы несущей, комбинация которых позволяет реконструировать текущие значения полного электронного содержания (ПЭС) вдоль линии визирования на спутник. Однако текущие значения ПЭС не позволяют проводить измерения слабых ионосферных откликов. Для восстановления тонкой структуры ионосферы предлагается использование методов ионосферной томографии на основе измерений на густой сети наземных GNSS-станций. Этот метод может дать хорошие результаты, но требует высокого пространственного разрешения наземной сети станций, что далеко не всегда достижимо. Кроме этого в качестве общепризнанных индикаторов текущего состояния ионосферы, которые можно непосредственно вычислить на основании измерения параметров сигналов GNSS, широко используются величины индекса амплитудных и фазовых мерцаний (S4 и  $\sigma_f$ , соответственно). Однако, вычисление указанных индексов предполагает использование процедур усреднения мгновенных значений параметров трансionoсферных сигналов, что тоже ухудшает их чувствительность к слабым ионосферным возмущениям.

Для повышения чувствительности методов трансionoсферного радиозондирования можно предложить анализ структуры сигналов спутников GNSS, которые распространяются через ионосферу. По нашему мнению, чувствительным индексом состояния тонкой структуры ионосферы может быть вторая производная фазы несущей по времени.

Чтобы подтвердить эту идею, мы провели измерительную кампанию сигналов GNSS в 2013 г. в условиях полярной ионосферы (п. Хатанга Красноярского края), где всегда присутствуют многомасштабные вариации электронной концентрации. В период со 2 по 5 декабря 2013 г. с использованием мультисистемного навигационного приемника Javad Delta-G3T с выносной антенной GrAnt-G3T [<http://javad.com/jgnss/products>] нами проведены записи рядов фазы

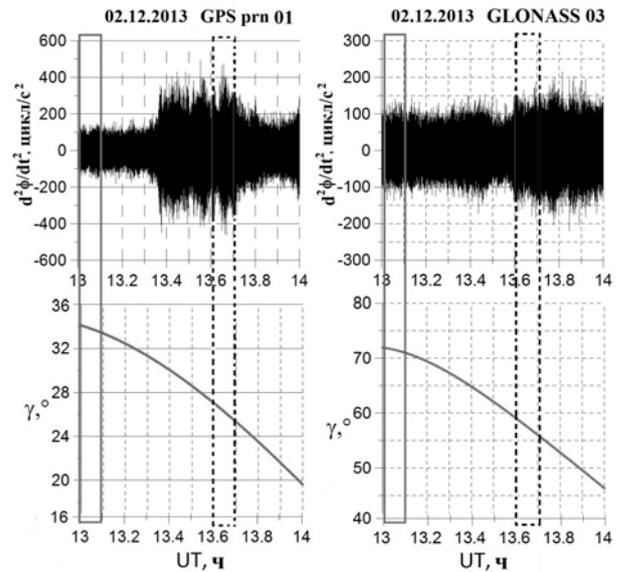


Рис. 1. Наблюдения второй производной фазы несущей по времени 02 декабря 2013 г. для спутника 01 GPS и 03 ГЛОНАСС.

несущей сигналов спутников GPS и ГЛОНАСС на двух рабочих частотах с частотой регистрации данных 50 Гц.

При анализе результатов измерений, проведенных в условиях полярной ионосферы, были обнаружены достаточно многочисленные случаи резкого кратковременного возрастания второй производной фазы несущей сигналов как GPS, так и ГЛОНАСС на величину от 30–40 % до 2–2.5 раз относительно фоновое уровня [Демьянов, 2015].

На рис. 1 приведены примеры полученных результатов 2 декабря 2013 г. для спутников GPS (левая колонка, спутник 01) и ГЛОНАСС (правая колонка, спутник 03). Здесь на верхних панелях представлены ряды второй производной фазы несущей по времени, а на нижних - значения углов возвышения спутников ( $\gamma^\circ$ ).

Отметим, что 2 декабря 2013 г. являлся геомагнитно – спокойным днем. В этот день значительных гелио-геофизических событий обнаружено не было. В отсутствие возмущающих факторов фоновые значения второй производной фазы для спутников GPS и ГЛОНАСС находятся примерно в одном диапазоне

