

С. Р. Щекин, Ф. В. Кивва, В. Н. Горобец, А. Л. Коворотный
Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: sergey_shchekin@ukr.net

О ВЛИЯНИИ КАНАЛА СВЯЗИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОСИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ В ХАРЬКОВСКОМ РЕГИОНЕ

В статье представлены результаты систематических измерений точности позиционирования стационарных навигационных пунктов, координаты которых известны, оборудованных одно- и двухчастотным навигационными приемниками систем GPS и ГЛОНАСС. Особое внимание уделено параметрам окружающей среды, обусловленным дождями, в том числе летними грозовыми, снегом, туманом и облачностью. Проведены экспериментальные исследования флуктуаций зенитной тропосферной задержки и пространственных координат приемных пунктов, расположенных на расстоянии 5,8 км. Выполнена оценка факторов, ограничивающих предельно достижимую точность позиционирования. Результаты работы актуальны для задач оперативного прогнозирования метеорологических явлений и исследования их физических свойств. Ил. 9. Табл. 1. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: распространение радиоволн, мониторинг атмосферы, GPS, зенитная тропосферная задержка, дистанционное зондирование, точность позиционирования, радиосигналы глобальных навигационных спутниковых систем.

Известно, что сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) можно использовать для исследования процессов, происходящих в земной атмосфере. Особый интерес вызывают явления, сопровождающиеся изменениями рефракционных, многолучевых и турбулентных свойств атмосферы, приводящих к ухудшению точностных характеристик навигационного оборудования. Для повышения робастности навигационной аппаратуры и минимизации влияния среды на распространение радиоволн (РРВ) актуальной является задача количественной оценки влияния канала связи на характеристики сигналов навигационных искусственных спутников Земли (ИСЗ).

Результаты исследований, проведенных над сушей, морем и океаном в различных географических и климатических условиях, опубликованы в работах [1–7]. Так, в [1–4] приводится анализ точности позиционирования и определения зенитной тропосферной задержки (*ZTD – Zenith Tropospheric Delay*) на основе данных двухчастотных GPS-приемников в зависимости от различных состояний атмосферы. Анализируются данные навигационных и метеорологических наблюдений. По исследованиям [5] установлена возможность применения *ZTD* для прогнозирования высокоинтенсивных дождевых осадков. В работах [6–7] рассматривается использование GPS в качестве средства дистанционного мониторинга влагосодержания тропосферы. Несмотря на обилие исследований, посвященных проблеме влияния среды на распространение сигналов ГНСС, количественных характеристик и результатов сравнительного анализа отдельных классов метеорологических явлений с точки зрения их влияния на РРВ представлено недостаточно.

В предлагаемой работе рассмотрены результаты систематических измерений характерис-

тик некоторых классов нестационарных процессов, наблюдаемых в среднеширотной тропосфере и связанных с аномалиями влажности. Индикатором состояния среды выбрана *ZTD*, определяющая рефракцию сигнала, его отражение от инверсионных образований и рассеяние на турбулентных неоднородностях, порождающих многолучевое распространение радиоволн и, соответственно, флуктуации координат навигационных объектов.

Принцип определения *ZTD* предполагает использование данных наблюдений сигналов спутников GPS и ГЛОНАСС посредством одно- и двухчастотных навигационных приемников, расположенных в стационарном пункте, размещенных на нескольких стационарных базовых станциях или установленных на движущихся носителях. Для минимизации влияния ионосферы из фазового навигационного уравнения исключается ионосферная задержка [8]. Результирующая тропосферная задержка состоит из гидростатической (*ZHD – Zenith Hydrostatic Delay*) и влажной компонент (*ZWD – Zenith Wet Delay*). Для получения значения *ZTD* используются точные орбиты и поправки часов спутников. Влияние фактора многолучевости ослабляется увеличением угла визирования спутников по высоте. Вычисление *ZTD* осуществляется в ходе решения стандартной навигационной задачи по алгоритму точечного позиционирования (*PPP – Precise Point Positioning*) [9].

1. Методика измерений и вычисления навигационных параметров. Для решения задачи оценки влияния метеорологических явлений на распространение радиосигналов спутниковых ИСЗ использовались данные систематических измерений на трех стационарных измерительных пунктах, схема размещения которых приведена на рис. 1.

