

УДК 621.396:528.88:537.86

Зенитная тропосферная задержка сигналов ГЛОНАСС/GPS по спутниковым данным ATOVS

В.Б. Кашкин^{1,2}, В.М. Владимиров³, А.О. Клыков^{1*}

¹Сибирский федеральный университет
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

³Красноярский научный центр СО РАН
660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

Поступила в редакцию 5.02.2014 г.

Обсуждается применение космического зондирования атмосферы прибором ATOVS в инфракрасном и радиодиапазоне для оценки тропосферной задержки сигналов ГЛОНАСС/GPS. Исследована зенитная тропосферная задержка по вертикальным профилям тропосферы за весь 2012 г. для района г. Красноярск. Сравнение с результатами расчетов задержки по моделям Саастамойнена и Хопфилд, использующих наземные метеорологические данные, показало, что три метода дают близкие результаты, однако задержка по модели Саастамойнена имеет смещение на $-0,0186$ м, а по модели Хопфилд — на $-0,0135$ м.

Ключевые слова: глобальные спутниковые навигационные системы, вертикальные профили тропосферы, стратосфера, тропосферная задержка сигналов ГЛОНАСС/GPS, барометрические формулы; global navigation satellite systems, vertical profiles of troposphere, stratosphere, tropospheric delay of GLONASS/GPS signals, barometric formulae.

В современном мире задачи позиционирования решаются с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS. Измеряется псевдодальность, включающая реальное расстояние до спутника и погрешности, связанные с неточностью определения эфемерид и другими причинами [1]. Серьезными источниками погрешности являются задержки сигналов в ионосфере и в нижней части атмосферы. Задержку в нижней, нейтральной части атмосферы (тропосфера, тропопауза и стратосфера) принято называть тропосферной задержкой. Ее величина зависит от физических свойств атмосферы и от пути, который сигнал проходит через атмосферу. Этот путь минимален, если спутник находится в зените. В этом случае говорят о зенитной задержке.

Скорость распространения радиоволн c и показатель преломления n в нейтральной атмосфере связаны с температурой T , давлением p и парциальным давлением водяного пара e в этой среде соотношениями [2]:

$$c = \frac{c_0}{n}, \quad n = 1 + \frac{77,6}{T} \left(p + \frac{4810e}{T} \right) \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где c_0 — скорость света в вакууме, м/с; p и e выражены в гПа, T — в К.

Пусть электромагнитная волна проходит одинаковый путь от точки z_1 до точки z_2 в среде и в вакууме. Так как скорость в среде меньше, чем в вакууме, то волна в среде отстанет на время $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau = \int_{z_1}^{z_2} \frac{n}{c_0} dz - \int_{z_1}^{z_2} \frac{1}{c_0} dz = \frac{1}{c_0} \int_{z_1}^{z_2} (n - 1) dz.$$

Тропосферная задержка, выраженная в единицах расстояния:

$$\Delta z = \int_{z_1}^{z_2} (n - 1) dz. \quad (2)$$

В настоящее время для учета тропосферной задержки используют математические модели, которые прогнозируют значение Δz по наземным метеорологическим параметрам: температуре, влажности и давлению в точке приема сигналов ГНСС [3, 4]. В тропосферной задержке выделяют сухую (гидростатическую) и влажную компоненты. Задержка, возникающая при прохождении сигнала в среде без учета водяного пара (сухая задержка), может быть определена с достаточной точностью. Задержку за счет водяного пара (влажную задержку), на которую приходится около 10% от Δz , учесть сложнее, так как водяной пар в тропосфере распределен неравномерно и крайне изменчив.

Для корректной оценки влияния атмосферы на распространение сигналов ГНСС важно знать метеопараметры в точке приема и иметь сведения

* Валентин Борисович Кашкин (rtcvbk@rambler.ru); Валерий Михайлович Владимиров; Александр Олегович Клыков.

о реальном состоянии тропосферы на различных высотах. Первые легко получить с помощью обычной метеорологической станции, источниками данных о вертикальных профилях тропосферы (ВПТ) служат искусственные спутники Земли, например космические аппараты серии NOAA (США).