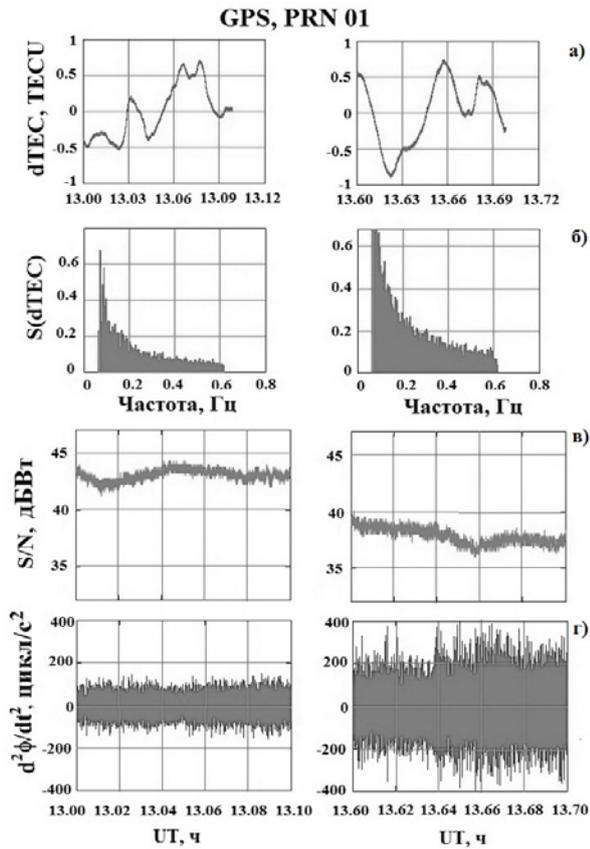


Рис. 2. Вариации второй производной фазы и отношения сигнал/шум сигналов спутников GPS в связи с изменениями в мелкомасштабной структуре ионосферы.

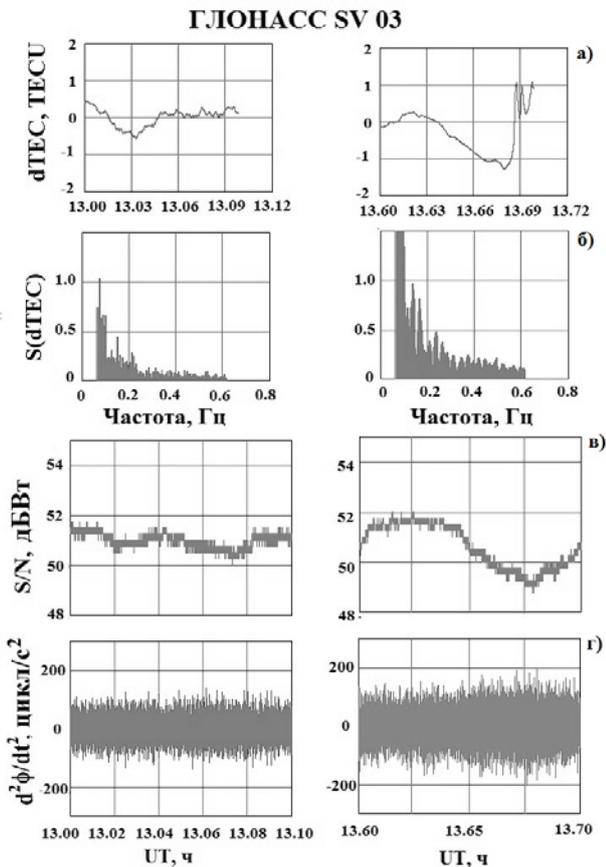


Рис. 3. Вариации второй производной фазы и отношения сигнал/шум сигналов спутников ГЛОНАСС в связи с изменениями в мелкомасштабной структуре ионосферы.

изменений от  $-150$  до  $150$  циклов/ $c^2$ . Вместе с тем, несмотря на спокойные условия в среде распространения радиоволн, на рисунке 1 можно явно выделить и периоды значительного возрастания второй производной фазы несущей (от 30 % до 2.5 раз относительно фонового уровня). Обнаруженное нами явление выражено более отчетливо в рядах наблюдений по сигналам спутников GPS и существенно слабее – для сигналов ГЛОНАСС.

Для более подробного анализа данного явления на рис. 4 выделены короткие участки наблюдений продолжительностью 6 минут для фоновых значений второй производной фазы (серый прямоугольник, сплошная линия) и для возмущений данного параметра (черный прямоугольник, пунктирная линия). На рис. 2, 3 даны развернутые данные для выделенных на рис. 1 фрагментов измерений: а) ряды ПЭС с удаленным трендом; б) часть спектра вариаций ПЭС в области частот, соответствующих мелкомасштабным возмущениям; в) ряды отношений сигнал/шум (дБВт) на первой рабочей частоте GPS (ГЛОНАСС); г) ряды второй производной фазы несущей (цикл/ $c^2$ ). Слева на каждом рисунке размещены панели, соответствующие невозмущенным значениям второй производной фазы, а справа – для периодов, содержащих возмущения данного параметра.

Ряды ПЭС с удаленным трендом (рис. 2, 3, а) не показывают заметных мелкомасштабных возмущений. Однако спектральный анализ позволяет выделить из этих рядов составляющие высокочастотных слабых вариаций ПЭС, образованных вследствие влияния мелкомасштабных неоднородностей ЭК. Из рис. 2, 3 (панели б, г) можно видеть очевидную положительную корреляцию между возрастанием второй производной фазы и ростом составляющих спектра вариаций ПЭС в диапазоне частот 0.08–0.6 Гц. Этот диапазон частот, соответствует области действия мелкомасштабных ионосферных неоднородностей с размерами от сотен метров до единиц км. В эти же промежутки времени отмечается и снижение отношения сигнал/шум (рис. 2, 3, в). В целом картина говорит в пользу предположения, что указанное явление вызвано рассеянием сигналов или хаотической рефракцией на мелкомасштабных структурах в ионосфере.