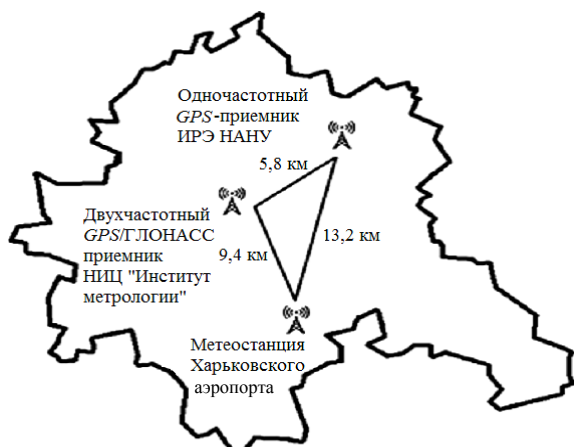


Рис. 1. Пространственное расположение измерительных метеорологических и навигационных станций (г. Харьков)

При проведении экспериментальных исследований применялось оборудование:

- одночастотный GPS-приемник фирмы Trimble, расположенный в Институте радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова (широта – $50^{\circ}2'46,17''\text{C}$, долгота – $36^{\circ}17'23,12''\text{B}$);
- двухчастотный навигационный приемник GPS/GLONASS фирмы Trimble марки NovaRS, расположенный в НИЦ «Институт метрологии» (KHAR), входящий в состав международной сети перманентных базовых станций SOPAC [10] (широта – $50^{\circ}0'18,37''\text{C}$, долгота – $36^{\circ}14'20,44''\text{B}$);
- метеостанция Харьковского аэропорта (UKHN). Координаты: широта – $49^{\circ}55'37,20''\text{C}$, долгота – $36^{\circ}17'24,00''\text{B}$.

Данные метеорологической станции использовались для определения времени прохождения метеоявлений; по данным навигационных приемников вычислялась ZTD и оценивались изменения рефракционных свойств среды распространения. Согласование статистических выборок по времени производилось на основе процедуры полиномиальной интерполяции. Всего в обработке использовались 26 280 часов ежесекундных наблюдений. Общая длина статистического ряда составила 3 миллиона точек.

Вычисление ZTD по данным двухчастотного навигационного приемника проводилось на базе специализированного программного комплекса GIPSY OASIS Software 6.4. В основе принципа вычисления ZTD в данном программном комплексе лежит использование псевдодальностей до спутников GPS и ГЛОНАСС, измеренных навигационным приемником на двух рабочих частотах [11]. Для минимизации влияния многолучевости применялся режим приема радиосигналов при угле визирования спутников более 15° . Влияние ионосферы исключалось с использованием ионосферно-свободных комбинаций псевдодальностей [8].

Итоговые распределения тропосферной задержки формировались исходя из последовательных вычислений значений ZTD для каждого независимого наблюдения по известному алгоритму [8], суть которого сводится к следующему. Зенитная тропосферная задержка радиосигнала определяется путем интегрирования ее отдельных компонент, распределенных вдоль пути распространения. Согласно [8], ZTD может быть представлена в виде суммы составляющих сухого воздуха и водяного пара, пересчитанных в направлении зенита [12]:

$$ZTD = f_{\text{возд.}} \cdot 10^{-6} \int_l N_{\text{возд.}} dl + f_{\text{вод.пар.}} \cdot 10^{-6} \int_l N_{\text{вод.пар.}} dl, \quad (1)$$

$$N_{\text{возд.}} = 77,64 \frac{p}{T} \left[\frac{\text{K}}{\text{мбар}} \right],$$

$$N_{\text{вод.пар.}} = -12,96 \frac{e}{T} \left[\frac{\text{K}}{\text{мбар}} \right] + 3,718 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \left[\frac{\text{K}^2}{\text{мбар}} \right],$$

где $N_{\text{возд.}}$ – коэффициент преломления радиоволн в сухом воздухе; $N_{\text{вод.пар.}}$ – коэффициент преломления радиоволн в водяном паре; $f_{\text{возд.}}$ и $f_{\text{вод.пар.}}$ – функции пересчета наклонных тропосферных задержек в направлении зенита для сухого воздуха и водяного пара соответственно.

В уравнении (1) первое слагаемое определяет ZHD, а второе – ZWD. Задержка радиосигналов при распространении в зенитном направлении записывается в виде суммы гидро-статической и влажной компонент [12]:

$$ZTD = ZHD + ZWD. \quad (2)$$

При решении задачи точечного позиционирования проводится оценка ZTD с использованием модели Saastamoinen [13]:

$$ZTD = \frac{0,02277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - \text{tg}^2 z \right], \quad (3)$$

где p и e – соответственно атмосферное и парциальное давление водяного пара в миллибарах; T – температура воздуха в градусах Кельвина; ZTD – тропосферная задержка в метрах; z – угол визирования спутника.

Для решения уравнения (3) используются метеорологические параметры, вычисленные по модели стандартной атмосферы. Практические исследования [12] показали, что 90 % задержки радиоволн в тропосфере приходится на сухую компоненту, входящую в уравнение (2), а 10 % – на влажную. Влажная компонента подвержена

влиянию быстроизменяющихся и географически локализованных метеорологических явлений, являющихся источником погрешностей для систем наземного позиционирования.

Сухая компонента ZTD моделируется с минимальной погрешностью с использованием данных о приземном давлении и температуре. Влажная компонента имеет случайную природу и моделируется на базе метеопараметров с низкой точностью.

2. Представление результатов навигационных и метеорологических измерений. При проведении исследований использовалась классификация метеорологических явлений, принятая Международной организацией гражданской авиации [14] и используемая современными метеостанциями, расположенными вблизи аэропортов. Данная классификация берется за основу при формировании метеорологических сообщений для авиации и служб спасения. Перечень исследованных классов метеоявлений приведен в таблице.

Статистика наблюдений метеоявлений

Классы метеоявлений	№ набл. / увеличение ZTD , см				
	1	2	3	4	5
Дождь	6,9	5,2	5,9	6,77	6,6
Снег	2,64	2,63	2,46	1,68	2,1
Туман	3,07	3,01	3,1	3,56	3,5
Дождь с грозой	8,22	8,8	8,36	8,73	7,87
Облачно	3,51	3,2	3,56	4,8	3,7
Ясно	0,73	1,02	1,08	1,10	0,92

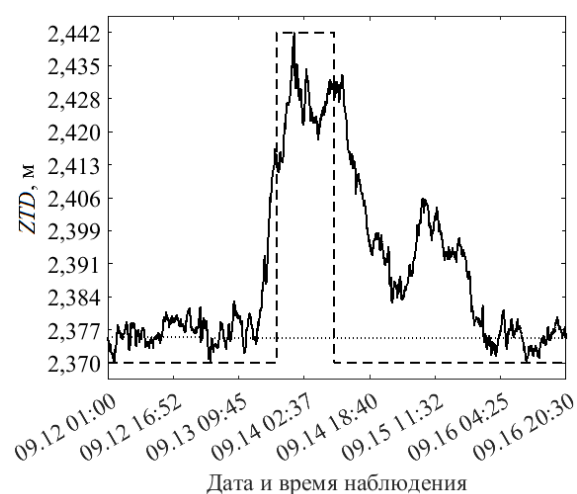
Для каждого класса подобраны выборки из пяти навигационных и метеорологических наблюдений. При их формировании учитывались периоды непосредственного прохождения метеоявлений и установившиеся периоды, наблюдавшиеся «до» и «после» них. Рассматривались метеоявления, длительность которых по данным метеостанции составляла не менее 3 часов. Исключением были случаи ясной погоды, рассматривавшиеся на суточном интервале. Для определения интервалов прохождения атмосферных явлений использовались данные метеостанции, удаленной от двухчастотного приемника на 9,4 км, а от одночастотного приемника – на 13,2 км. Использовать результаты наблюдений менее удаленных метеорологических станций не было возможности.

Такой подход позволил произвести количественную оценку влияния выбранных классов

метеоявлений (таблица) на изменение задержки радиосигналов при распространении через тропосферу. Вычисление трендовых компонент для анализируемых интервалов наблюдений позволило определить отклонение ZTD от уровня тренда в момент прохождения метеоявлений. Трендовые уровни формировались как линейные аппроксимации полиномом первой степени установившихся периодов до и после метеоявлений.

Результаты анализа статистических данных представлены в таблице. Для каждого зафиксированного метеоявления приведен показатель увеличения ZTD относительно трендовой компоненты. Вычисление ZTD проводилось на базе программного комплекса *GIPSY OASIS Software 6.4* по данным двухчастотных навигационных наблюдений спутников *GPS* и *ГЛОНАСС*.

Изменение ZTD во времени при прохождении дождя представлено на рис. 2 (сплошная черная линия). Данное метеоявление рассматривалось на временном интервале с 01:00 12.09.2015 до 20:30 16.09.2015. На метеостанции дождь зарегистрирован с 19:00 13.09.2015 до 10:00 14.09.2015, что отмечено пунктирной линией. Точечной линией обозначена трендовая компонента ZTD на интервале наблюдения.

Рис. 2. Изменение ZTD во время дождя

Как видно из рис. 2, во время дождя значение зенитной тропосферной задержки резко возрастает. Причиной тому является рост влагосодержания тропосферы, вызванный повышением концентрации (упругости) водяного пара в отдельных ее областях и, как следствие, изменением показателя преломления на отдельных участках среды распространения. Значение увеличения ZTD относительно уровня тренда в период выпадения дождя составило 6,7 см. Похожее изменение рефракционных свойств среды рас-

пространения были зафиксированы при рассмотрении других случаев наблюдения дождей средней интенсивности в тропосфере над Харьковским регионом (таблица).

Физическим обоснованием влияния дождя на РРВ может быть следующее. Как известно [15], дождь выпадает из дождевых облаков, насыщенных влагой в виде водяного пара и капель воды. Началу процесса конденсации способствует наличие аэрозолей и жидкой фазы воды. Для перехода водяного пара из газообразного состояния в жидкое достаточно, чтобы его концентрация в облаке была больше, чем над поверхностью капель. В этих условиях обеспечивается возможность их роста. По мере увеличения массы капли способны преодолевать давление восходящих потоков воздуха и выпадать из облаков в виде дождевых осадков. Их интенсивность и пространственно-временные характеристики варьируют в широких пределах в зависимости от мощности и влагосодержания кучево-дождевых облаков. Общее влагосодержание облака является суммарным показателем конденсированной влаги (водность) и парообразной составляющей. Согласно (1), именно компонента водяного пара определяет диапазон изменений профиля показателя преломления среды распространения и, как следствие, формирует диапазон флуктуаций тропосферной задержки.

На рис. 3 приведены изменения ZTD для случая наблюдения в тропосфере дождя с грозой. Рассмотрение данного явления проводилось на временном интервале с 18:00 19.07.2015 до 04:00 22.07.2015. На метеостанции оно регистрировалось с 17:00 20.07.2015 до 01:30 21.07.2015.

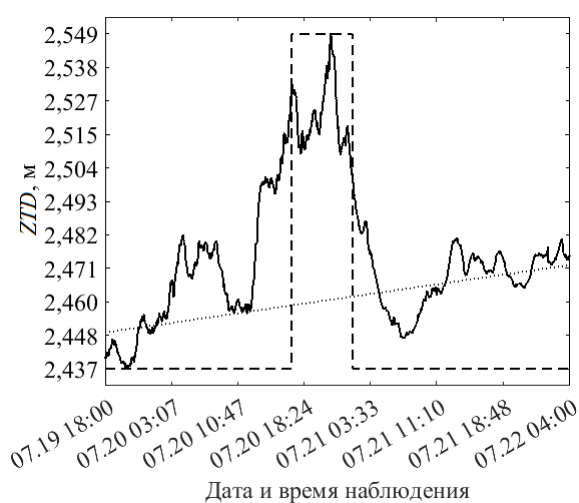


Рис. 3. Изменение ZTD во время дождя с грозой

Как видно на рис. 3, во время дождя с грозой наблюдается увеличение зенитной тропо-

сферной задержки относительно трендовой компоненты на величину 8,8 см. Такое поведение ZTD для данного класса метеоявлений объясняется повышенной водностью дождевой облачности, в которой наблюдаются грозовые явления, и их большей неоднородностью в горизонтальной плоскости.

Пример изменения ZTD в условиях охлажденной тропосферы представлен на рис. 4. Это один из рассмотренных случаев наблюдения снегопадов. Данное метеоявление анализировалось на временном интервале с 12:00 08.01.2015 до 23:59 09.01.2015. На метеостанции снегопад зарегистрирован с 10:00 09.01.2015 до 17:30 09.01.2015.

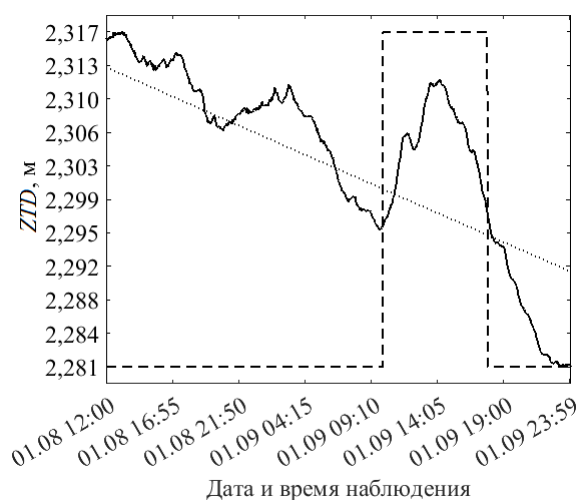


Рис. 4. Изменение ZTD при прохождении снега

Анализ выборки из пяти снегопадов показал увеличение зенитной тропосферной задержки относительно трендовой компоненты во всех случаях наблюдений на величину 1,6...2,0 см (таблица). Пример изменений ZTD во время снегопада приведен на рис. 4.

Теоретическое обоснование меньших флуктуаций ZTD во время снегопада, в сравнении с дождем или дождем с грозой, заключается в том, что влагосодержание тропосферы средних широт в зимний период года является минимальным [15]. Водяной пар в тропосфере при отрицательной температуре может сублимироваться, в результате чего образуются гидрометеоры в виде снежинок и кристаллов льда. Их выпадение в качестве осадков возможно при устойчивом росте размеров и массы гидрометеорных образований до величины, позволяющей преодолеть давление восходящего воздуха.

Зимой в тропосфере средних широт упругость водяного пара на порядок меньше, чем в летнее время года [15]. При этом его пространственное распределение проявляется меньше, чем

при положительных температурах тропосферы. Этим объясняется меньшее увеличение ZTD во время снегопада по сравнению с дождем. Также во время дождя имеет место повышение концентрации водяного пара, вызванное испарением капель в процессе выпадения, что не наблюдается при снегопаде.

Исследование влияния туманов и облачности на распространение сигналов навигационных ИСЗ показало увеличение ZTD для обоих классов метеоявлений относительно трендовых компонент на $\sim 3,5$ см (таблица). Пример изменения зенитной тропосферной задержки во время тумана, наблюдение которого проводилось на интервале с 23:59 03.12.2014 до 02:00 07.12.2015, представлен на рис. 5. Регистрация данного метеоявления на метеостанции проводилась с 18:40 04.12.2014 до 08:40 05.12.2015. Изменения ZTD для случая наблюдения облачности представлены на рис. 6.

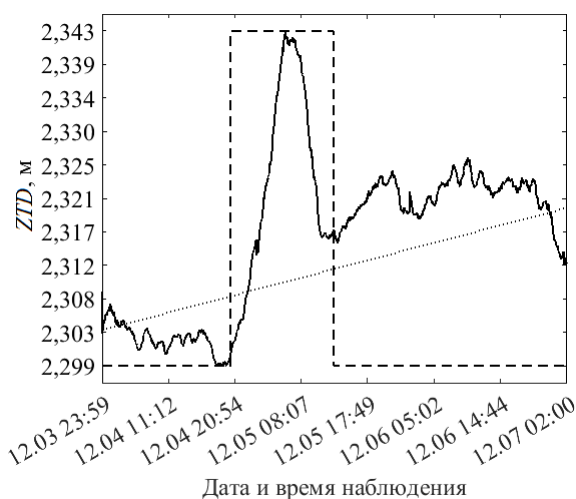


Рис. 5. Изменение ZTD во время тумана

Сравнительный анализ влияния облачности и туманов на ZTD показал, что ввиду общей природы данных классов метеорологических явлений имеют место аналогичные масштабы изменений тропосферной задержки относительно трендовых компонент.

Как видно на рис. 6, увеличение ZTD в течение двух последовательных периодов облачности, зарегистрированных на метеостанции с 06:30 2013.06.03 до 19:00 2013.06.04, относительно трендовой компоненты составляет 3,2 и 3,3 см соответственно.

Анализ статистической выборки для случаев регистрации облачности в тропосфере над Харьковским регионом показал максимальное отклонение значений ZTD от данных таблицы на

величину не более 15%. При этом локальные вариации влажной компоненты ZTD не выходили за рамки суточных максимумов. Наличие заметного тренда в ZTD на рис. 6 является следствием медленных вариаций гидростатической компоненты ZTD , вызванных рефракцией радиоволн в сухом воздухе.

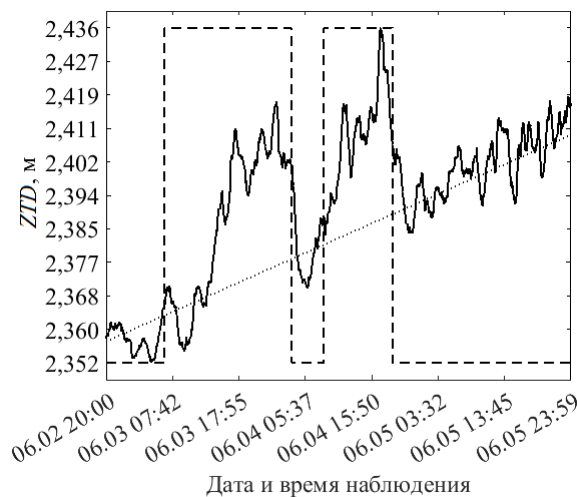


Рис. 6. Изменение ZTD во время двух последовательных периодов облачности

Объяснить влияние данных классов метеоявлений на РРВ можно следующим образом. Согласно [15], туманы и облака представляют собой систему, состоящую из медленно падающих или «взвешенных» в воздухе капель воды и ледяных кристаллов. Их возникновение определяется термодинамическими условиями тропосферы, обеспечивающими возможность конденсации (сублимации) водяного пара. Формирование облаков и туманов в среде наблюдается при охлаждении влажного воздуха в результате турбулентного обмена или адиабатического расширения при вертикальном подъеме [15]. Для такой среды характерны существенные флуктуации влажности, а следовательно, и увеличение задержки радиосигналов в процессе распространения.

Для понимания того, как ведет себя ZTD в условиях ясного неба, проведен анализ нескольких суточных наблюдений спокойного состояния тропосферы. Результаты приведены в таблице. В условиях спокойной тропосферы при ясной погоде суточный диапазон колебаний ZTD не превышает 1,1 см. При этом вариации ZTD могут быть вызваны температурным режимом подстилающей поверхности, ее неравномерным прогревом и неоднородностью пограничного слоя тропосферы в горизонтальной плоскости [16]. На рис. 7 представлено изменение ZTD в условиях ясного неба при отсутствии облачности.

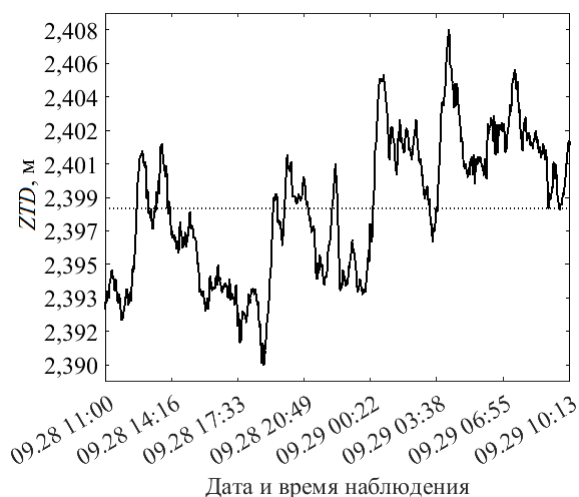


Рис. 7. Изменение ZTD в условиях ясного неба

3. Анализ данных одно- и двухчастотного приемников на примере сложного метеоявления. Для оценки влияния сложных метеорологических явлений на рефракционные свойства тропосферы проведен корреляционный анализ выходных данных одно- и двухчастотного навигационных приемников. Один из рассмотренных случаев последовательного наблюдения снега и дождя приведен на рис. 8. Изменения ZTD , полученные по данным двухчастотного приемника, отмечены черной сплошной линией. Флуктуации высотной координаты одночастотного GPS -приемника показаны сплошной серой линией. Выделены периоды регистрации снега (область а) и дождя (область б) метеорологической станцией.

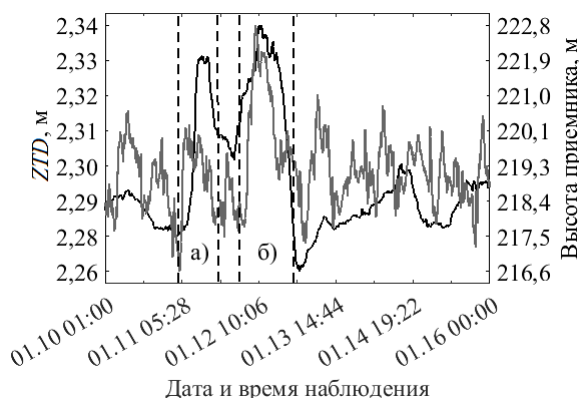


Рис. 8. Изменение ZTD и высоты одночастотного GPS -приемника во время сложного метеоявления: а – снег; б – дождь

Как видно из рис. 8, несмотря на пространственную разнесенность двух навигационных станций (~5,8 км), существует корреляция зенитной тропосферной задержки и высотной координаты одночастотного GPS -приемника.

Коэффициент корреляции исходных распределений на недельном интервале измерений составляет 0,4, а их трендовых компонент – 0,6.

Интервал прохождения дождя на обеих кривых рис. 8 прослеживается более явно, чем период снега. В данном случае увеличение ZTD во время дождя составило 5 см, во время снега 3 см. Несоответствие ZTD при снегопаде на рис. 8 (а) данным таблицы можно объяснить повышенным уровнем температуры (от 0 до +2 °С).

Смещение высотной координаты одночастотного GPS -приемника относительно математического ожидания во время дождя составило 3 м, а во время снега – 1 м. Изменение высотной координаты характеризуется большими по сравнению с ZTD флуктуациями ввиду того, что в одночастотном GPS -приемнике при решении навигационной задачи влияние ионосферы учитывается на уровне математической модели, что существенно ухудшает точность позиционирования (рис. 8). Этот фактор затрудняет анализ рефракционных свойств региональной тропосферы в условиях данного класса метеоявлений средствами одночастотных GPS -приемников. Для других классов метеоявлений данное оборудование вполне пригодно.

Отклонение двумерных координат (широты и долготы) одночастотного GPS -приемника при прохождении дождя представлено на рис. 9.

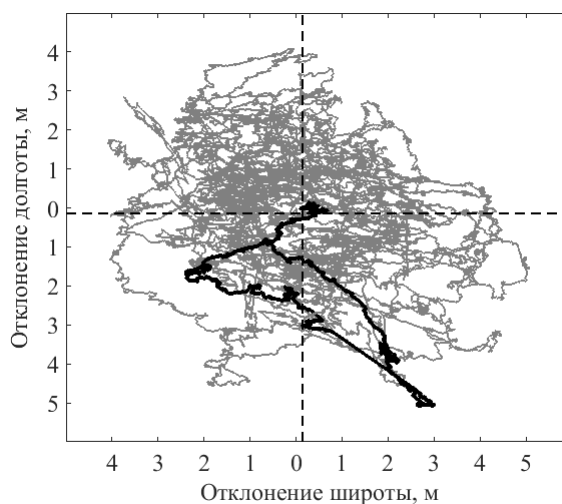


Рис. 9. Отклонение широты и долготы одночастотного GPS -приемника от математического ожидания во время дождя

На фоне общих флуктуаций широты и долготы (кривая серого цвета) в момент регистрации дождя наблюдается резкий и пропорциональный уход пространственных координат приемника от математического ожидания (кривая черного цвета) на величину ~4 м. Причиной тому является использование в процессе решения

навигационной задачи GPS-приемником тех спутниковых радиотрасс, которые проходят непосредственно через кучево-дождевую облачность. Ее рефракционные свойства флуктуируют во времени и приводят к аномальному росту тропосферной задержки. Это ухудшает помехоустойчивость и точность определения координат GPS-приемником.

Выводы. В статье рассмотрено влияние канала связи на распространение радиосигналов спутниковых навигационных систем. Установлено, что в условиях выделенных классов метеорологических явлений, в частности во время дождей, наблюдается увеличение ZTD относительно трендовой компоненты на величину ~6,2 см. Отклонение значений ZTD от математического ожидания в пределах исходной выборки не превышает 15 %.

Одним из источников флуктуаций ZTD является высокое содержание водяного пара в дождевых облаках и его высокая пространственно-временная неоднородность. Наибольшее увеличение ZTD зарегистрировано при дождевых осадках, сопровождающихся грозами, во время которых флуктуации ZTD достигают 8,3 см с отклонением на 15...20 % в пределах исходной выборки.

Для случаев регистрации туманов и облаков показано, что при умеренной облачности и во время тумана ZTD флуктуирует в пределах диапазона 3,0...3,7 см. Увеличение ZTD на величину ~2,3 см зафиксировано во время снегопадов. Показано, что в условиях охлажденной тропосферы ее пространственно-временные характеристики, в частности концентрация водяного пара, проявляются меньше, чем при ее нормальном состоянии.

На примере сложного метеорологического явления в виде последовательных снега и дождя отмечены различия в показателях отклонений ZTD. Представлены результаты корреляционного анализа данных одно- и двухчастотного навигационных приемников. Показано, что ZTD и высотная координата одночастотного GPS-приемника (в приведенном на рис. 8 случае) имеют коэффициент корреляции 0,4, а их трендовые компоненты – 0,6. Флуктуации высотной координаты, полученной по данным одночастотного GPS-приемника, вызваны преимущественно влиянием ионосферы.

На базе данных одночастотного GPS-приемника отмечен диапазон отклонений точности определения координат по широте и долготе от среднего значения во время дождя. Отмечено, что метеоявления, проходящие в условиях низких температур (снег и частично туман), находят ми-

нимально заметный отклик в выходных данных одночастотного приемника. При устойчивом состоянии тропосферы в отсутствие облачности и минимальных изменений содержания водяного пара установлено, что суточный диапазон вариаций ZTD не превышает 1,1 см.

Полученные данные можно использовать для коррекции существующих моделей тропосферы над Харьковским регионом. Особенности изменений тропосферной задержки для рассмотренных видов метеоявлений можно задействовать при решении задачи их классификации. В перспективе результаты могут быть применены при синтезе адаптивных алгоритмов обработки данных навигационных наблюдений, в частности для создания эмпирической модели распределения водяного пара в облаках. Такая модель улучшит точностные характеристики навигационного и др. оборудования, в котором используются априорные данные о среде распространения.

Библиографический список

1. *GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System* / M. Bevis, S. Businger, T. A. Herring et al. // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. – 1992. – 97, Iss. D14. – P. 15787–15801.
2. *Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів* / О. В. Кривенко, А. Г. Лауш, В. І. Луценко та інші // *Космічна наука і технологія*. – 2015. – 21, № 3. – С. 83–90.
3. *Луценко І. В. Дистанційне зондування тропосфери Землі з використанням випромінювання наземних та супутникових радіосистем: дис. ... канд. фіз.-мат. наук* / І. В. Луценко. – Х., 2011. – 226 с.
4. *Usage of global navigation systems for detection of dangerous meteorological phenomena* / V. F. Kravchenko, O. V. Kravchenko, V. I. Lutsenko et al. // *J. Measurement Science and Instrumentation*. – 2015. – 6, N 1. – P. 68–74.
5. *Impact of high-resolution data assimilation of GPS zenith delay on Mediterranean heavy rainfall forecasting* / K. Boniface, V. Ducrocq, G. Jaubert et al. // *Annales Geophys.* – 2009. – 27, N 1. – P. 2739–2753.
6. *Моніторинг атмосфери над Харьковским регионом посредством GPS* / А. Л. Коворотный, Ю. В. Гончаренко, В. Н. Горобец и др. // *Радиофизика и электрон.* – 2013. – 4(18), № 1. – С. 59–64.
7. *Сравнительный анализ моделей для оценки полного влаго-содержания тропосферы над Харьковским регионом посредством GPS-измерений* / А. Л. Коворотный, Ф. В. Кивва, Ю. В. Гончаренко и др. // *Радиофизика и электрон.* – 2013. – 5(19), № 4. – С. 21–26.
8. *Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. Т. 1. Монография* / К. М. Антонович. – М.: Картогеоцентр, 2005. – 334 с.
9. *Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks* / J. F. Zumberge, M. B. Hefflin, D. C. Jefferson et al. // *J. Geophys. Res.* – 1997. – 102, Iss. B3. – P. 5005–5017.
10. *SOPAC* [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://sopac.ucsd.edu/](http://sopac.ucsd.edu/). – Загл. с экрана.
11. *GIPSY OASIS 6.4 Release Notes* [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: www/URL: https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/gipsy/. – Загл. с экрана.
12. *Essen L. The refractive indices and dielectric constants of air and its principal constituents at 24 000 Mc/s* / L. Essen,

- K. D. Froome // Proc. Phys. Soc. B. – 1951. – 64, N 10. – P. 862–875.
13. Saastamoinen I. I. Contribution to the theory of atmospheric refraction / I. I. Saastamoinen // Bull. Geodesique. – 1973. – 107, N 1. – P. 13–34.
14. *Метеорологическое обеспечение международной авионавигации* [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://meteo.gov.ua/files/content/docs/docs_VMO_КАО/Приложение_3_к_Конвенции_о_международной_гражданской_авиации.pdf](http://meteo.gov.ua/files/content/docs/docs_VMO_КАО/Приложение_3_к_Конвенции_о_международной_гражданской_авиации.pdf). – Загл. с экрана.
15. *Тверской П. Н. Курс метеорологии (физика атмосферы)* / П. Н. Тверской. – Л.: Гидрометеоздат, 1962. – 692 с.
16. Bar-Sever Y. E. Estimating Horizontal Gradients of Tropospheric Path Delay with a single GPS Receiver / Y. E. Bar-Sever, P. M. Kroger, J. A. Borjesson // J. Geophys. Res. – 1998. – 103, Iss. B3. – P. 5019–5035.

Рукопись поступила 23.05.2016.

S. R. Shchekin, F. V. Kivva, V. N. Gorobets,
A. L. Kovorotniy

ABOUT THE IMPACT OF COMMUNICATION CHANNEL ON GNSS RADIOSIGNALS PROPAGATION IN THE KHARKIV REGION

In the paper we presented the results of systematic measurements of the positioning precision of several stationary navigation stations with known coordinates, which are equipped with single- and dual-frequency GPS/GLONASS navigation receivers. Particular attention has been paid to environment parameters caused by rains (including summer rains with thunderstorms), snowfalls, fogs and clouds. The experimental investigations of the fluctuations of zenith tropospheric delay and spatial coordinates of the reception stations located at the distance of 5.8 km have been

performed. The factors which limit the maximum permissible positioning precision have been evaluated. The results of the paper are relevant to the problems of operative prediction of the meteorological phenomena and researching their physical properties.

Key words: radiowave propagation, atmosphere monitoring, GPS, zenith tropospheric delay, remote sensing, positioning precision, GNSS radiosignals.

С. Р. Щекін, Ф. В. Ківва, В. М. Горобець,
О. Л. Коворотний

ПРО ВПЛИВ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ НА ПОШИРЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИТЕМ У ХАРКІВСЬКОМУ РЕГІОНІ

У статті представлено результати систематичних вимірювань точності позиціонування стаціонарних навігаційних пунктів, координати котрих відомі, оснащених одно- та двочастотними навігаційними приймачами систем GPS та ГЛОНАСС. Особливу увагу приділено параметрам навколишнього середовища, обумовленим дощами, у тому числі літніми грозовими, снігом, туманом та хмарністю. Проведено експериментальні дослідження флуктуацій зенітної тропосферної затримки та просторових координат приймальних пунктів, розміщених на відстані 5,8 км. Виконано оцінку факторів, що обмежують максимально досягнутою точністю позиціонування. Результати роботи актуальні для задач оперативного прогнозування метеорологічних явищ та дослідження їх фізичних властивостей.

Ключові слова: поширення радіохвиль, моніторинг атмосфери, GPS, зенітна тропосферна затримка, дистанційне зондування, точність позиціонування, радіосигнали глобальних навігаційних супутникових систем.