В настоящей статье дан сравнительный анализ зенитной тропосферной задержки (ЗТЗ), вычисленной при использовании данных дистанционного зондирования атмосферы по ВПТ и с помощью моделей, учитывающих только наземные метеоданные.

Источники данных об атмосфере

Космические аппараты серии NOAA в составе бортовой аппаратуры содержат комплекс приборов ATOVS (Advanced Television and Infrared Observational Satellite) для вертикального зондирования тропосферы и стратосферы [5]. Аналогичный комплекс установлен на европейском спутнике METOP. Данные о вертикальных профилях получают также с помощью космических аппаратов TERRA, AQUA и NPP (США). На российском метеорологическом спутнике Метеор-М № 1 для этих целей установлен модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы МТВЗА.

Спутники NOAA имеют круговую солнечно-синхронную орбиту высотой 830–870 км с периодом обращения 102 мин. Приборы ATOVS регистрируют интенсивность восходящего излучения в участках полос поглощения газов в инфракрасном и радиодиапазонах. При дистанционном зондировании атмосферы ключевым моментом является использование зависимости ширины и сдвига центра линии поглощения от давления, поэтому данные о вертикальном распределении температуры и влажности привязаны к изобарическим уровням атмосферы. Аппаратура ATOVS позволяет восстановить поля параметров атмосферы на различных уровнях давления p . Разрешение в подспутниковой точке по горизонтали составляет 20–50 км по высоте 2–3 км, полоса обзора – 2250 км, кадр охватывает до 5000 км в длину. Для дешифрирования телеметрических данных ATOVS используется программный продукт AAPP [6], при его запуске из сети Интернет скачиваются файлы прогностической модели GFS и орбитальные данные спутника. Вертикальные профили атмосферы вычисляются с помощью программного комплекса IAPP путем решения обратной задачи [7].

Известны более совершенные программные продукты, разработанные в Институте оптики атмосферы СО РАН [8].

Метеорологическая администрация Республики Корея в течение 8 мес 2001 г. выполнила в районах Дальнего Востока обширные исследования по валидации данных ATOVS (спутник NOAA-16) путем сравнения этих данных с результатами аэрологического зондирования [9]. Установлено, что смещение данных от показаний радиозондов по температуре составило менее 1 К, а стандартное отклонение 1,3 К, кроме уровней вблизи 1000 гПа и выше 200 гПа. Удельная влажность по данным ATOVS при 1000 гПа

определяется со смещением не более 0,5 г/кг и стандартным отклонением 2 г/кг, в единицах парциального давления это равно 0,83 и 3,2 гПа. На уровне 500 гПа смещение составляет 0,3 г/кг (0,48 гПа), а стандартное отклонение – 0,6 г/кг (0,96 гПа). К уровню 200 гПа и выше смещение и стандартное отклонение по влажности становятся практически равными нулю, правда, здесь парциальное давление крайне мало. По данным [10], относительная погрешность восстановления удельной влажности составляет 15–30%. ATOVS позволяет находить профили на высотах до 50 км, но при $p < 100$ гПа погрешность не определена.

Оперативная информация ATOVS доступна для всех станций, принимающих сигналы спутников NOAA в режиме HRPT (High Resolution Picture Transmission). Архивные данные по ВПТ можно найти на сайте Air Recourse Laboratory NOAA. Эти данные хранятся в архивах формата GDAS и покрывают всю планету сеткой с шагом $1 \times 1^\circ$ по широте и долготе, шаг по времени 3 ч. Доступ возможен как через специальный интерфейс сайта, так и через открытый ФТП-сервер [11]. Файлы GDAS, использовавшие данные TOVS (прибора предыдущего поколения), с шагом 6 ч, применялись для исследования тропосферной задержки сигналов ГНСС в диссертации [12].

На рис. 1 в качестве примера показан профиль температуры, полученный 20.05.2011 со спутника NOAA-19 с помощью приемной станции АлисаTM Сибирского Федерального университета в 15:55 UTC для точки с координатами 59,43° с.ш., 111,43° в.д. Здесь же приведен ближайший архивный профиль из [11] за этот день в 15:00 UTC, точка на 59° с.ш. и 111° в.д. Кроме того, на рис. 1 можно видеть профиль стандартной атмосферы, где предполагается, что воздух тропосферы состоит из идеального газа в состоянии термодинамического равновесия, температура уменьшается с высотой h по линейному закону: $T = T_0 - \beta h$, где $T_0 = 288,15$ К – температура при $p_0 = 1013,25$ гПа (на уровне моря), $\beta = 0,0065$ К/м – вертикальный градиент температуры; температура T и давление p связаны барометрической формулой для политропной атмосферы [13]:

$$p = p_1 (T/T_0)^{\frac{g}{R\beta}}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения; R – удельная газовая постоянная. При построении профиля стандартной атмосферы учитывалось, что $R = R_c$ – удельной газовой постоянной сухого воздуха, $R_c = 287 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К})$.

На графике профиля стандартной атмосферы с уровня $p = 223,46$ гПа при $h = 11,1$ км начинается тропопауза с $T = 216,65$ К ($-56,49$ °С) [13]. На рис. 1 также показан профиль относительной влажности по NOAA-19. Профиль меняется с изменением давления и высоты, причем уменьшение влажности на некотором изобарическом уровне может свидетельствовать о конденсации водяного пара и нарушении термодинамического равновесия.

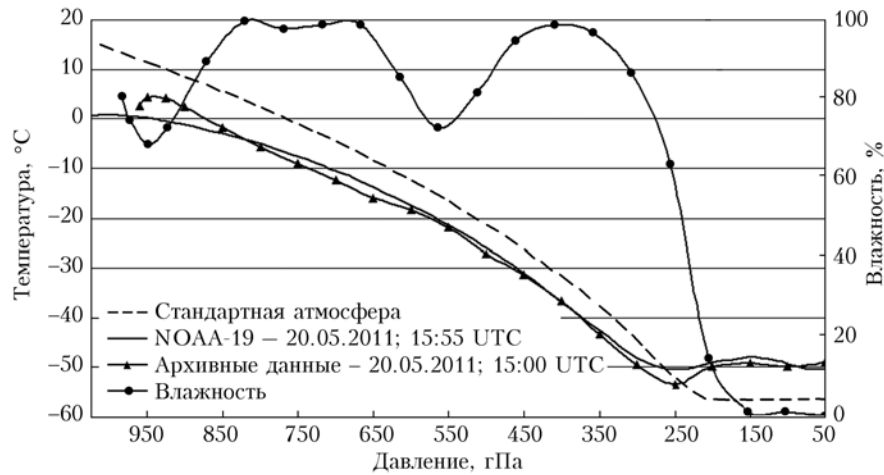


Рис. 1. Температурные и влажностный профили атмосферы

Это особенно заметно в начале тропопаузы при $p = 200\text{--}250$ гПа, когда наблюдается увеличение температуры, связанное с выделением тепла при конденсации. Эффект увеличения температуры в начале тропопаузы рассмотрен в [14].

Сравнение графиков на рис. 1 показывает, что температурные профили по NOAA-19 и архивный ведут себя иначе, чем профиль стандартной атмосферы. Для стандартной атмосферы вертикальный градиент температуры $\beta = 0,0065$ К/м, у двух других профилей градиент β зависит от изобарического уровня и изменяется с высотой. Температурный профиль стандартной атмосферы, профиль по NOAA-19 и профиль из архива в координатах температура–давление имеют разную кривизну.

Профиль из архива на рис. 1 близок к профилю по NOAA-19. Типично практическое совпадение профилей на уровнях от 850 до 300 гПа, некоторое различие на приземном уровне и менее заметное различие при $p < 300$ гПа. Ниже архивные данные по ВПТ из [11] использованы в качестве очень близкой модели для профилей тропосферы, получаемых непосредственно при приеме информации ATOVS с космических аппаратов. Это позволило привлечь к исследованиям обширную информацию, охватывающую весь земной шар по температуре, влажности, геопотенциальной высоте, отвечающую различным изобарическим уровням, с шагом по времени 3 ч.

Модели и алгоритмы

Пусть влажность в атмосфере отсутствует, зависимость давления от температуры для тропосферы описывается формулой профиля стандартной атмосферы (3). Температура и давление в месте расположения приемника ГНСС равны T_1 и p_1 . Сухая зенитная задержка сигнала Δz на пути dh , в соответствии с (2) и (3), имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta z &= 77,6 \cdot 10^{-6} \frac{p}{T} dh = 77,6 \cdot 10^{-6} \frac{T_1 p_1}{T T_1} \left(\frac{T}{T_1} \right)^{\frac{g}{R_c \beta}} dh = \\ &= 77,6 \cdot 10^{-6} \frac{p_1}{T_1} \left(\frac{T_1 - \beta h}{T_1} \right)^{\frac{g}{R_c \beta} - 1} dh. \end{aligned} \quad (4)$$

Зенитная тропосферная задержка сигналов ГЛОНАСС/GPS по спутниковым данным ATOVS

В настоящее время получили распространение методики оценки тропосферной задержки по моделям Ю. Саастамойнена [3] и Х. Хопфилд [4]. Эти методики используют только наземные оперативные метеорологические данные в месте расположения приемника ГНСС и не учитывают фактические данные о вертикальных профилях атмосферы.

Модель Саастамойнена основана на следующих положениях.

Во-первых, считается, что для собственно тропосферы справедлива модель стандартной атмосферы, значение вертикального градиента температуры взято равным $\beta = 0,0062$ К/м. Предполагается, что водяной пар ведет себя как идеальный газ и находится в состоянии термодинамического равновесия, а соотношение вида (3) описывает зависимость между атмосферным давлением p и температурой T , а также между парциальным давлением водяного пара e и температурой T .

Во-вторых, предполагается, что весь водяной пар в атмосфере находится в тропосфере. В тропопаузе и стратосфере (далее, для простоты – в стратосфере) $e = 0$, температура постоянная, зависимость давления от высоты описывается барометрической формулой для изотермической атмосферы [13]:

$$p = p_s \exp \left[-\frac{g(h - z_s)}{R_c T_s} \right], \quad (5)$$

где z_s – нижняя граница стратосферы; p_s и T_s – давление и температура на этой границе.

В-третьих, учитывается зависимость ускорения свободного падения от высоты, для этого вводится среднее ускорение $g = 9,784$ м/с² для всей колонки тропосферы. Учитываются также географическая широта φ в месте расположения приемника ГНСС и его высота h_1 над уровнем моря.

Ж. Saastomoinen [3] удалось выразить интеграл (2) в элементарных функциях и найти числовые коэффициенты, входящие в модель. Сухая составляющая зенитной тропосферной задержки (ЗТЗ)

$$\Delta z_d = \frac{0,002277(p_1 - e_1)}{1 - 0,00266 \cos(2\varphi) - 0,00028h_1}, \quad (6)$$

где p_1 – атмосферное давление, гПа; e_1 – парциальное давление водяного пара, гПа, в месте расположения приемника ГНСС; h_1 выражена в км.

Влажная составляющая ЗТЗ имеет вид

$$\Delta z_w = \frac{0,002277 \left(0,05 + \frac{1255}{T_1} \right) e_1}{1 - 0,00266 \cos(2\varphi) - 0,00028 h_1}. \quad (7)$$

В (7) T_1 – температура, К.

Особенность формулы для Δz_d – использование в качестве основного параметра только одной величины – давления в месте расположения приемника.

H.S. Hopfield [4] также использовала модель стандартной атмосферы и формулу (3), причем вертикальный градиент температуры $\beta = 0,00681$ К/м. При этом показатель степени при (T/T_1) в (4) становится равным $4,02 \approx 4$, оказывается возможным описывать высотную зависимость сухого и влажного профилей показателя преломления множителем $H(h)$ в виде параболы четвертой степени (Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile):

$$H(h) = (1 - h/h_a)^4. \quad (8)$$

Здесь индекс a может относиться либо к сухой d , либо к влажной w компоненте; h_d и h_w – предельные значения высот, после которых показатель преломления для этих компонент практически обращается в нуль: $h_d = 40136 + 148,72(T_1 - 273,15)$ м [15], $h_w = 11000$ м.

В этой модели обе составляющие ЗТЗ представлены в форме

$$\Delta z_d = 77,64 \cdot 10^{-6} \frac{(p_1 - e_1) h_d}{5T_1}, \quad \Delta z_w = 0,373 \frac{e_1 h_w}{5T_1^2}, \quad (9)$$

как и выше, T_1 , p_1 и e_1 – температура, давление и парциальное давление пара в месте расположения навигационного приемника.

Возможность использования спутниковых данных ATOVS о вертикальных профилях атмосферы для оценки тропосферной задержки сигналов ГНСС продемонстрирована в работе [16]. В нашей работе найдена зенитная тропосферная задержка по вертикальным профилям тропосферы из архива Air Recourse Laboratory NOAA [11]. На приземном уровне использованы метеоданные [17].

Разобьем тропосферу на изобарические слои, определим показатель преломления среды n_i для каждого слоя и оценим зенитную задержку Δl_i в i -м слое толщиной l_i как

$$\Delta l_i = l_i(n_i - 1).$$

Величина n_i определяется по формуле (1), входящее в нее парциальное давление водяного пара e_i вычисляется как [13]:

$$e_i = 6,1070 \cdot 10^{\frac{7,665t}{243,33+t}} U_i / 100,$$

где t – средняя температура в слое °С; U_i – средняя относительная влажность, %.

Собственно тропосферная часть ЗТЗ равна сумме задержек во всех слоях.

В качестве нижней границы стратосферы выбран изобарический уровень 200 гПа, соответствующий высоте 11000 м. Как и в модели Саастамойнена, для стратосферы использована барометрическая формула изотермической атмосферы (5). Стратосферная часть задержки Δz_s вычисляется по формуле (2) с учетом (1) и (5):

$$\begin{aligned} \Delta z_s &= \frac{77,6 \cdot 10^{-6}}{T_s} p_s \int_{z_s}^{\infty} \exp \left[-\frac{g(z - z_s)}{R_c T_s} \right] dz = \\ &= 77,6 \cdot 10^{-6} \frac{p_s R_c}{g_1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Выбран бесконечный верхний предел интегрирования, это не вносит погрешности, так как на границе стратосферы $(z - z_s) = 40$ км, экспонента под интегралом практически равна нулю. При $p_s = 150$ гПа имеем $\Delta z_s = 0,341$ м, при $p_s = 200$ гПа $\Delta z_s = 0,455$ м.

Использование модели изотермической стратосферы оправдывается необходимостью сравнения результатов вычисления ЗТЗ по данным ВПТ с результатами, полученными по модели Саастамойнена, чтобы стало возможным учесть вклад в ЗТЗ только собственно тропосферы. Однако эта модель не точна, как и модель Хопфилд, предполагающая, что температура в стратосфере уменьшается с высотой. Фактически температура в стратосфере с высотой растет, поскольку содержащийся здесь озон нагревает стратосферу за счет поглощения ультрафиолетовой части солнечного спектра [13].

Следует также иметь в виду, что архивные данные из [11] несколько закруглены по сравнению с данными, непосредственно получаемыми при приеме информации ATOVS с космических аппаратов. Так, в [11] содержатся информации о ВПТ на 22 уровнях давления – от приземного до 20 гПа, а ATOVS на том же интервале обеспечивает 30 уровней. Уменьшение количества уровней и, соответственно, увеличение интервала l_i приводят к погрешности при вычислении сухой составляющей ЗТЗ, оцениваемой как $\pm 0,008$ м.

С использованием формул (5), (6), (9), (10) был разработан алгоритм определения зенитной тропосферной задержки по данным дистанционного зондирования и по метеопараметрам.

Результаты и их анализ

В настоящей статье рассчитывается зенитная тропосферная задержка в районе г. Красноярск за каждый день 2012 г., которая оценивалась с шагом 3 ч с 0:00 до 21:00 UTC. Для приземного слоя использованы данные по метеостанции Красноярск [17]. Найдено около 3000 значений ЗТЗ для каждого из трех вариантов: по ВПТ и по моделям Хопфилд и Саастамойнена. На рис. 2 приведены графики среднемесячных значений рядов ЗТЗ за 2012 г.

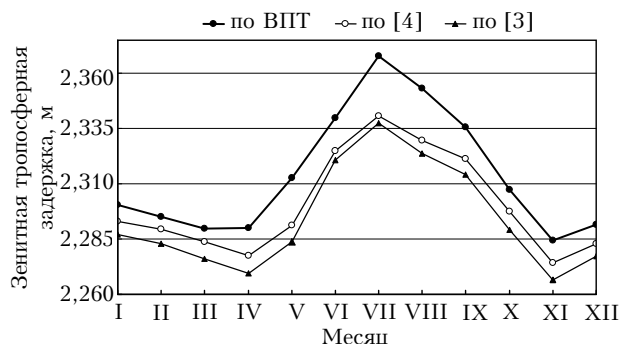


Рис. 2. Среднемесячные значения зенитной тропосферной задержки

Как следует из рис. 2, значения ЗТЗ, найденные по ВПТ и по моделям Саастамойнена и Хопфилд, имеют одинаковый годовой ход с минимумом зимой и максимумом летом. Максимум связан с существенным увеличением влажности в летний период. Некоторые статистические характеристики, относящиеся к рядам ЗТЗ, приведены в таблице.

Статистические характеристики рядов ЗТЗ за 2012 г.

Характеристика	По ВПТ	По [3]	По [4]
Среднее значение ЗТЗ, м	2,314	2,295	2,301
Максимальное значение ЗТЗ, м	2,463	2,226	2,392
Минимальное значение ЗТЗ, м	2,234	2,226	2,234
Стандартное отклонение ЗТЗ, м	0,0366	0,0288	0,0278
Смещение относительно ВПТ, м	—	-0,0186	-0,0135
Коэффициент корреляции с ВПТ	1	0,8247	0,8215

Из таблицы и рис. 2 видно, что значения ЗТЗ, полученные по ВПТ и по моделям Саастамойнена и Хопфилд, близки друг к другу (коэффициент корреляции $\sim 0,82$). Однако на протяжении всего года величины ЗТЗ, найденные по моделям, смещены относительно величин по ВПТ на 0,0186 и на 0,0135 м соответственно. Это можно объяснить отличием профиля стандартной атмосферы, использованного в [3, 4], от профилей тропосферы, определяемых по ВПТ. Самым важным отличием является зависимость вертикального градиента температуры β по ВПТ от высоты и изобарического уровня. Кроме того, здесь наблюдается увеличение температуры на изобарических уровнях 200–250 гПа, обусловленное конденсацией водяного пара.

На рис. 3 приведены графики ЗТЗ за январь 2012 г. В это время графики ЗТЗ рядов по ВПТ и по моделям Саастамойнена и Хопфилд почти повторяют друг друга.

В январе и феврале коэффициент корреляции рядов по ВПТ и по [3] $R = 0,9322$, смещение ряда по этой модели относительно ряда по ВПТ равно $-0,0130$ м. Коэффициент корреляции рядов по ВПТ и по [4] $R = 0,9356$, смещение $-0,0068$ м. Все это отражает особенности состояния тропосферы в зимние месяцы, когда наблюдаются низкие температуры и низкое парциальное давление водяного пара.

На рис. 4 приведены графики ЗТЗ для июля. Графики рядов по моделям практически совпали, на них видны суточные колебания ЗТЗ. Графики ряда по ВПТ и рядов по моделям уже мало похожи друг на друга. В июне–июле смещение ряда по модели Саастамойнена относительно ряда по ВПТ составило $-0,0248$ м, коэффициент корреляции уменьшился до $R = 0,6293$. Смещение ряда по модели Хопфилд относительно ряда по ВПТ в этом случае равно $-0,0210$ м, $R = 0,6199$.

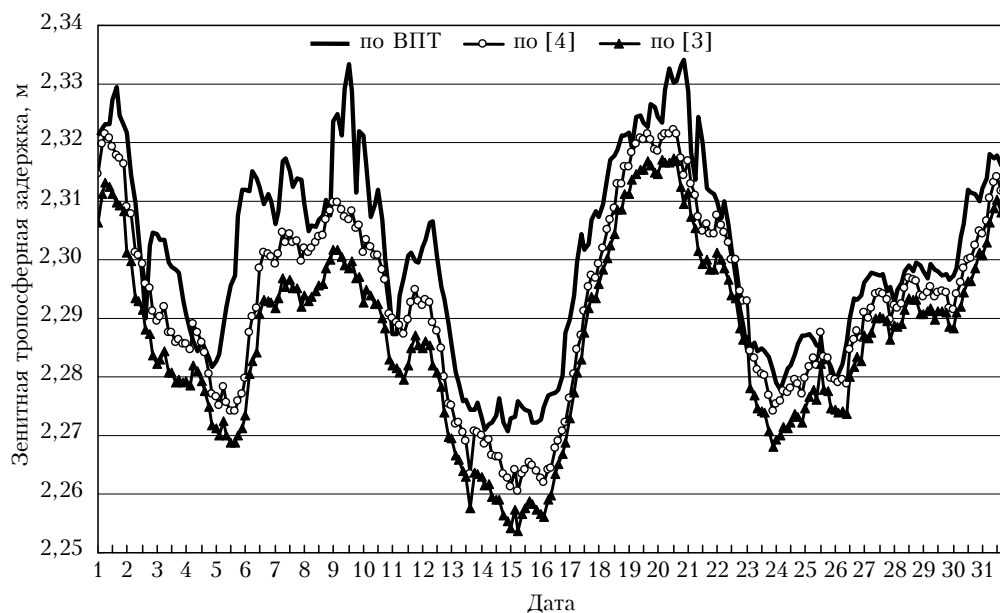


Рис. 3. Зенитная тропосферная задержка в январе 2012 г.

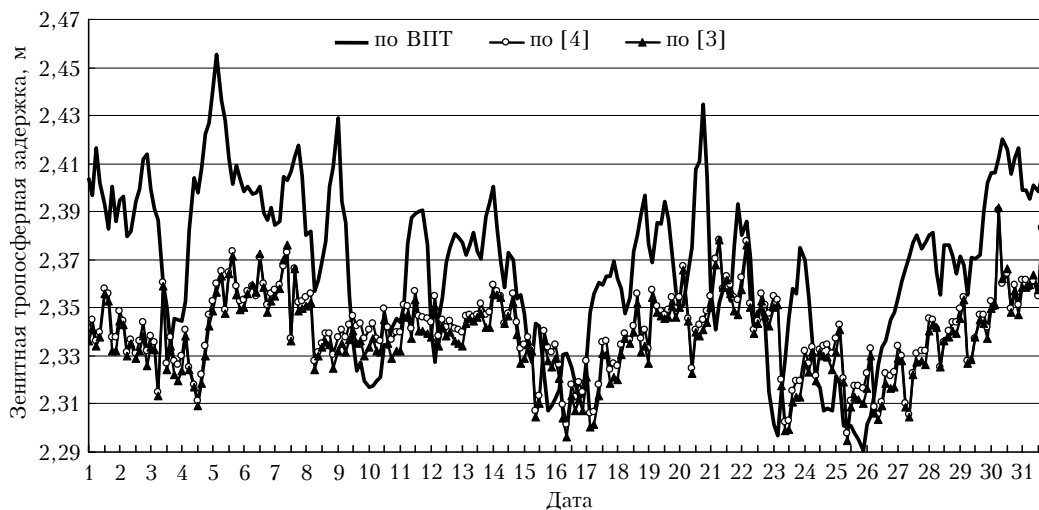


Рис. 4. Зенитная тропосферная задержка в июле 2012 г.

Различие графиков объясняется резким возрастанием влажности в летние месяцы на всех уровнях тропосферы. Методики Саастамойнена и Хопфилд используют данные о влажности только в приземном слое, а методика, основанная на ВПТ, хоть и с некоторой погрешностью, все же учитывает информацию о влажности во всем столбе тропосферы.

Так называемая тропосферная задержка состоит из задержки в собственно тропосфере и суммарной задержки Δz_s в тропопаузе и стратосфере. Выше приведены оценки Δz_s по формуле (10) в предположении, что тропопауза и стратосфера имеют одинаковую постоянную температуру. Одна из оценок равна 0,455 м — это значительная величина, составляющая около 20% ЗТЗ. Задача уточнения Δz_s ждет своего решения.

Заключение

В практике тропосферной коррекции сигналов ГНСС перспективно применение оперативных данных о вертикальных профилях тропосферы, получаемых с помощью искусственных спутников Земли, возможно построение карт ЗТЗ на большие территории.

В работе определены значения зенитной тропосферной задержки с использованием спутниковых данных о вертикальных профилях тропосферы в качестве альтернативы применению моделей Хопфилд и Саастамойнена, основанных на наземных наблюдениях метеопараметров. Показано, что в районе г. Красноярска значения зенитной тропосферной задержки, определенные по [3, 4] смещены относительно величин, найденных по вертикальным профилям, зимой на $-0,0135$ и $-0,0068$ м, летом на $-0,0248$ и $-0,021$ м соответственно.

1. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
2. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн. М.: ЛЕНАНД, 2009. 496 с.

3. Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellite // Int. Sympos. on the Use of Artificial Satellite. Washington, 1971. P. 247–251.
4. Hopfield H.S. Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data // J. Geophys. Res. 1969. V. 74, N 18. P. 4487–4499.
5. Goodrum G., Kidwell K., Winston W. NOAA KLM user's guide. National Ocean and Atmosphere Administration [Электронный ресурс] URL: <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/>
6. ATOVS and AVHRR Pre-processing Package [Электронный ресурс] URL: www.metoffice.gov.uk/research/interproj/nwpsaf/aapp/
7. International ATOVS Processing Package [Электронный ресурс] URL: <http://cimss.ssec.wisc.edu/opsats/polar/iapp/>
8. Афонин С.В., Белов В.В. Направления развития и результаты пассивного спутникового зондирования системы «атмосфера – подстилающая поверхность» в Институте оптики атмосферы СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1031–1041.
9. Ahn M.-H., Kim M.-J., Chung C.-Y., Suh A.-S. Operational Implementation of the ATOVS Processing Procedure in KMA and Its Validation // Adv. in Atmos. Sci. 2003. V. 20, N 3. P. 398–414.
10. Щукин Г.Г., Иткин М.И., Караваяев Д.М., Чичкова Е.Ф. Сравнение данных дистанционного температурно-влажностного зондирования атмосферы для Северо-Западного региона РФ // Мат-лы конф. «II Всероссийские Армандовские чтения» [Электронный ресурс] URL: http://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/section_1.html
11. URL: <https://ready.arl.noaa.gov/READYamet.php>
12. Schueler T. On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation: PhD Thesis. Munich: Universitaet der Bundeswehr, 2001. 364 p.
13. Атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.
14. Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 10. С. 908–916.
15. Goad C., Goodman L. A Modified Hopfield Tropospheric Refraction Correction Model. Presented at the

American Geophysical Union Annual Fall Meeting at
SA, 12–17 December, 1974. P. 28.
16. *Кашкин В.Б., Петров Е.В.* Оценка тропосферной
задержки сигналов навигационных систем ГЛОНАСС

и GPS с использованием спутниковых данных ATOVS
о вертикальных профилях атмосферы // Изв. вуз.
Физ. 2010. № 9(2). С. 27–29.
17. URL: <http://gp5.ru>

V.B. Kashkin, V.M. Vladimirov, A.O. Klykov. **GLONASS/GPS zenith tropospheric delay based on satellite data ATOVS.**

The technique of space infrared and microwave atmospheric sounding with ATOVS instrument is discussed. The results of the sounding are vertical profiles of atmosphere. Zenith tropospheric delay was estimated with the profiles and with the Saastamoinen and Hopfield delay models using surface measurements. Biases of the model-derived estimations are $-0,0186$ m for the Saastamoinen model and $-0,0135$ m for the Hopfield one during the whole 2012. The results are valid for Krasnoyarsk (middle latitudes of Siberia).