С другой стороны в работе [Benton, Mitchell, 2014] указано, что подобного рода вариации фазы несущей могут быть вызваны кратковременным дрейфом частоты опорного генератора на некоторых спутниках GPS. Чтобы отделить такие явления от собственно ионосферных мерцаний фазы, требуется провести одновременные измерения сигналов одного и того же спутника на нескольких наземных станциях, взаимное удаление которых исключает прохождение сигнала спутника через одни и те же области ионосферы. С этой целью мы провели измерительную кампанию одновременных измерений фазы сигналов GPS и ГЛОНАСС в трех пунктах: Москва ( $55^\circ$  N,  $37^\circ$  E), Иркутск ( $52^\circ$  N,  $104^\circ$  E) и Норильск ( $69^\circ$  N,  $88^\circ$  E).

В период со 26 по 27 ноября 2014 г. нами проведены записи рядов фазы несущей сигналов спутников

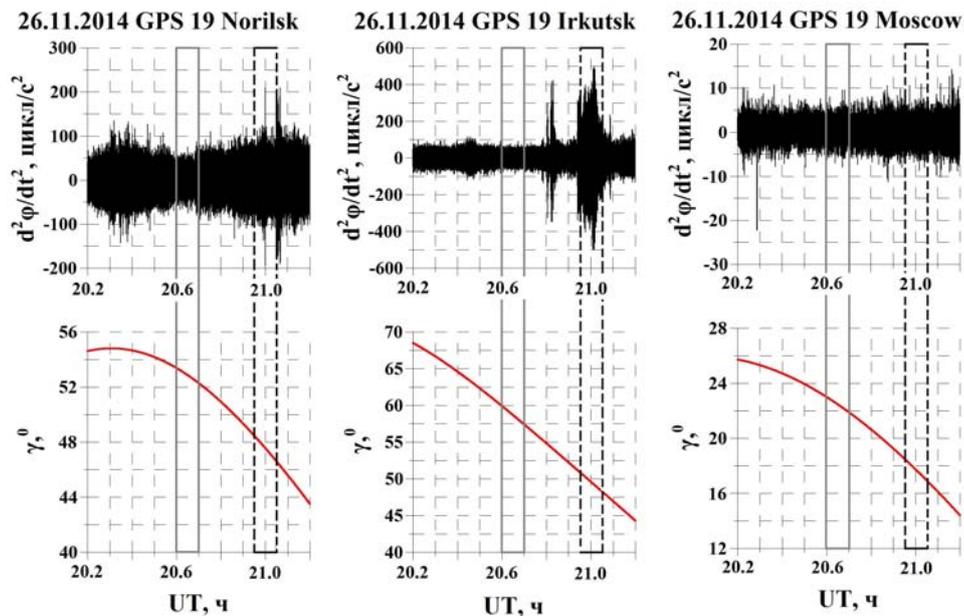


Рис. 4. Наблюдения второй производной фазы 26 ноября 2014 г. для спутника 19 GPS.

GPS и ГЛОНАСС на двух рабочих частотах с частотой регистрации данных 50 Гц. На рис. 4 в качестве примера представлены результаты наблюдений 26 ноября 2014 г. для спутника 19 GPS на первой рабочей частоте.

Если бы наблюдаемые нами случаи нестационарных вариаций второй производной фазы были обусловлены дрейфом частоты опорного генератора спутника, то они наблюдались бы одновременно на всех трех удаленных друг от друга пунктах. Однако, мы видим, что рост второй производной фазы несущей по времени не наблюдается для одного и того же спутника одновременно и, следовательно, это явление не связано с кратковременным дрейфом частоты опорного генератора. Поэтому, в силу сказанного выше, можно предположить наличие связи между нестационарными изменениями второй производной фазы несущей и мелкомасштабными неоднородностями ЭК в ионосфере.

Важно отметить также, что данные результаты были получены в ходе проведения экспериментальных наблюдений в условиях невозмущенной среды распространения радиоволн. Однако даже в этом случае можно наблюдать нестационарные изменения второй производной фазы несущей сигналов спутников GPS. Это говорит о высокой чувстви-

тельности данного параметра к изменениям в мелкомасштабной структуре ионосферы. Поэтому вторую производную фазы несущей трансionoсферных сигналов, измеряемую на наземной сети пунктов мониторинга, можно рекомендовать как индикатор тонкой структуры ионосферы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-05-03946.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Benton C.J., Mitchell C.N. Further observations of GPS satellite oscillator anomalies mimicking ionospheric phase scintillation / GPS Solut. 2014. 18:387–391.

Наблюдения нестационарных вариаций ускорения фазы несущей трансionoсферных сигналов навигационных спутников / В.В. Демьянов, Ю.В. Ясюкевич, Т.В. Кашкина, И.Ф. Гамаюнов // Теория и техника радиосвязи. 2015. № 1. С. 28–37.

Официальный сайт JAVAD [Электронный ресурс] // Мультисистемный навигационный приемник Javad Delta-G3T: [сайт]. [2014]. URL: <http://javad.com/jgnss/products> (дата обращения: 28.08.2014).

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия